

Н. П. ЛАВРОВА

КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОСЪЕМКА



КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОСЪЕМКА

Н. П. ЛАВРОВА

Н. П. ЛАВРОВА

КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОСЪЕМКА

Допущено Министерством высшего
и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для студентов
геодезических специальностей вузов

Виктору Михайловичу
Сердюкову
на личный и коллективный
обучение в МИИГА-К
и семье

Н. Лаврова

9 Января 1984г.
Москва



МОСКВА «НЕДРА» 1983

Лаврова Н. П. Космическая фотосъемка. Учебное пособие для вузов. М., Недра, 1983, 288 с.

Приведен материал по динамике движения космических летательных аппаратов (КЛА), параметрам орбиты и особенностям полета к Луне и планетам Солнечной системы. Рассмотрены системы КЛА и их конструктивные особенности и характерные схемы, методы и средства космической съемки, оптико-электронные космические съемочные системы, многозональные камеры и системы комплексного управления процессом космической съемки. Изложен и систематизирован материал по информационным параметрам съемочного процесса.

Для студентов и аспирантов геодезических и землеустроительных вузов.

Табл. 14, ил. 80, список лит.— 13 назв.

Рецензенты:

кафедра фотограмметрии Новосибирского института инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии и лауреат Государственной премии СССР, д-р техн. наук, профессор С. С. Суров.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Развитие науки и техники позволило создать серию космических летательных аппаратов (КЛА), которые доставляют на Землю ценные материалы для исследований и практического применения в разных отраслях народного хозяйства. Программа космических исследований, осуществляемая с пилотируемых кораблей, орбитальных и межпланетных станций, позволяет человеку изучать планету, окружающий его мир, изучать природные ресурсы.

В течение последних двадцати пяти лет наша страна последовательно осуществляет научно обоснованную программу изучения космического пространства и планет Солнечной системы.

Одной из задач космических исследований является развитие научных основ рационального использования и охраны почв, недр, растительного и животного мира, воздушного и водного бассейнов, осуществление и разработка методики прогнозирования погоды и стихийных бедствий и др.

Большую роль в познании окружающего нас мира, изучении космического пространства, поверхности Земли и других планет играют методы регистрации и хранения информации фотографическими и электронно-оптическими системами, которые подразделяются по характеру регистрации информации на: фотографические — когда приемником лучистой энергии является светочувствительный слой к определенной зоне спектра; фототелевизионные — когда регистрация информации ведется на светочувствительный слой, а ее передача для последующего хранения и обработки осуществляется с помощью радиосредств; телевизионные — когда регистрация информации об объекте производится на телевизионные трубки, а ее передача с запоминающих устройств для последующей обработки и хранения осуществляется с помощью радиосредств; электронные — когда запись изображения производится на магнитные ленты.

Методы можно также подразделить по спектральным характеристикам, т. е. по каналам, позволяющим регистрировать информацию об объекте в том или ином диапазоне спектра, по оперативности получения информации — на пассивные и активные.

В задачу курса «Космическая фотосъемка» входит изучение методов и средств получения фотографической информации, изучение условий проведения космической съемки, оптических характеристик объектов, методов и средств фотохимической обработки материалов съемки, изучение качественных показателей изображения и методов их определения, изучение возможностей применения материалов съемки для исследования при-

родных ресурсов Земли. При подготовке учебника к изданию автором были учтены работы по фотографированию Земли и Луны, впервые выполненные в Московском ордена Ленина институте инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии в содружестве со специалистами ряда организаций, осуществивших запуск КЛА, и космонавтами, выполнявшими космическую съемку.

Автор выражает искреннюю благодарность д-ру техн. наук, проф. В. Д. Большакову за просмотр рукописи и ценные замечания.

Глава I

КОСМИЧЕСКИЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ (КЛА)

§ 1. ЗАДАЧИ ФОТОСЪЕМОК ИЗ КОСМОСА

Программа космических исследований, осуществляемая в Советском Союзе, направлена на использование достижений космонавтики для нужд народного хозяйства и научно-технического прогресса.

Космические исследования позволяют человеку изучать наиболее общие закономерности окружающего его мира, решать такие важные проблемы, как предохранение водных бассейнов и воздуха от загрязнения, изучение ресурсов, исследование удаленных и труднодоступных районов страны и многие другие задачи.

Одним из методов изучения нашей планеты, околоземного пространства, Луны и происходящих на ней процессов является метод фотосъемки из космоса, который занимает важное место в программе исследований, выполняемых при полетах каждого космического летательного аппарата.

Начало практическому использованию метода космического фотографирования было положено автоматической станцией «Зонд-5», запущенной в Советском Союзе в сентябре 1968 года, на которой был установлен комплект космической съемочной аппаратуры с электронным блоком управления. Решение проблемы возвращения автоматической станции на Землю открыло новые возможности изучения объектов земной поверхности с помощью прецизионных фотографических оптико-электронных систем, обеспечивающих разностороннюю информацию, отображенную на снимках. Впервые после облета Луны была осуществлена посадка космического летательного аппарата на Землю и проведена фотохимическая обработка полученных пленок в условиях, обеспечивающих высокое качество информации.

Стартовавшие затем советские автоматические станции «Зонд-6, 7, 8», также оборудованные космической съемочной аппаратурой, открыли новый этап в исследовании Луны, планеты Земля и околоземного космического пространства.

Программа и методика фотографических съемок с КЛА предусматривает получение материалов для решения широкого круга производственных и научных вопросов.

Земная поверхность была впервые сфотографирована на цветную пленку с борта пилотируемого космического корабля «Восток-2» Г. С. Титовым.

Фотографические съемки производились при полетах космических кораблей и орбитальных станций, на которых были уста-

новлены оптико-электронные системы для съемки в разных спектральных зонах. Материалы космических съемок земной поверхности открыли широкие возможности проведения комплексных исследований в области картографии, геодезии, геологии, метеорологии, океанографии, изучении природных ресурсов и др.

Неотъемлемой частью техники космических исследований является аппаратура наблюдения и фиксации, включающая фототелевизионные, фотографические и электронные системы.

Процесс космической съемки осуществляется с помощью нескольких систем, обеспечивающих измерение геометрических параметров фотографирования, управления съёмочной системой, синхронную работу всех камер в момент экспонирования, регистрацию временных и других параметров.

Методы космической съемки, применяемые при изучении природных ресурсов Земли, имеют ряд преимуществ по сравнению с наземными и самолетными. Материалы обладают хорошей обзорностью, что позволяет одновременно рассматривать значительные территории, в то же время космические снимки достаточно детальны. При полете космического летательного аппарата по заданной орбите возможно получить за очень короткий период времени космические снимки на труднодоступные и очень удаленные районы земного шара. Эти факторы обуславливают высокую экономичность метода космической съемки.

Задачи применения космических съемок в разных зонах спектра можно подразделить на шесть основных направлений:

1. Планетарные исследования.
2. Высокоточные измерения материалов космической съемки для целей картографии, фотограмметрии и др.
3. Изучение и рациональное использование природных ресурсов Земли.
4. Исследование Мирового океана.
5. Исследование редких явлений, загрязнений атмосферы и океана, охрана окружающей среды.
6. Разработка методов и средств космической фотосъемки и обработки информации.

К первому комплексу вопросов следует отнести геодезические и картографические работы, выполняемые по материалам космической съемки. В качестве примера рассмотрим применение материалов космической съемки для картографирования Луны.

Полеты автоматических станций «Зонд-5, 6, 7, 8» по трассе Земля — Луна — Земля явились завершением этой программы планомерного исследования Земли и Луны. Наряду с выполнением большого комплекса научных исследований и технических отработок, программа полета каждой станции предусматривала проведение сеансов фотографирования лунной

поверхности с различных точек траектории на черно-белую и цветную фотопленки с возвращением ее на Землю. Впервые за много лет исследований Луны наука получила в свое распоряжение свободные от помех и искажений телевизионной передачи непосредственные снимки лунной поверхности, которые имеют высокое фотографическое качество и вносят существенный вклад в обработку фотографического метода исследования планет автоматическими станциями.

Программа и методика фотографического эксперимента с автоматических межпланетных станций (АМС) «Зонд-5, 6, 7, 8» предусматривала получение материалов для решения широкого круга научных задач. К первоочередным задачам эксперимента были отнесены исследования работоспособности фотографической системы в космосе, отработка методики фотохимической обработки материалов съемки и проведение по ней фотометрических, фотограмметрических и картографических работ.

По материалам космических съемок Луны и планет создают тематические и топографические карты, строят опорные сети фотограмметрическим методом, определяют фигуру и размеры планет, уточняют траекторию полета АМС, исследуют динамические процессы, определяют спектральные характеристики и др.

Методика проявления фотопленок, экспонированных в космосе, существенно отличается от принятых в аэрофотосъемочном производстве, что объясняется требованием оптимального проявления каждого негатива при недостаточно известных условиях съемки. В связи с этим при космической съемке возникает необходимость решения следующих задач:

определения оптимальных условий фотохимической обработки материалов, полученных при различных условиях экспонирования;

уточнения составов проявляющих растворов;

исследования влияния радиации на сенситометрические показатели светочувствительных материалов.

При разработке методов космической съемки большое внимание уделяется качеству работ. Качество фотографических материалов определяет производительность и точность последующих работ. Задачи получения космических снимков с высокими измерительными и изобразительными свойствами требуют тщательного учета условий фотографирования, анализа технических средств, применяемых при космической съемке и обработке материалов.

Возрастающие требования к объему информации космического снимка обуславливают повышение роли цветной фотографии, так как для многих исследователей необходим такой дополнительный индикационный признак, как цвет. Цветная съемка при полете космических кораблей выполняется для

геологов, топографов, океанологов, геоморфологов и других специалистов.

Возможности обнаружения на снимках ряда объектов значительно расширяются, если фотографирование производится на спектрзональные пленки, передающие объекты в условных цветах, при различии коэффициентов яркости объектов в видимой и инфракрасной областях спектра.

В настоящее время имеется опыт применения многозональных съемок, которые позволяют повысить возможность опознавания объектов земной поверхности за счет создания в наземных условиях многоспектрального изображения.

Важную роль имеет геологическое изучение Земли с помощью средств космической техники и, прежде всего, дешифрирование космических изображений земной поверхности.

Главное преимущество космических фотографий — в их обзорности, позволяющей проследить геологические соотношения на больших площадях и выяснить крупнорегиональные и планетарные связи между различными объектами и явлениями.

Космические методы в океанологии позволяют изучать распространение и типы морских льдов, характеристики ледовой обстановки. Снимки из космоса можно также применять для изучения рельефа морского дна, так как при съемке с больших высот значительно увеличивается просматриваемость глубин.

Гидролого-гляциологические исследования по космическим снимкам позволяют определить мощность горных водосборов, границы снежных покровов на равнине, запасы воды в снежном покрове.

По космическим снимкам можно определить загрязнение морей, океанов, составить гидрологические карты с границами затопляемых пойм, характеристиками стока.

При изучении почвенных покровов также можно применить космические снимки. По ним выполняют почвенное картографирование, изучают распространение засоленных и переувлажненных почв.

Космические снимки позволяют изучать растительный покров, продуктивность биомассы, оценивать качество посевов, намечать комплекс лесотаксационных работ, выявлять поражение растений вредителями по изменению коэффициента отражения в узкой спектральной зоне. Ландшафтоведы имеют возможность в глобальном и локальном масштабах определять территориальную структуру ландшафта.

Значительный эффект достигнут при использовании космических снимков для решения сельскохозяйственных задач. По снимкам возможно определить состояние почв и культур, наметить более правильное направление землепользования, план агротехнических мероприятий, составить карты сельскохозяйственных угодий и культур, определить производственную направленность хозяйств.

При изучении населенных пунктов по снимкам из космоса определяются границы городов, ведут проектирование градостроительных работ.

Космические снимки с пилотируемых кораблей имеют большое производственное значение. Так, по снимкам с пилотируемого космического корабля (ПКК) «Союз» и станций «Салют» выполнен большой объем исследований геологами, картогра-



Рис. 1.

фами, геоморфологами, специалистами других направлений. Доказана перспективность космических методов изучения Земли методами индикации в видимой и инфракрасной зонах спектра. На рис. 1 показаны основные области применения материалов космических съемок земной поверхности.

§ 2. ОБЩИЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Космические летательные аппараты предназначены для решения широкого круга задач, связанных с исследованием и освоением космического пространства. Это привело к созданию

большого количества разнообразных разнотипных аппаратов. Их классификация по тем или иным признакам упрощает формирование технических требований, описание аппаратов и их изучение. Космические летательные аппараты классифицируют по конструктивным признакам, назначению, способу управления, наличию или отсутствию на них экипажа, по габаритам и массе аппаратов, по траекториям полета и т. д. Все космические летательные аппараты в крупном плане можно подразделить на искусственные спутники Земли без экипажа, космические пилотируемые корабли с экипажем и межпланетные автоматические станции и спутники. По назначению выделяют научно-исследовательские аппараты для изучения верхних слоев атмосферы, физических явлений в околоземном и межпланетном пространстве, природных ресурсов Земли и других планет, аппараты прикладного назначения. По наличию экипажа космические летательные аппараты подразделяют на пилотируемые, беспилотные и корабли со сменным экипажем. По массе выделяют легкие аппараты (до 300 кг), средние (до 2000 кг), тяжелые (до 7000 кг) и сверхтяжелые (более 7000 кг). По возможности возвращения на Землю КЛА подразделяют на возвращаемые, невозвращаемые и частично возвращаемые (капсулы). По виду связи с наземными средствами обеспечения КЛА могут быть без связи, с односторонней связью: Земля — КЛА или КЛА — Земля, с двусторонней связью: Земля — КЛА — Земля. По ориентации КЛА подразделяют на неориентируемые и ориентируемые, с наличием системы ориентации и стабилизации.

В зависимости от траектории полета КЛА классифицируют на аппараты, выполняющие полет к Луне, и аппараты, выполняющие полет к другим планетам Солнечной системы. Конструкция космического аппарата должна обеспечивать его функционирование в условиях непрерывного и длительного влияния специфических условий космического пространства. Элементы конструкции космического аппарата представляют собой несущий каркас из нескольких соединенных между собой силовых ферм, нескольких герметизированных оболочек — отсеков и системы бортового оборудования, размещенной как внутри, так и снаружи отсеков КЛА. Оптимальность объединения всех элементов конструкции в единый агрегат определяется на основе компоновочных расчетов. При этом форма космического аппарата по условиям запуска должна быть оптимальна, масса при заданной надежности должна быть минимальна, на ракету-носитель должны действовать минимальные нагрузки, распределение аппаратуры, систем управления, других агрегатов должно быть оптимально и обеспечивать доступ к ним и возможность замены блоков, динамические нагрузки и неравномерность распределения масс в полете на системы ориентации и стабилизации должны оказывать минимальное влия-

ние, вибрации на КЛА должны быть минимальны, стоимость должна быть приемлема, а дефицитные материалы должны отсутствовать.

Конструкции КЛА делят на компактные, разворачиваемые и надувные.

Форма компактных конструкций при приведении КЛА в рабочее состояние не изменяется и перемещения отдельных элементов конструкции не производится. Эти конструкции надежны в эксплуатации, но малые габариты не позволяют разместить необходимое количество источников энергоснабжения. В разворачиваемых конструкциях КЛА в момент его вывода на орбиту выдвижные или складные элементы занимают рабочее положение. Преимущество этой конструкции в простоте решения габаритных ограничений и более широких возможностях конструктивной компоновки.

На системы ориентации и стабилизации этих КЛА действуют большие моменты из-за увеличения массы несущих конструкций. Космические аппараты типа «Метеор», «Салют», «Союз» и другие относятся к такому типу конструкций. Разворачивающимися элементами у них являются панели солнечных батарей и некоторые другие панели.

Надувные конструкции КЛА имеют многослойные оболочки, которые принимают заданную форму после надува и отвердевают после вывода на орбиту. Это позволяет разворачивать в космосе оболочки больших размеров. Но при длительной эксплуатации происходит диффузия газа через оболочки, утечка через пробойны, что не обеспечивает необходимой надежности конструкций.

Космические летательные аппараты, предназначенные для полета по геоцентрической орбите, получили название искусственных спутников Земли (ИСЗ). Для осуществления обширной программы космических исследований, решения ряда прикладных и научных задач созданы разные типы искусственных спутников Земли: исследовательские, геодезические, связные, метеорологические, навигационные и т. д.

Следует также выделить искусственные спутники Земли, управляемые космонавтом. Они получили название космических летательных аппаратов (КЛА), космических пилотируемых кораблей или орбитальных пилотируемых станций (ОПС). Для движения космического летательного аппарата по геоцентрической орбите ему должна быть сообщена скорость, равная или немного бо́льшая первой космической скорости. Период обращения определяется высотой полета и может составлять от полутора часов до нескольких суток.

Запуск космических летательных аппаратов производится с космодрома.

На рис. 2 показана ракета-носитель с космическим кораблем «Союз» на старте космодрома.

Для определения координат и уточнения параметров орбиты космического летательного аппарата вдоль трассы его полета расположен ряд измерительных пунктов (ИП).

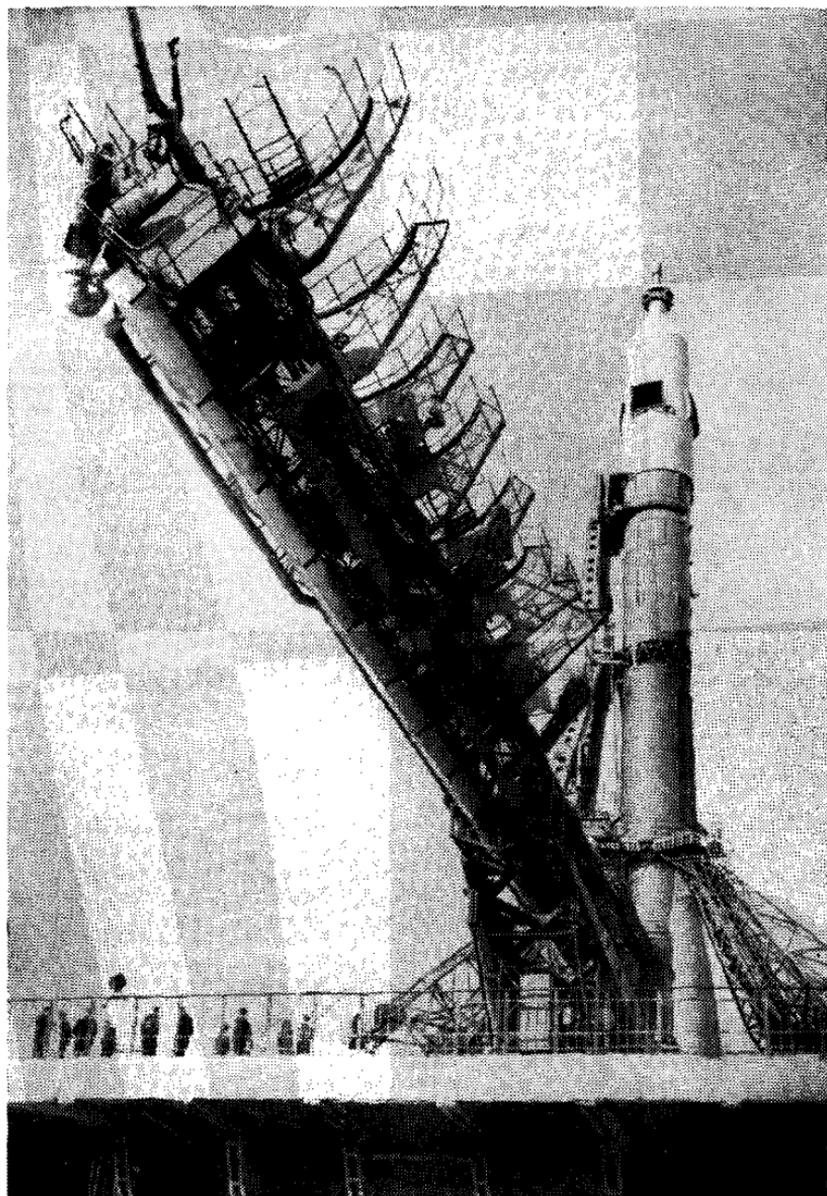


Рис. 2.

Вывод КЛА на расчетную траекторию полета осуществляется с помощью многоступенчатой ракеты-носителя. Подъемная сила при реактивном принципе полета ракеты создается под

действием струи газа, вытекаемого из камеры сгорания через специальные сопла.

Для выполнения космической фотосъемки в заданной точке орбиты производится ориентация КЛА с помощью систем ориентации и системы управления. Этим системам присущи определенные особенности, связанные с условием полета в космическом пространстве, полным или частичным отсутствием атмосферы, большой продолжительностью полета КЛА. В качестве управляющих устройств применяют специальные реактивные двигатели, двигатели-маховики и другие устройства.

Во время полета КЛА осуществляется управление движением центра масс (маневрирование) и управление движением вокруг центра масс.

Блок-схему управления КЛА можно представить как замкнутую систему, которая включает:

- объект управления (КЛА);
- измерительные устройства, информирующие о параметрах движения;
- усилительно-преобразующие устройства, формирующие закон управления движением КЛА;
- управляющие устройства, обеспечивающие полет по заданной орбите.

§ 3. КОСМИЧЕСКИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ «СОЮЗ»

Космические аппараты могут иметь конструкцию сложных форм. Сложные типы КА имеют даже составные конструкции, в которые входят несколько автономных отсеков. В качестве примера рассмотрим конструкцию космического корабля типа «Союз», схематический чертеж которого приведен на рис. 3.

«Союз» состоит из трех частей: спускаемого аппарата 5, орбитального 2 и приборно-агрегатного 4 отсеков. Стартовая масса — 6,8 т, длина — 7,5 м, размах панелей солнечных батарей — 8,4 м. Если корабль поставить вертикально на узлы стыковки с ракетой-носителем, тогда в верхней части размещается орбитальный отсек, соединенный со спускаемым аппаратом, а спускаемый аппарат, в свою очередь, через лобовой теплозащитный экран состыкован с приборно-агрегатным отсеком, на котором установлены панели солнечных батарей 3.

Спускаемый аппарат предназначен для размещения экипажа на участке выведения корабля на орбиту, для управления им в полете, а также во время управляемого спуска и приземления. Он представляет собой герметичный отсек с двумя боковыми обзорными и одним специальным иллюминаторами. На последнем установлен оптический визир-ориентатор. Корпус спускаемого аппарата выполнен в основном из алюминиевого сплава, снаружи покрыт теплозащитным слоем, а внутри —

теплоизоляцией в сочетании с декоративной обшивкой. В верхней части отсека расположен лаз-люк с герметизируемой крышкой.

В спускаемом аппарате размещены пульт космонавтов, ручки управления кораблем, приборы и оборудование основных и вспомогательных систем, контейнеры для возвращаемой научной аппаратуры и резервный запас для экипажа. Масса аппарата — 2,8 т.

Форма спускаемого аппарата сложная полуовальная, благодаря чему аппарат приобретает аэродинамическую подъемную

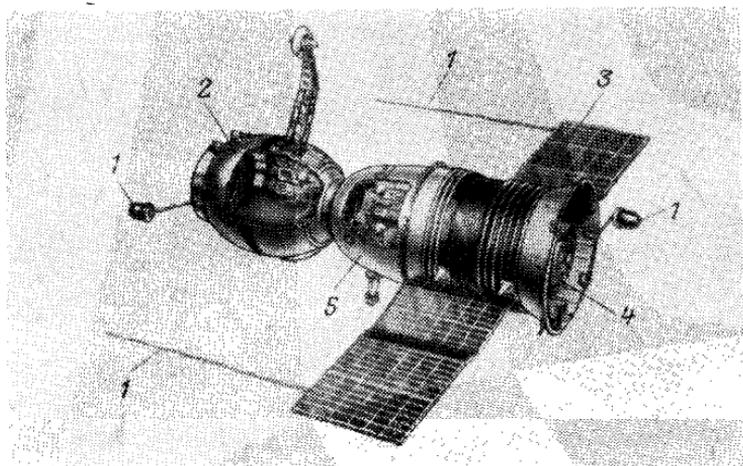


Рис. 3.

силу (аэродинамическое качество). На нем установлены реактивные двигатели малой тяги системы управления спуском.

Система приземления парашютно-реактивная, состоящая из комплекса парашютов и пороховых двигателей. Парашюты обеспечивают торможение спускаемого аппарата и его снижение с вертикальной скоростью около 10 м/с, а пороховые двигатели мягкой посадки тормозят аппарат непосредственно перед касанием с поверхностью Земли, смягчая удар в момент посадки.

На космическом аппарате размещена также система его спасения в случае аварии ракеты-носителя на старте и участке вывода корабля на орбиту. Она состоит из комплекса мощных пороховых двигателей, установленных на головном обтекателе корабля. При аварии ракеты на старте эти двигатели включаются и поднимают переднюю часть головного обтекателя и аппарата на безопасную высоту, необходимую для ввода в дей-

ствии парашюта. При аварии на участке выведения пороховые двигатели обеспечивают преодоление аэродинамических сил и удаляют спускаемый аппарат на безопасное от ракеты-носителя расстояние.

В дальнейшем срабатывают парашютная система и двигатели мягкой посадки.

Орбитальный отсек предназначен для проведения научных экспериментов, обеспечения перехода экипажа из корабля в корабль и для отдыха космонавтов. Сверху на отсеке установлен агрегат стыковки с внутренним люком-лазом. В орбитальном отсеке имеется два обзорных иллюминатора.

В нижней части отсека находится люк, ведущий в спускаемый аппарат, а также боковой люк, через который космонавты входят в корабль на стартовой площадке. Здесь же расположены пульт управления и оборудование основных и вспомогательных подсистем отсека. Снаружи отсека установлены телекамеры внешнего обзора, антенны систем радиосвязи и телевидения. Общая масса орбитального отсека — 1,3 т.

В приборно-агрегатном отсеке размещены основная аппаратура, оборудование и подсистемы обеспечения орбитального полета. Этот отсек состоит из переходной, приборной и агрегатной секций, изготовленных из алюминиевого сплава.

В переходной секции установлены десять двигателей причаливания и ориентации, топливные баки, подсистема подачи топлива в камеры сгорания. Снаружи этой секции размещены: малый радиатор-излучатель подсистемы терморегулирования, верхние узлы крепления панелей солнечных батарей, антенны командной радиолинии. В герметичной приборной секции, имеющей форму низкого цилиндра, размещены приборы подсистемы ориентации и управления движением корабля, подсистемы управления бортовым комплексом аппаратуры и оборудования, аппаратуры радиосвязи с Землей, программно-временное устройство, блоки телеметрии, приборы и блоки подсистемы единого электропитания. С наружной стороны приборной секции установлен датчик построения инфракрасной вертикали на Землю и датчик ориентации на Солнце.

Агрегатная секция выполнена в форме цилиндрической оболочки переходящей в коническую, снаружи секции установлены большой радиатор-излучатель системы терморегулирования, четыре двигателя причаливания и ориентации, нижние узлы крепления панелей солнечных батарей, восемь двигателей ориентации. Внутри секции размещена сближающе-корректирующая двигательная установка, состоящая из основного и дублирующего реактивных двигателей, топливных баков, подсистемы подачи топлива. Здесь же установлены узлы крепления антенн радиосвязи, радиотелеметрии, размещены ионные датчики системы ориентации и электрохимические батареи подсистемы единого электропитания корабля.

Солнечные батареи в виде двух «крыльев», каждое из которых состоит из трех раскрываемых створок, установлены на приборно-агрегатном отсеке. На концевых створках установлены антенны 1 радиосвязи ультракоротковолнового и коротковолнового диапазона и телеметрии. Масса приборно-агрегатного отсека — 2,7 т, включая 0,5 т топлива.

Космическая ракета-носитель, с помощью которой обеспечивался вывод «Союза» на околоземную орбиту, имеет три ступени. Первая ступень состоит из четырех боковых блоков длиной 19 м и диаметром в концевой части до трех метров. Каждый блок оснащен четырехкамерным двигателем, развивающим в пустоте тягу 102 т. Кроме того, на каждом блоке имеется по две дополнительные рулевые камеры. Вторая ступень представляет собой центральный блок длиной около 28 м с максимальным диаметром 2,95 м. Блок оснащен четырехкамерным двигателем (с четырьмя дополнительными рулевыми камерами), развивающим тягу в пустоте 96 т. Третья ступень — блок длиной 8 м и диаметром 2,6 м, он также оснащен четырехкамерным двигателем (с дополнительными рулевыми соплами).

Вся совокупность ступеней ракеты-носителя и космического корабля «Союз» имеет стартовую массу 300 т.

При старте ракеты-носителя двигатели первой и второй ступеней запускаются одновременно, вторая ступень продолжает работу после отделения четырех боковых блоков. Третья ступень запускается в конце работы второй ступени и выводит «Союз» на заданную орбиту, после чего отделяется. Общая длина ракеты-носителя с космическим кораблем под головным обтекателем — 49,3 м. Максимальный диаметр по стабилизаторам равен 10,3 м.

Космические съемки с КЛА «Союз» выполнялись всеми экипажами, стартовавшими в космос. Научно-производственное значение имели космические съемки, выполненные при полете «Союза-9» экипажем летчиков-космонавтов А. Г. Николаевым и В. И. Севастьяновым, доставившими на Землю более тысячи черно-белых, цветных и спектральных снимков различных масштабов. Это подчеркивает хорошие возможности проведения фотографических экспериментов с КЛА «Союз».

§ 4. ОРБИТАЛЬНАЯ ПИЛОТИРУЕМАЯ СТАНЦИЯ «САЛЮТ»

Создание орбитальных пилотируемых станций (ОПС) со сменными экипажами позволяет решать ряд важнейших задач освоения космоса и других планет. Основные задачи полета станции — испытание конструкции отдельных элементов и бортовых систем, маневрирование станции на орбите с целью длительного существования и создание наиболее благоприятных условий для стыковки с пилотируемыми кораблями «Союз», отработка методов и средств ориентации и навигации станции.

Во время полета осуществляется широкий комплекс медико-биологических исследований для определения возможностей человеческого организма при длительном полете, проведение научных фотографических экспериментов для изучения природных ресурсов Земли, проведение ряда научных, прикладных и технических экспериментов. Орбитальная пилотируемая станция выводится на орбиту многоступенчатой ракетой-носителем. После отделения последней ступени ракеты-носителя станция начинает свой полет по орбите вокруг Земли, на высотах от 200 до 250 км.

Станция «Салют» состоит из трех основных отсеков: переходного 2, рабочего 4 и агрегатного 5 (рис. 4). Переходной от-

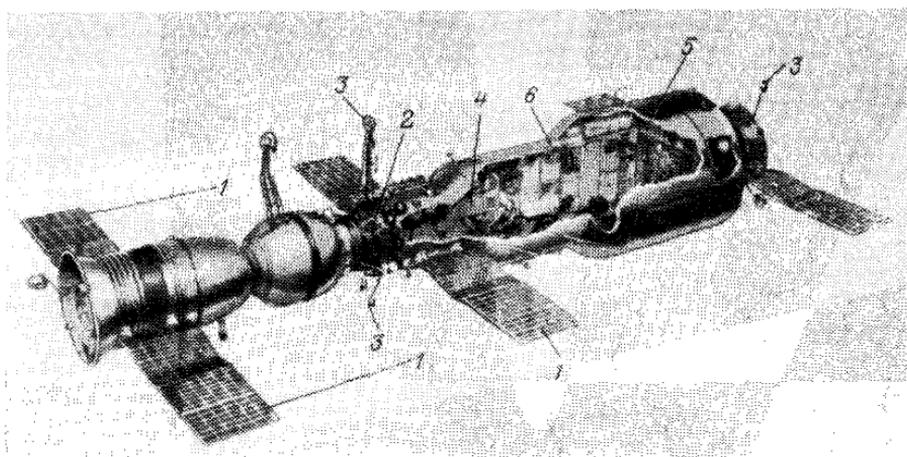


Рис. 4.

сек — одно из жилых помещений станции, он предназначен также для проведения научных наблюдений и экспериментов. Стыковочный узел, входящий в конструкцию отсека, позволяет производить многократную стыковку и расстыковку станции с пилотируемыми кораблями, прибывающими на орбиту с Земли. Переход космонавтов и перенос грузов осуществляется через внутренний люк-лаз. Отсек оборудован иллюминаторами, в нем установлена система терморегулирования, жизнеобеспечения, научная аппаратура, фотоаппаратура 6, пульты управления. На корпусе отсека установлены две панели солнечных батарей 1, антенны 3 систем поиска и наведения, световые индексы, включаемые при сближении и стыковке корабля, телекамера внешнего обзора, датчики ионной ориентации, агрегаты системы терморегулирования, шаровые баллоны с запасом сжатых газов, звездный телескоп «Орион», датчики метеороидов. Отсек имеет шесть иллюминаторов для работы с телескопом,

проведения космических съемок, визуальных наблюдений, спектрофотографирования.

Рабочий отсек посредством герметически закрывающегося люка связан с переходным отсеком. Рабочий отсек — основное жилое помещение станции, он расположен в средней части станции и является основным местом работы и отдыха космонавта. В головной части отсека установлены приборы и агрегаты системы управления, пульта, приборные доски, командно-сигнальные устройства и рабочие кресла космонавтов. В середине отсека оборудованы рабочие места для проведения астрофизических исследований, изучения космической среды вблизи станции и проведения научных экспериментов. По бокам отсека расположено бортовое оборудование, регенерационные установки, поглотители углекислоты. Здесь проводится ряд медико-биологических исследований, работа с навигационной аппаратурой. Спальные места космонавтов оборудованы элементами, позволяющими слящему зафиксироваться в удобной позе. В конце отсека расположено основное бортовое оборудование, обеспечивающее функционирование станции. В рабочем отсеке в общей сложности имеется около двадцати иллюминаторов для работы с приборами ориентации и навигации, фотографирования и визуальных наблюдений. Жилые помещения станции герметизированы, в них поддерживается газовый состав, подобный атмосферному у Земли, а также необходимая температура и влажность. Станция оборудована системами жизнеобеспечения, контейнерами с питьевой водой, холодильниками с пищей, необходимой мебелью, имеются места для физических упражнений. Станция представляет собой лабораторию, оборудованную для длительной работы в космосе. На станции много научно-исследовательской аппаратуры, работающей как в автоматическом режиме, так и по командам космонавтов, которые включают и выключают ее в соответствии с программой. За рабочим отсеком располагается негерметичный агрегатный отсек. В нем установлены двигательные установки, корректирующая двигательная установка, отсек двигателей ориентации, защитные экраны двигательной установки, система исполнительных органов. Отсек двигательных установок соединяет в единое целое агрегаты системы исполнительных органов и корректирующей установки. Здесь размещаются топливные баки систем исполнительных органов, телекамера внешнего обзора, шары-баллоны наддува, панели солнечных батарей и другое оборудование.

Установленные в отсеке микродвигатели изменяют ориентацию корабля по углу тангажа, крена и рыскания. Бортовая аппаратура питается от единой энергетической системы, включающей в себя солнечные батареи и химические источники тока. Площадь панелей с солнечными элементами равна 42 м². Космонавты на борт станции «Салют» доставляются с помощью

транспортного корабля «Союз». После причаливания корабля происходит их жесткая стыковка и соединение электрических и гидравлических коммуникаций.

Между станциями и транспортным кораблем образуется герметизированный туннель, позволяющий космонавтам перейти на борт орбитальной станции. Орбитальный комплекс «Союз» — «Салют» обеспечивает высокую работоспособность космонавтов в течение длительного времени и выполнение большого комплекса научно-технических исследований. Масса станции «Салют» без корабля 18 900 кг, масса системы «Салют» — «Союз» — свыше 25 т, длина системы 21,4 м, максимальный диаметр отсека 4,15 м, объем герметичных отсеков 100 м³, площадь солнечных батарей 42 м².

Космические съемки, выполненные со станции «Салют-1», позволили разработать методику и создать гипсометрические карты на отдельные районы страны. При полете станции «Салют-3» получены разные фотоснимки по спектральным характеристикам, масштабам, времени съемки. Зафиксированы уникальные явления природы, получен ценный материал для исследования природных ресурсов.

На станции «Салют-4» впервые применен метод многокамерной (многозональной) съемки, позволивший разработать рекомендации и внедрить для целей тематического дешифрирования космические снимки в разных зонах спектра. При полете станции «Салют-5» экипажами получены плановые и перспективные космические снимки на разные районы страны, акватории Мирового океана на цветные, черно-белые и спектрзональные пленки.

Многозональная съемка камерой МКФ-6 со станции «Салют-6», разработанной советскими специалистами и специалистами Германской Демократической Республики, позволила провести комплексное дешифрирование по снимкам, полученным в узких зонах спектра.

§ 5. ОРБИТАЛЬНАЯ СТАНЦИЯ «СКАЙЛЭБ» (США)

В Соединенных Штатах Америки принципы создания орбитальной лаборатории разрабатывались применительно к использованию станций для решения комплексных научных и технических задач, которых было намечено при разработке программ более 50. Сюда относятся научные эксперименты по составлению карты галактического рентгеновского излучения, фотографическая съемка Земли в широком спектральном диапазоне, исследования в области лесного и сельского хозяйства, астрономические исследования в диапазоне рентгеновских длин волн, исследование зодиального света, фотографирование облачного покрова Земли, технические эксперименты по исследованию влияния на механику полета корабля перемещений

экипажа, определение эрозии корабля, интенсивность ударов метеоритных частиц, оптические определения траектории полета, картографические измерения, изучение солнечного излучения и др. Станция обеспечивает возможность проведения инженерных и медицинских экспериментальных исследований, астрономических исследований с помощью орбитального телескопа. Научная орбитальная станция «Скайлэб» («небесная лаборатория») была выведена на орбиту с космодрома США, расположенного на м. Кеннеди во Флориде, с помощью мощной ракеты «Сатурн-5». Высота ракеты более 100 м, масса более 3000 т. В головной части ракеты установлена орбитальная пилотируемая станция. После отделения ракеты-носителя орбитальная станция совершает полет по орбите вокруг Земли. Конструктивно станция оформлена в виде нескольких отсеков. Основная часть станции — орбитальная лаборатория — состоит из двух отсеков, предназначенных для научной работы и жилья космонавтов. Жилой отсек дополнительно разделен перегородками на несколько комнаток для отдыха, питания, занятий спортом и т. д. В соединительном туннеле диаметром 165 см, разделенном двумя перегородками со шлюзовыми люками, установлена система поддержания давления воздуха. Через этот переходной отсек прибывшие космонавты попадают на станцию. В отсеке обеспечена возможность выхода космонавта в открытый космос. В переходном отсеке могут находиться одновременно два космонавта в скафандрах с портативными системами жизнеобеспечения. Стыковочный отсек орбитальной станции предназначен для причаливания транспортных пилотируемых и автоматических кораблей, для чего имеется два стыковочных узла, один в торце шлюзового отсека, второй сбоку и узел для стыковки орбитального телескопа. На станции установлены системы управления терморегулирования, солнечной батареи, системы жизнеобеспечения, комплекс радиотехнической, медицинской и научной аппаратуры, противометеоритная стенка, орбитальный телескоп. В комплект оборудования орбитальной станции входит также система сигнализации о возникновении опасных ситуаций и устройство для экстренной эвакуации космонавтов в случае опасности. Орбитальный телескоп состоит из восьми отдельных телескопов, соединенных в одну связку и ориентированных в одну сторону. Транспортировка экипажа орбитальной станции производится с помощью космического корабля «Аполлон», состоящего из командного и двигательного отсеков. Через соединительный туннель, далее через воздушный шлюз космонавты попадают на станцию. Перед их переходом в орбитальный отсек производится полная вентиляция контейнера, после чего космонавты начинают работы по оборудованию ракетной ступени в орбитальную станцию. Система терморегулирования поддерживает температуру от 15 до 32 °С. Всего для размещения оборудования и других запасов внутри орбиталь-

ной станции имеется полезный объем порядка 50 м³. Длина комплекса «СкайЛэб» — «Аполлон» — 36 м, наибольший диаметр — 7 м, масса свыше 80 т.

§ 6. МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ СПУТНИКИ

В современной метеорологии широкое применение нашли наблюдения, получаемые с искусственных спутников Земли. Данные об атмосфере, радиационных потоках, пронизывающих воздушный океан Земли, действие «тепловой машины», приводящей в движение атмосферу, изучение глобальных атмосферных процессов, составление прогноза погоды — необходимая для этих задач информация поступает с метеорологических спутников. Спутник «Метеор», например, снабжен аппаратурой, обеспечивающей космическую фотосъемку облачного покрова, поверхности Земли, акватории Мирового океана в видимой и инфракрасной областях спектра. Одновременно производится измерение радиационных потоков в разных участках спектра. Эта система практически обеспечивает получение данных в глобальном масштабе, необходимых для решения основных задач службы погоды.

На основании полученных данных уточняют синоптические карты, составляют прогноз погоды на 1—3 суток вперед. Особенно ценной является информация, полученная над территорией с редкой сетью метеорологических станций, над полярными районами в целях ледовой разведки. Рентабельность использования метеорологических спутников подтверждена во многих отраслях народного хозяйства.

Так, по оценке Совета экономических экспертов (США), при составлении надежных прогнозов на пять суток вперед ежегодный экономический эффект составит 5720 млн. долларов со следующим распределением по различным отраслям хозяйства:

1. Водное хозяйство	— 2500 млн. долларов
2. Сельское хозяйство	— 3000 » »
3. Наземный транспорт	— 100 » »
4. Розничная торговля	— 75 » »
5. Лесная промышленность	— 45 » »

Подсчитано, что запуск метеорологического спутника обходится только в 3 млн. долларов.

По далеко не полным данным прогнозы, составленные гидрометеослужбой СССР с широким применением материалов космической съемки, позволяют сохранить материальные ценности на сумму 500—700 млн. руб. Особенно эффективна эксплуатация метеорологических спутников в районах, подверженных ураганам, тропическим циклонам, штормам, тропическим бурям, наводнениям.

В состав метеорологической космической системы (МКС), созданной в СССР и США, входят метеорологические спутники Земли (МСЗ), автономные пункты приема спутниковой информации, наземные метеорологические пункты.

Метеорологический спутник оборудован сложной электронной аппаратурой наблюдения, запоминания и передачи. Аппаратура расположена в приборном отсеке и включает телевизионные, инфракрасные и актинометрические устройства. На рис. 5 показан общий вид метеорологического спутника системы «Метеор». После вывода метеорологического спутника на орбиту включается система стабилизации и ориентации. Она предназначена для того, чтобы спутник совершал полет со строго определенной ориентацией осей. Если эта система будет отсутствовать, то спутник будет совершать вращательные движения, находиться в режиме «закрутки» или «кувыркания». Это вызывается действием аэродинамических, гравитационных, магнитных, радиационных сил. Восстановление первоначального положения, нарушенного вследствие этих сил, называется стабилизацией спутника, система его ориентации совмещает систему координат, связанную с корпусом метеорологического спутника Земли или прибором, установленным на борту спутника, с внешней системой координат. Методы стабилизации делятся на активные и пассивные. При активных методах стабилизации для создания управляющих моментов на борту имеется источник энергии, т. е. стабилизация углового положения МСЗ производится различными системами.

Широко используется стабилизация с помощью двигателей-маховиков, которые устанавливались на метеорологических спутниках серии «Космос». Применялись три электродвигателя-маховика, расположенных по трем взаимно перпендикулярным осям вращения. Поворот спутника происходит тогда, когда осуществляется вращение маховика электромотором, причем вращение спутника вокруг оси маховика происходит в противоположном направлении со скоростью, обратно пропорциональной отношению масс маховика и спутника. Для начального успокоения и гашения кинетического момента, возникающего в процессе орбитального полета, имеются электромагниты, которые взаимодействуют с магнитным полем Земли. Система ориентации включает также датчик инфракрасного горизонта, который реагирует на отклонение вертикальной оси спутника от направления инфракрасной вертикали. Чувствительным элементом системы ориентации является также датчик курса, который определяет отклонение продольной оси объекта от направления вектора скорости. К активным методам относится импульсная система стабилизации с реактивными двигателями, направленная действий которых взаимно перпендикулярны. Пассивные методы стабилизации не требуют бортового источника энергии для создания управляющих моментов. Для стабилизации

спутнику придают вращение вдоль оси симметрии. Благодаря гироскопическому эффекту ось спутника будет стараться сохранить свое заданное относительно звезд положение, несмотря на возникающие возмущения.

Если спутник имеет вытянутую форму, то он стремится повернуться вокруг своего центра масс таким образом, чтобы его ось была вертикальна. Менее удаленный конец спутника притягивается сильнее, чем более удаленный. Для того чтобы форма спутника была вытянутой, его снабжают складной штан-

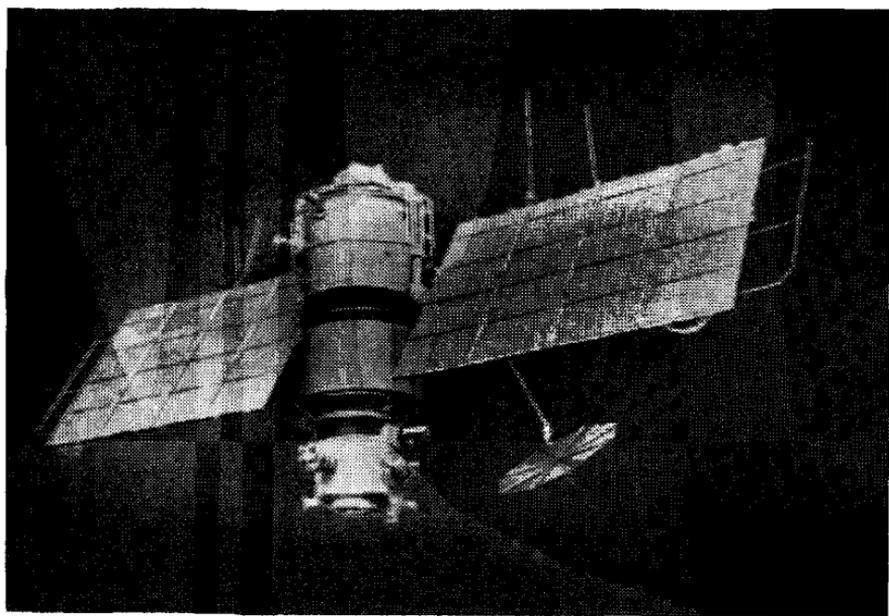


Рис. 5.

гой в несколько десятков метров, которая после вывода спутника на орбиту разворачивается вдоль оси, проходящей через центр масс Земли и спутника. Известен также аэродинамический метод пассивной стабилизации, когда продольная ось спутника ориентируется вдоль направления полета. В хвостовой части спутника устанавливают стабилизатор, создающий большую «парусность», чем сам спутник, а стабилизация по крену достигается с помощью двух гироскопов.

Существует также комбинированный метод, когда используются две автономные системы для отдельной ориентации корпуса спутника и солнечных батарей. В этом случае нет необходимости вмешательства наземного комплекса для коррекции орбиты.

Заданный режим ориентации выдерживается с большой точностью (до 1°). Ось Z корпуса в режиме стабилизированного полета всегда направлена на Землю по местной инфракрасной вертикали. Ось X направлена по заданному курсу-вектору скорости, ось Y перпендикулярна к плоскости орбиты. Точная и стабильная ориентация спутника является одним из основных условий производства космических съемок с метеорологических спутников.

Система ориентации спутника имеет датчики грубой и точной ориентации. Датчики грубой ориентации по Солнцу имеют широкие углы зрения для первоначального поиска и захвата Солнца, датчики точной ориентации имеют узкие углы зрения и позволяют осуществлять ориентацию по Солнцу с высокой точностью, достигающей 1° .

Система электроснабжения всех основных и вспомогательных устройств спутника обладает целым рядом особенностей. Она должна быть автономна, надежна, работать в течение длительного срока в условиях переменной нагрузки и т. п. На метеорологических спутниках применяют две группы источников питания: химические и солнечные батареи.

Химические батареи рассчитаны на длительный срок полета. Они представляют герметичные кадмиево-никелевые, серебряно-цинковые или серебряно-кадмиевые аккумуляторы. В режиме работы происходит поглощение активными веществами выделяющихся газов. В конце заряда аккумуляторов происходит сильный разогрев, термостатическое реле обеспечивает выключение зарядного тока при достижении аккумуляторами определенной температуры. Такие типы химических батарей применялись на спутниках «ЭССА», «Нимбус» и др. На большинстве метеорологических спутников основным источником электропитания являются солнечные батареи. Солнечная энергия преобразуется в электрическую за счет фотоэлектрического эффекта. Солнечные батареи изготавливают в виде плоских панелей, причем материалом является монокристаллический полупроводниковый кремний с проводимостью типа n , который для создания ($p-n$)-перехода легируется бором. Для увеличения выходной мощности батарей применяют концентраторы солнечной энергии и рефлекторы. Солнечные батареи метеорологических спутников «Космос», «Метеор», «Нимбус» имеют автономную систему ориентации на Солнце.

К метеорологическим спутникам, предназначенным для исследования глобальных атмосферных процессов и решения других задач, предъявляют серьезные требования по обеспечению точной ориентации и стабилизации положения осей спутника в пространстве, обеспечения энергопитания для всех систем спутника и бортовой аппаратуры, обеспечение внутри контейнера нормальных климатических условий для работы всей аппаратуры, обеспечение автоматического управления бортовыми

системам и комплексом научной аппаратуры, обеспечение фиксации результатов наблюдений и запоминание сведений о функционировании бортовой аппаратуры, передача результатов космической съемки и другой информации на Землю, обеспечение привязки научной и служебной информации к системе единого времени.

В 1967 году на орбиту был выведен метеорологический спутник «Космос-156», с момента запуска которого начала работать экспериментальная метеорологическая космическая система (МКС). Ее создание имеет важное значение для проведения регулярных космических съемок в целях изучения метеорологических процессов в масштабе всей планеты и получения регулярной информации, необходимой для оперативной работы всех служб погоды. Метеорологическая космическая система «Метеор» включает спутники, выведенные на круговые орбиты, близкие к полярным, проходящие на высотах 625—630 км, с углом наклона 81,2°. Расположение спутников позволяет вести наблюдения за погодой над каждым районом Земли с интервалом в 6 ч. В течение суток метеорологическая система обеспечивает информацию с половины земного шара. В состав системы «Метеор» входят также наземные пункты приема и предварительной обработки космической информации, службы управления и центр комплексной обработки метеоданных. На рис. 6 показана схема наземного комплекса приема и обработки информации со спутников метеорологической космической системы «Метеор». Для того чтобы материалы космической съемки и других наблюдений со спутника не устаревали, весь поток информации должен быть собран, обработан и распространен в минимально короткие сроки. Пункты приема информации обеспечивают прием и обработку информации, поступившей по телевизионному и телеметрическому радиоканалам, осуществляют прием сигналов точного времени и ретрансляцию в соответствующие гидрометеоцентры информации в темпе ее поступления со спутников.

Дальнейшее совершенствование систем и приборов позволило создать спутники серии «Метеор», на борту которых используются малокадровые телевизионные камеры для съемки облачности земной поверхности, ледяного и снежного покровов; инфракрасная радиометрическая аппаратура для съемки облаков и подстилающей поверхности, как на освещенной, так и неосвещенной сторонах Земли; актинометрическая система для регистрации отраженной солнечной радиации; спектрометрическая аппаратура для определения вертикального профиля температуры в атмосфере.

На спутниках «Метеор» применены стационарные двигатели. Для стабилизации спутника применяют корректирующие двигатели, использующие энергию Солнца и создающие тягу за счет плазмы, разгоняемой в электромагнитных полях.

Орбиты спутников «Метеор» имеют среднюю высоту 630 км, последующие спутники запущены на орбиты с высотой 900 км, что обеспечило расширение полосы съемки и наблюдений для всех видов аппаратуры, установленной на спутниках.

Для проведения исследований, связанных с получением регулярной информации о состоянии облачности и радиационных

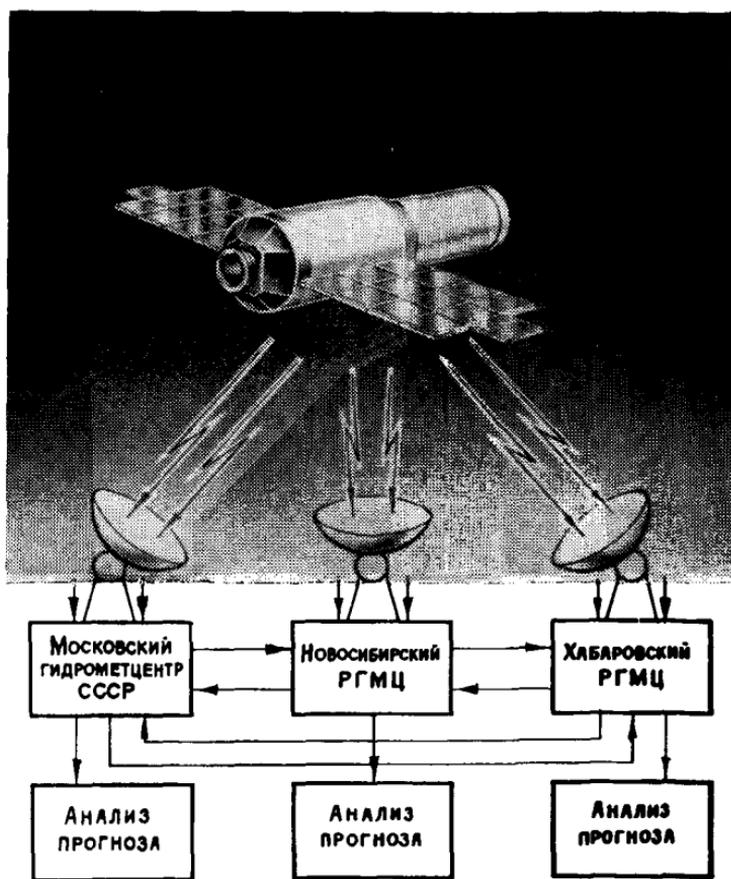


Рис. 6.

составляющих в глобальном масштабе, в США была создана на базе спутников «Тайрос» метеорологическая космическая система «ТОС». Со спутников «Тайрос» производится космическая телевизионная съемка с автоматической передачей изображения в виде сигналов на наземные станции. Кроме того, со спутников этой серии проводится измерение теплового излучения, передача телеметрических данных; бортовое оборудование позволяет регистрировать сигналы радиомаяков, осуществлять пространственную ориентацию и динамическое управление, программировать работу всей аппаратуры. Более совершенными являются спутники серии «ЭССА», которые вхо-

дят в состав метеорологической космической системы «ТОС». Спутник имеет форму восемнадцатигранной призмы. Внешний диаметр 105 см, высота 57 см, масса спутника от 130 до 147 кг.

Спутники запускаются на почти круговые орбиты, с высотой 1400 км, срок службы спутника — 7—10 месяцев. При выводе спутника на орбиту ось вращения спутника ориентируется перпендикулярно к плоскости орбиты, и движение спутника становится подобно качению колеса вдоль орбиты. Этим достигается то, что одна из двух съемочных телевизионных камер, расположенных под углом 26° к вертикали, будет всегда снимать земную поверхность. Аппаратура спутника включает две телевизионные камеры с автоматической передачей изображения или две телевизионные камеры на усовершенствованных видиконах, на борту имеется система стабилизации и ориентации на орбите, программное устройство, приборы для измерения теплового баланса Земли.

На спутниках серии «ЭССА» установлены космические съемочные телевизионные камеры с автоматической передачей снимков. Камеры имеют широкоугольные объективы с углом поля зрения 108° . Разрешающая способность при 800 строках разложения позволяет различить детали на местности 2,8 км в центре и 8,4 км по краям. Телевизионное изображение с фотокатода видикона считывается в режиме автоматической передачи снимков. При установке камер усовершенствованными видиконами одна камера является основной, рабочей, вторая запасной. В комплект съемочной телевизионной аппаратуры с усовершенствованными видиконами входят 2 камеры, записывающее устройство на магнитную ленту, телевизионный передатчик, работающий на частоте 235 мГц; мощность излучения 5 Вт. Съемка выполняется в двух режимах: с непосредственной передачей изображения в реальном масштабе времени или записи изображения на магнитную ленту и передачи его по команде с Земли. С интервалом 200 с видикон обеспечивает получение 12 телевизионных изображений, общее количество снимков всего земного шара будет 144. На магнитную ленту можно записать 36 телевизионных изображений со скоростью 75 см/с. На борту устанавливаются также радиометр для измерения отраженной энергии. Прием информации на Земле происходит два раза в сутки, причем за один оборот спутника информация составляет 13 260 знаков.

Взамен выбывающих после срока службы спутников «ЭССА» на орбиту выводят более усовершенствованные спутники «НОАА», которые имеют квазиполярные, близкие к круговой, орбиты с высотой 1450 км и наклоном 102° . Общая масса спутника 305 кг, размеры $102 \times 102 \times 105$ см, для питания всех агрегатов и аппаратуры спутника на нем установлены три солнечных батареи, имеющие размеры 165×91 см, которые обеспечивают максимальную мощность 400 Вт. На спутнике уста-

новлена аппаратура, позволяющая производить съемку в видимом и инфракрасном участках спектра.

Спутник имеет панель с солнечными элементами, антенны с механизмами их раскрытия, антенны командного радиоприемника и радиомаяка, преобразователи ориентации на Землю и Солнце, телевизионные камеры с автоматической передачей снимков и телевизионные камеры с усовершенствованными видиконами, сканирующие радиометры, радиометр для измерения яркости Земли, двигатель-маховик, прибор для регистрации протонной составляющей солнечного излучения, преобразователь положения горизонта.

На спутниках серии «ИТОС» телевизионные камеры имеют угол поля зрения 90° , они направлены вертикально вниз и снимают Землю с разрешением 3,7 км в центре изображения и 7,4 км на его краях. Аппаратура несколько усовершенствована по сравнению с установленной на спутниках «ЭССА». Размер изображения уменьшен до 600 строк, скорость изображения 4 лин/с, время между кадрами 260 с. Установленная на спутнике «НОАА» усовершенствованная телевизионная система «Видикон» позволяет вести космическую съемку с разрешением 3,0 км в центре и 4,7 км на краях. Запись изображения производится на магнитную ленту, считывание с которой и прием информации производят по командам с Земли на станциях сбора информации. Изображение, получаемое камерой, имеет 833 линии с 10 градациями яркости. Кадр строится через 6 с, продольное перекрытие составляет 50%. На спутнике «НОАА» установлен также сканирующий радиометр с двумя каналами, работающими в видимом и инфракрасном диапазонах спектра (0,52—0,73 мкм и 10,5—12,5 мкм). Первый канал обеспечивает получение изображения на местности 3,7 км, второй канал обеспечивает «видение» в надире пятна размером 7,4 км. Съемка с помощью двухканального радиометра ведется как в дневное, так и в ночное время.

Для выполнения научно-исследовательских работ в области получения метеорологической информации и решения ряда других вопросов на орбиту была выведена серия спутников «Нимбус». На ферме укреплены нижняя плата — кольцо и верхний корпус. В нижней плате смонтирована система метеорологической аппаратуры и узлы специальных приборов. В верхнем корпусе расположена аппаратура стабилизации и ориентации спутника, установлены солнцечувствительные элементы и крылья солнечных батарей. В систему телевизионной аппаратуры входят 3 камеры, устройство для записи на магнитную ленту. Имеется также телевизионная камера, ведущая съемку с разрешением $3,5 \times 3,5$ км с передачей изображения на Землю в реальном масштабе времени. Три телевизионные камеры установлены так, что одна из них имеет вертикально направленную оптическую ось, две другие наклонены под углом 35°

относительно первой, запись изображения производится на магнитную ленту. Видикон имеет развертку на 800 строк, в составе аппаратуры имеется также радиометр с получением информации по пяти каналам в разных диапазонах спектра.

Спутник для исследования природных ресурсов «ЭРТС-1» был запущен на солнечно-синхронную орбиту для того, чтобы обеспечить возможность съемки в разных зонах спектра одной и той же поверхности Земли при одинаковой высоте Солнца. Этот спутник был создан на базе спутников серии «Нimbus» и имел то же расположение основных элементов и блоков конструкции. Со спутника осуществлялась регулярная космическая съемка в целях получения информации о природных ресурсах и окружающей среде, съемка по заказам специалистов в области метеорологии, геологии, сельского и лесного хозяйства, океанографии, гляциологии, экологии и т. д. Размер спутника: высота 3 м, размах панелей 3,36 м, масса спутника 851 кг, масса полезной нагрузки 235 кг, мощность, обеспечиваемая солнечными батареями, 512 Вт. В качестве двигателя для обеспечения ориентации и стабилизации служат двигатели-маховики и микродвигатели, работающие на фрионе.

Космическая съемка со спутника «ЭРТС-1» проводилась телевизионной аппаратурой, в комплект которой входили три кадровые телевизионные камеры, многоканальная оптико-механическая сканирующая телевизионная система, два видеомagnитофона. Основные технические параметры съемочной аппаратуры следующие: спектральный диапазон работы камер 0,475—0,575; 0,580—0,680; 0,690—0,830 мкм, угол зрения камеры 15,9°, разрешение на местности 50 м, захват на местности при высоте 910 км составит 185×185 км.

Многоканальная оптико-механическая телевизионная сканирующая камера обеспечила съемку в диапазонах спектра 0,5—0,6; 0,6—0,7; 0,7—0,8; 0,8—1,1 мкм, угол зрения камеры 11,5°, что обеспечивает съемку полосы 185 км при разрешении на местности 70 м. Система ориентации спутника обеспечивает точность 0,7° с помощью инфракрасных датчиков земного горизонта и гироскопов. Точность геодезической привязки результатов съемки составляла для кадровых телевизионных снимков порядка 90 м, для сканерных порядка 230 м. Вся информация со спутников «ЭРТС-1» поступала на вычислительный наземный центр.

Метеорологические спутники Франции и Италии предназначены для научных исследований верхних слоев атмосферы Земли, общей циркуляции атмосферы, сбора метеоинформации. Французский экспериментальный метеорологический спутник «ЭОЛ» предназначен для сбора метеоинформации с шаров-зондов, которые запускаются на высоту 12 км. Одновременно «ЭОЛ» может записывать информацию от 64 шаров-зондов по шести параметрам. Масса спутника 84 кг, корпус имеет форму

восьмигранной призмы, высота 0,58 м, максимальный поперечник 0,71 м. Общая энергомощность 20 Вт.

Итальянский спутник «Сан-Марко» предназначен для изучения атмосферы в экваториальной зоне и исследования характеристик ионосферы. Спутник имеет сферическую форму, его масса 164 кг, корпус состоит из двух концентрических сфер: легкой верхней диаметром 0,7 м и тяжелой внутренней сферы. Исследование плотных слоев атмосферы производится по величине смещения этих сфер, которое возникает из-за аэродинамического торможения и регистрируется с помощью акселерометра. Запуск спутника «Сан-Марко» производился с плавучей платформы, установленной на 20 стальных опорах, в 5 км от побережья Кении. Пульт управления и прием информации осуществлялся с другой платформы. На спутниках «ЭОЛ» и «Сан-Марко» характерной особенностью оборудования является отсутствие обзорной аппаратуры, т. е. со спутников не производится космическая съемка.

Для исследования природных ресурсов на орбиту был выведен США спутник «Ландсэт», который явился более совершенной модификацией «ЭРТС-1».

§ 7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ МЕЖПЛАНЕТНЫЕ СТАНЦИИ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ ПЛАНЕТЫ ВЕНЕРА

Автоматические межпланетные станции «Венера-9» и «Венера-10» представляют собой новое поколение космических автоматов для комплексных исследований поверхности планеты Венера и ее атмосферы. По своим конструктивным данным они отличаются от аппаратов, запускаемых к Луне, Марсу. Условия спуска на поверхность Венеры отличаются от условий спуска на Марс, в связи с чем осуществление спуска и посадки на поверхность и обеспечение работоспособности различны. Атмосфера Венеры плотная и сильно разогретая, что требует создания благоприятного теплового режима внутри аппарата. Опыт запуска и эксплуатации АМС «Венера-4» — «Венера-8» позволил установить необходимые условия для функционирования аппаратуры на станциях «Венера-9» и «Венера-10». Исследования с этих станций проводились на освещенной стороне планеты, и спускаемые аппараты с Земли не были видны. Поэтому в систему экспериментальных комплексов был включен искусственный спутник-ретранслятор для обеспечения передачи научной информации. Между спускаемым аппаратом, спутником и наземными станциями обеспечивались условия радиовидимости. Таким образом, автоматические межпланетные станции представляют собой летательные аппараты, оснащенные сложной радиотехнической и научной аппаратурой, системой ориентации и управления, программно-временными устройствами, системой регулирования теплового режима, источниками питания. Они

предназначены для проведения фотографической панорамной съемки поверхности планеты, исследования характеристик атмосферы, ее теплового режима, характера динамики атмосферы. Для изучения планетарных перемещений облачных структур проводится съемка в ультрафиолетовых лучах с искусственных спутников. Регистрация потоков радиации из верхней и нижней полусфер в разных зонах спектра обеспечивает изучение отражательных свойств поверхности Венеры и определение энергетического баланса в атмосфере на разных уровнях. Определение прозрачности атмосферы проводится по измерениям поглощения радиации в отдельных полосах углекислого газа, водяного пара и в ближней инфракрасной области спектра. Конструктивно АМС «Венера» состоит из орбитального аппарата (ОА) и спускаемого аппарата (СА), которые выполнены в виде связки собственных станций и СА. За двое суток до полета к планете Венера происходит отделение спускаемого аппарата, а сама станция становится искусственным спутником Венеры.

Основные данные о космических станциях «Венера» приведены в табл. 1.

Спускаемый аппарат станции «Венера», который состоит из отсека парашютной системы 8, отсека научной аппаратуры, предназначенной для работы в облачном слое, научной аппаратуры 1, телефотометра 2, служебной аппаратуры 3, аэродинамического тормозного устройства 4, антенны 5, прочного корпуса 6, посадочного устройства 7, теплозащитного корпуса, теплоизоляции 9 показан на рис. 7.

Т а б л и ц а 1

Характеристика станций	«Венера-9»	«Венера-10»
Даты старта к Венере	8 июня 1975 г.	14 июня 1975 г.
Даты прилета на Венеру	22 октября 1975 г.	25 октября 1975 г.
Масса космической станции, кг	4936	5033
Масса спускаемого аппарата, кг	1560	1560
Характеристики орбиты, км:		
апоцентр	112 200	113 900
перигеум	1510	1620
Наклонение орбиты к плоскости венерианского экватора	34°10'	29°30'
Период обращения	48 ч 18 мин	49 ч 23 мин
Скорость входа в атмосферу Венеры, км/с	10,7	10,7
Место посадки СА (в системе координат, утвержденной Международным астрономическим союзом):		
широта	31°42'	16°02'
долгота	290°50'	291°00'

Спускаемый аппарат с помощью вытяжного парашюта, парашюта увода и тормозного производит посадку в заданном программой работ районе планеты. Система парашютов гасит скорость с 250 до 30 м/с, начиная с высоты 65 км над планетой. После отстрела последней ступени парашютной системы снижение СА происходит на жестких аэродинамических тормозных устройствах, причем скорость при посадке равна 7 м/с.

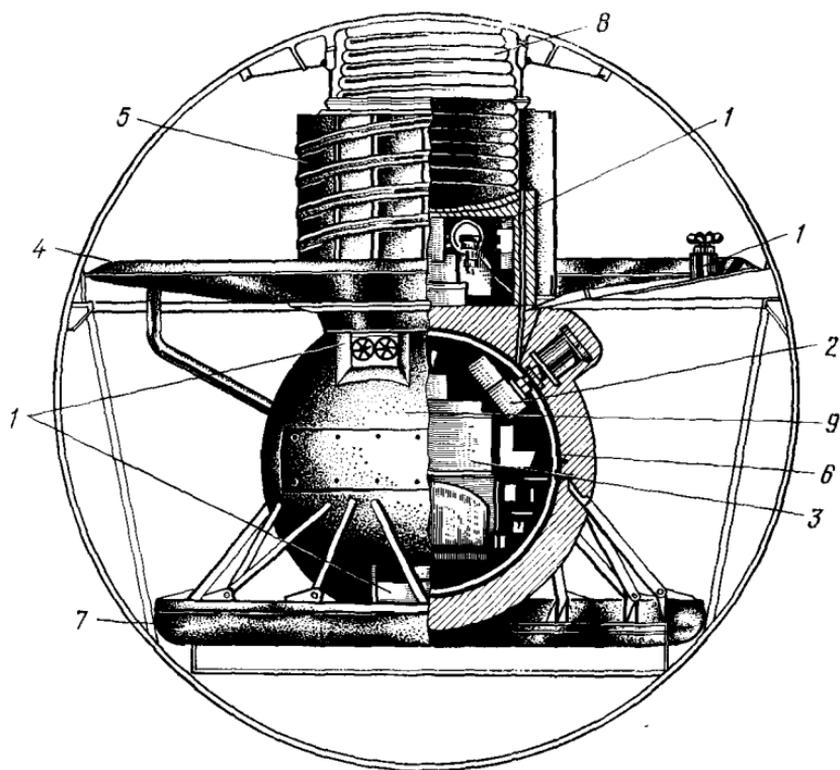


Рис. 7.

Панорамная фотографическая съемка Венеры произведена в месте посадки СА с помощью телевизионной аппаратуры, видеосигналы, формируемые опико-электронными устройствами, поступали на телеметрическую систему, где преобразовывались в цифровую форму, и по радиолинии от СА передавались на искусственный спутник-ретранслятор и с него, после предварительной обработки ретранслировались на дециметровых волнах на Землю. Схема передачи с использованием промежуточного спутника позволила в сотни раз увеличить объем получаемой с поверхности Венеры информации и с самого спутника, выполнить спектрометрическую, радиометрическую съемку облачных покровов Венеры, получить информацию о световых потоках

с помощью фотополариметров, изучить спектр собственного излучения атмосферы, магнитные поля, спектры ионов и электронов в околопланетном пространстве. Метод передачи с помощью двоичных символов «1» и «0» позволил наиболее эффективно использовать мощность передающих устройств СА. Приемные устройства ОА обеспечивали постоянный поиск радиосигналов с СА в автоматическом режиме.

Панорамные камеры устанавливаются в герметичном и теплоизолированном приборном отсеке СА, который имеет оптический иллюминатор. Учитывая, что давление на Венере $1,01 \cdot 10^5$ Па, а температура 500°C , необходимо было устранить влияние внешних факторов на съемочную систему, что потребовало решения ряда сложных технических вопросов.

§ 8. АВТОМАТИЧЕСКАЯ МЕЖПЛАНЕТНАЯ СТАНЦИЯ «МАРС»

Космическая съемка планеты Марс осуществлена с автоматических межпланетных станций, которые созданы для исследования космического пространства и планет Солнечной системы. Впервые запуск АМС «Марс-1» был осуществлен Советским Союзом 1 ноября 1962 года. Это потребовало решения целого ряда принципиально новых задач. На орбиту необходимо было вывести космический аппарат значительной массы, все агрегаты станции должны были работать в космическом пространстве длительное время, необходимо было обеспечить радиосвязь на расстоянии в сотни миллионов километров, создать новую многоступенчатую ракету-носитель, разработать комплекс научной и радиотехнической аппаратуры. Запуск АМС должен быть произведен на энергетически оптимальную орбиту, т. е. по которой можно долететь до Марса с наименьшим расходом топлива. Это возможно, если космический корабль, преодолев земное притяжение на расстоянии около миллиона километров, будет двигаться со скоростью относительно Солнца не менее $33\text{—}34$ км/с, т. е. будет обгонять Землю в ее орбитальном движении на $3\text{—}4$ км/с. При выборе орбиты учитывается также наклонение плоскости орбиты Марса к плоскости орбиты Земли, условия радиосвязи со станцией, удобное прохождение станции относительно планеты для проведения фотографирования, т. е. освещенность планеты, и т. д. Многоступенчатая ракета-носитель имела на борту управляемую космическую ракету с автоматической межпланетной станцией. После того как ракета-носитель заняла расчетную траекторию, от нее отделился спутник (ИСЗ), несущий космическую ракету с автоматической станцией. В заданной точке орбиты ракета-носитель стартовала с борта спутника, и когда она достигла скорости, на 4 км превышающей скорость спутника, ее двигатели выключились, ракета-носитель отделилась от автоматической станции и начался ее свободный полет к Марсу со скоростью $3,94$ км/с. Точность выведения ракеты на

расчетную траекторию должна быть очень высокой. Так, ошибка в скорости ракеты всего лишь на 30 см/с или ошибка в направлении скорости на одну угловую минуту приведет к увеличению отклонения от Марса на 20 тыс. км.

Автоматическая межпланетная станция «Марс-1» состоит из двух герметических отсеков: орбитального и планетного. Орбитальный отсек предназначен для размещения аппаратуры, обеспечивающей работу станции во время полета к Марсу, на нем установлены корректирующие двигательные установки, панели солнечных батарей, полусферические радиаторы системы терморегулирования, антенны. Планетный отсек предназначен для размещения научных приборов, работающих у планеты. Наибольшие размеры станции: длина 330 см, ширина с солнечными батареями 400 см, диаметр орбитального отсека 110 см, масса станции 893,5 кг. Станция конструктивно относится к разворачивающимся во время полета. После того как сбрасывается обтекатель станции, закрывающий ее при проходе плотных слоев атмосферы, солнечные батареи, антенны и радиаторы раскрываются и занимают рабочее положение. На борту станции размещена радиотехническая аппаратура, с помощью которой производятся траекторные измерения и передача телеметрической информации на Землю. Управление ведется как в автоматическом режиме, так и по радиолинии по командам с наземных пунктов. Система ориентации станции приводит станцию в заданное положение после ее отделения от ракеты-носителя. В системе используются оптические датчики, направленные на Солнце и заданные планеты и звезду. Источники питания обеспечивают работу всей бортовой научной и технической аппаратуры. Тепловой режим станции обеспечивается системой терморегулирования, куда входят полусферические радиаторы и теплообменники, установленные в герметических отсеках станции.

В состав космической съемочной аппаратуры, установленной в планетном отсеке станции, входит фототелевизионная камера для фотографирования планеты Марс, спектрорефлексометр, спектрограф. На борту также установлены приборы для обнаружения магнитного поля Марса и измерения магнитных полей в космическом пространстве, газоразрядные и сцинтилляционные счетчики для изучения радиационных поясов Марса, радиотелескоп для изучения радиоизлучения в космосе в диапазоне длин волн 150 и 1500 м, регистрации потоков протонов и электронов, регистрации микрометеоритов. Радиотелеметрические системы передавали информацию в виде кодовых сигналов. Для этого на станции имелись три радиосистемы и несколько коммутаторов. Радиосистемы работают на волнах в метровом (1,6 м), дециметровом (32 см) и сантиметровом (5 и 8 см) диапазоне. Для передачи телеметрической информации коммутаторы во время радиосвязи с Землей поочередно подключают к передатчику научную аппаратуру и датчики. Про-

межуточная информация между сеансами связи поступает на запоминающие устройства. Поступившая информация в координационно-вычислительном центре обрабатывается на ЭВМ, анализируется, после чего принимается решение о коррекции траектории.

§ 9. ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ СЪЕМКА С АВТОМАТИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ «ЗОНД»

Полеты автоматических межпланетных станций «Зонд-5», «Зонд-6», «Зонд-7» и «Зонд-8» стали возможными после решения сложной математической задачи возвращения на Землю космического аппарата, летящего со второй космической скоростью. Впервые полет автоматической станции был осуществлен 2 января 1959 года, когда советская ракета-носитель со второй космической скоростью преодолела земное притяжение и вывела станцию на орбиту вокруг Луны. Планомерное изучение космического пространства и Луны осуществлялось с помощью станций «Луна» и «Зонд». На этом этапе ракетно-космические системы обеспечивали ограниченную возможность исследований во время подлета к Луне, при попадании в нее или при облете. Далее были решены задачи доставки автоматических межпланетных станций с приборами на лунную поверхность или выведения их на окололунную орбиту. Научная информация поступала по радиотелеметрическим телевизионным каналам.

Решение задачи полета станции по трассе Земля — Луна — Земля, осуществление спуска космического аппарата в атмосфере Земли после полета по межпланетной траектории позволили произвести космическую фотосъемку Луны в разных спектральных зонах и получить снимки, свободные от помех и искажений, внесенных телеметрической или телевизионной системой. Для решения задачи возвращения космического аппарата с межпланетной трассы произвели серию полетов станций типа «Зонд-5», «Зонд-6», «Зонд-7», «Зонд-8».

Автоматическая станция «Зонд» конструктивно оформлена в виде приборного отсека и спускаемого аппарата. На рис. 8 приведена схема полета станции «Зонд». Вывод станции на трассу производится с помощью многоступенчатой ракеты-носителя: на первом этапе — на орбиту искусственного спутника Земли, на втором — на трассу полета к Луне. Облетев Луну, станция возвращается на Землю. При удалении станции от Земли и при подлете к Луне производились сеансы фотографирования. Приборный отсек предназначен для размещения системы управления, радиотелеметрического комплекса, электронной части системы ориентации и стабилизации, системы терморегулирования и энергоснабжения. Ракетная двигательная установка для коррекции траектории полета станции и система управляющих двигателей установлены на приборном отсеке, где

расположены также оптические датчики системы ориентации, панели солнечных батарей и радиоантенны. Система ориентации и стабилизации станции обеспечивает ее ориентацию по Солнцу и Земле или по Солнцу и определенной звезде перед сеансами коррекции и стабилизирует станцию в заданном положении. Кроме того, в процессе выполнения сеансов космической съемки станцию необходимо ориентировать так, чтобы в поле зрения съемочных систем находились объекты фотографирования.

В спускаемом аппарате установлена научная аппаратура, включающая фотоэмульсионную камеру и термолюминесцент-

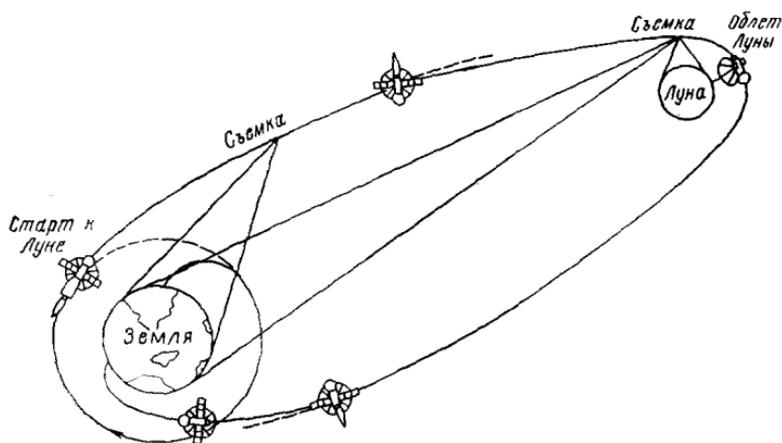


Рис. 8.

ные дозиметры, регистраторы метеорных частиц и специальный отсек для размещения биологических объектов исследований (черепахи, мухи-дрозофилы, хлореллы, семена пшеницы и др.).

Комплекс фотографической съемочной системы устанавливается в спускаемом аппарате. Он включает космическую камеру с установленной пленкой, блок программно-временного формирования команд, блок регулирования экспозиции и смены светофильтров. Спускаемый аппарат имеет осесимметричную сегментально-коническую форму без выступающих частей, что позволяет в определенных пределах изменять траекторию полета при движении в атмосфере Земли и обеспечивать управляемый вход и спуск аппарата в заданной точке орбиты.

Надежность работы научных приборов и космических съемочных камер обеспечивается применением специального теплозащитного покрытия из жаропрочных и теплоизоляционных материалов, предохраняющих все элементы оборудования от перегрева при входе отсека в плотные слои атмосферы. С ав-

томатических станций типа «Зонд» были проведены космические съемки Земли и лунной поверхности в разных зонах спектра.

§ 10. ПОЛИГОННЫЕ ПОДСПУТНИКОВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ В НИХ НОСИТЕЛИ

При проведении космических съемок в целях использования природных ресурсов Земли выполняют одновременно исследование земных объектов с самолетов и с помощью наземных измерительных комплексов над полигонами. Эти исследования получили название подспутниковых экспериментов. Оказалось возможным произвести физическое моделирование процесса изучения природных ресурсов по материалам аэросъемки и перенести методику исследований на пилотируемые КЛА и автоматические межпланетные станции. Для проведения летных экспериментов применяют самолетные лаборатории, оснащенные эффективными инструментами для проведения исследований в широком диапазоне электромагнитных волн. Обычно исследования производят над небольшими регионами в разных ландшафтных зонах земной поверхности и над акваториями Мирового океана.

Рассмотрим основные моменты проведения подспутниковых экспериментов с использованием самолетных лабораторий. Одним из наиболее важных и трудноучитываемых факторов, влияющих на формирование критерия вероятности определения физических свойств земных объектов по материалам космической съемки, является атмосфера. Известно, что пропускание электромагнитных волн атмосферой носит селективный характер. Коэффициент пропускания изменяется в значительных пределах и зависит от сезона в момент проведения исследований, метеорологических факторов, загрязнения атмосферы, содержания влаги и т. д. Приземные слои атмосферы (10—15 км) в основном определяют изменения функции передачи модуляции и степень искажения результатов фотографической съемки земных объектов. По данным проведенных измерений с самолетов и сопоставления их с синхронными наземными измерениями определяют влияние атмосферы на качество аэросъемочных материалов и переносят эти закономерности с некоторой степенью приближенности на результаты космических съемок. Одной из задач подспутниковых экспериментов является исследование влияния внутриэлементной генерализации и их сравнение с данными космических съемочных систем. Космические съемочные системы позволяют получить элементы земной поверхности порядка сотен квадратных километров. Оптико-электронные системы дают величину разрешаемого на местности элемента в несколько раз больше. Таким образом, в элементарном поле зрения съемочной системы оказывается не один объект, а группа

объектов. Это влияет на точность получения спектральных характеристик земных объектов по материалам съемки.

Изучение внутриэлементной генерализации позволяет определить требования к космическим съемочным системам по параметру требуемой разрешающей способности.

По материалам, полученным при проведении съемок с самолета, определяют влияние на результаты измерений угла визирования, индикатрис угла.

Самолеты могут применяться также для выполнения регулярных исследований природных ресурсов на относительно небольших площадях. Для этого должна проводиться детальная периодическая съемка, которую, с точки зрения экономичности и сложности, выполнять с КЛА целесообразно. Съемка с самолетов, применяемых для целей исследования природных ресурсов, должна производиться с использованием комплекса средств и методов, обеспечивающих высокое качество материалов.

Исследования с самолетов позволяют также произвести испытание технических средств, предназначенных для космической съемки, и определить оптимальный вариант аппаратного обеспечения. По материалам аэросъемки определяют спектральные коэффициенты яркости объектов земной поверхности, их статистическое распределение и свойства. Тестовые съемки проводят для специалистов разных областей народного хозяйства: геологов, картографов, океанологов, специалистов лесного и сельского хозяйства. Проведение совместных исследований с самолетов и КЛА позволяет классифицировать земные объекты, разработать методику идентификации.

Для проведения исследований по изучению природной среды одновременно с КЛА и самолетов применяют три типа самолетов, обеспечивающих весь диапазон по высотам (1—2,5 км), продолжительности полета (4—10 ч), энергопотреблению (2—10 кВт) и другим эксплуатационным характеристикам. К аэросъемочному самолету предъявляют специальные требования: хороший обзор местности для экипажа; продольная и поперечная устойчивость самолета; хорошая маневренность; большой запас горючего, чем у пассажирских самолетов; обеспеченность современным пилотажно-навигационным оборудованием; высокая эффективность полета и т. д.

Для выполнения экспериментов по исследованию природных ресурсов Земли наиболее часто применяют аэросъемочный самолет-лабораторию АН-30. Помимо штатного съемочного оборудования на самолете устанавливают все виды научной аппаратуры, необходимой для получения информации об объектах земной поверхности и условиях проведения экспериментов. Самолет АН-30 предназначен для выполнения аэросъемочных работ в средних и мелких масштабах для картографических целей и исследования природных ресурсов Земли.

Самолет представляет собой двухмоторный моноплан с высоко расположенным свободонесущим крылом. Во время полета шасси убирается в мотогондолу. Силовая установка самолета состоит из двух турбовинтовых двигателей типа АИ-24ВТ взлетной мощностью по 1975,5 кВт каждый и дополнительного реактивного двигателя, который используется на взлете при наборе высоты и в случае отказа одного из основных двигателей. Дополнительный двигатель обеспечивает также запуск маршевых двигателей. Самолет АН-30 обладает хорошей боковой и продольной устойчивостью, имеет хорошую управляемость и маневренность, выполняет виражи с креном до 45°. Фюзеляж самолета герметичен, в гермоотсеке поддерживается перепад давления не более 0,3 мПа относительно наружного давления. Состав экипажа 7 человек: командир корабля, второй пилот, штурман-аэросъемщик, бортинженер, бортрадист, первый и второй бортоператоры. Кабина штурмана-аэросъемщика размещена в носовой части самолета, она остеклена, что обеспечивает хороший обзор вперед, вниз, влево, вправо. Для выполнения плановой съемки топографическими аппаратами в нижней части фюзеляжа, вдоль строительной оси, оборудованы три остекленных фотолюка, для выполнения перспективной съемки — два фотолюка справа от плоскости симметрии самолета. Для защиты стекол фотолюка от механических повреждений во время взлета и посадки, а также воздействия метеорологических осадков во время полета к месту проведения фотосъемочных работ имеются три сдвижные крышки, которые вместе с направляющими размещены в подфюзеляжном обтекателе. Для перезарядки кассет во время аэросъемочных работ и проявления отдельных пробных снимков в хвостовой части фюзеляжа самолета оборудована темная кабина. Самолет оборудован кислородной системой для каждого члена экипажа, вентиляцией, устройством для внутренней связи между членами экипажа, что обеспечивает необходимый комфорт во время работы.

Самолет АН-30 оснащен современным пилотажно-навигационным оборудованием, включающим штатное оборудование по типу пассажирских самолетов и специальное для обеспечения повышенной точности самолетовождения. В состав аэросъемочного пилотажно-навигационного оборудования входят: курсовая система с астрономическим компасом, доплеровский измеритель путевой скорости и угла сноса самолета, навигационный цифровой вычислитель параметров аэросъемочного полета, автомат программного разворота к автопилоту для автоматического захода на следующий маршрут и повышения точности полета по заданному курсу, радиовысотмер больших высот.

В комплект аэрофотосъемочного оборудования входят: топографические аэрофотоаппараты, панорамные аэрофотоаппараты, гиросtabilизирующая платформа, статометр, топографический радиовысотмер, электронный командный прибор, аэро-

экспонометр. На самолете может быть установлено другое оборудование, необходимое для проведения научных исследований. Допустимая масса комплекта аэрофотосъемочного и другого оборудования может достигать одной тонны. Топографические аэрофотоаппараты (ТАФА) устанавливаются над фотолюками в гиросtabilизирующую (ГУТ) или плановую аэрофотоустановку. Для установки ТАФА с различными фокусными расстояниями предусмотрены переходные кронштейны. ГУТ позволяет стабилизировать ТАФА во время съемки так, чтобы оптическая ось ТАФА была направлена по вертикали к земной поверхности. Точность стабилизации по средней квадратической ошибке составляет 10'. Статометр С-15М служит для фиксации отклонений (Δh) от заданной линии полета в каждый момент экспонирования. Точность определения Δh составляет 1,0 м на высотах более 3000 м. Топографический радиовысотометр служит для определения расстояния от самолета до земной поверхности в момент экспонирования с точностью 1,5 м. Показания топографического радиовысотомера фиксируются фоторегистратором на кадр формата 6×6 см и в наземных условиях идентифицируются с фотоснимками земной поверхности. Знание высот позволяет определить масштаб фотографирования и служит одной из координат пространственного положения центра проектирования. Электронный командный прибор осуществляет управление фотосъемочной аппаратурой: подает команды на включение ТАФА в заданный момент фотографирования с разными фокусными расстояниями, подает команду на включение в момент экспонирования статометра, радиовысотомера, подает команды на разворот ТАФА на угол сноса. Аэроэкспонометр электронный АЭ-2 служит для измерения светового потока для определения времени выдержки.

Основные технические характеристики самолета АН-3д

Размах крыльев, м	29,2
Площадь крыла, м ²	72,5
Длина самолета, м	24,3
Высота самолета, м	8,3
Максимальная взлетная масса, кг	23 000
Двигатели	2 и 1 дополнительный
Дальность полета на 600 м при $v = 450$ км/ч и аварийный неприкосновенный запас (АНЗ) на 1 ч, км	2300—2500
Запас топлива, кг	5500
Крейсерская скорость на $H = 6000$ м, км/ч	450—480
Время полета в наиболее выгодном режиме, ч	7
Длина разбега по бетону, м	480
Минимальная эффективная скорость, км/ч	370
Посадочная скорость, км/ч	165
Длина пробега, м	660
Практический потолок, м	8000

Самолет АН-30 применяют при фотосъемках в средних и мелких масштабах. Эксплуатация самолета на высотах менее 3000 м экономически нецелесообразна.

Для проведения наземных экспериментов, связанных с исследованиями природных ресурсов космическими методами, применяют специальные комплексы научного оборудования, предназначенного для фиксации физических и других характеристик объектов земной поверхности. В задачу наземных подспутниковых экспериментов входит измерение температуры, влажности, дальности и других метеорологических параметров. С помощью спектрофотометра производятся фотометрические наблюдения объектов, их регистрация и измерение. Исследуются также направленность индикатрисы рассеяния при разных высотах Солнца и разном состоянии отражаемых объектов. Для выполнения съемок в крупных масштабах применяют самолет АН-2, для съемок в мелких масштабах оборудован самолет ТУ-134.

Глава II

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОЛЕТА КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

§ 11. ОСНОВНЫЕ УЧАСТКИ ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА КЛА

Развитие космонавтики позволило создать летательные аппараты со свободным маневрированием в космическом пространстве. В 1963 году был запущен первый в мире управляемый маневрируемый космический аппарат «Полет-1». До этого ни одно искусственное тело, выведенное в космос, не могло изменить свою орбиту. Создание маневрируемых аппаратов позволило создать орбитальные научно-исследовательские станции в космосе со сменяемыми экипажами, выполнять сложные научно-технические эксперименты. Знание закономерностей движения космического летательного аппарата необходимо для составления программ научных экспериментов и в том числе программ космической съемки планет Солнечной системы. Параметры орбиты, время существования космического летательного аппарата, возможности его маневрирования на орбите определяют методы космической съемки, состав съемочной аппаратуры, способ передачи полученной информации на Землю. Запуск космического летательного аппарата производится с помощью одноступенчатой или многоступенчатой ракеты-носителя. Участок выведения на орбиту определяет начальные усло-

вия полета и предназначен для вывода КЛА в заданную точку пространства. На участке выведения происходит разгон КЛА до определенной скорости и задается угол наклона орбиты.

Стартует ракетный комплекс вертикально, и на активном участке траектории полета при работающих реактивных двигателях происходит увеличение скорости и последовательное отделение первой, второй ступени на заданной высоте. Активный участок, как правило, заканчивается выходом на заданную орбиту с отделением космического отсека от ракеты-носителя. Иногда расположение места старта не позволяет вывести КЛА сразу на заданную орбиту. В этом случае полет состоит из нескольких активных участков, чередующихся с пассивными, на которых реактивные двигатели не включаются.

Полет по баллистической траектории происходит после окончания работы двигателей предпоследней ступени. Затем происходит включение реактивного двигателя последней ступени и разгон КЛА до скорости, необходимой для полета по заданной орбите.

Вторая часть траектории движения КЛА — участок орбитального полета. Движение КЛА на этом участке определяется рядом факторов: силой тяготения того небесного тела, в сфере влияния которого производится полет, децентрацией его поля тяготения, силой тяготения других небесных тел, сопротивлением атмосферы, влиянием на КЛА солнечного давления, действием магнитных полей и др.

Третий участок траектории КЛА — участок входа в атмосферу, снижения и посадки. Вход в атмосферу осуществляется за счет уменьшения скорости движения КЛА на орбите и изменения траектории движения.

Траектория баллистического спуска при заданных характеристиках КЛА и параметры атмосферы рассчитываются заранее. С учетом этих факторов выбирают место и угол входа КЛА в атмосферу, обеспечивающие его посадку в заданный район поверхности планеты.

Торможение осуществляется или при помощи реактивных двигателей, или из-за изменения аэродинамических сил.

При входе в плотные слои атмосферы возникает ударная волна, нагревающая воздух до очень высокой температуры, расплагающаяся перед носовой частью КЛА.

При погружении в более плотные слои атмосферы происходит еще больший нагрев КЛА и его торможение. Следует отметить, что большая часть энергии отводится от КЛА за счет действия сильных ударных волн и теплоизлучения с нагретой поверхности аппарата.

Рассмотрим более подробно движение спутника на орбитальном участке траектории полета и основные параметры орбиты.

§ 12. ЭЛЕМЕНТЫ ОРБИТЫ КЛА

Параметры, однозначно определяющие положение КЛА в пространстве, называются элементами орбиты. К ним относят элементы, характеризующие положение плоскости орбиты в пространстве, ее форму и размеры, а также элементы, определяющие положение КЛА на орбите.

Рассмотрим движение КЛА по эллиптической орбите. Пусть P_N и P_S — северный и южный полюса мира. Большой круг NS соответствует небесному экватору, Υ — проекция точки весеннего равноденствия на небесную сферу, O — центр небесной сферы, совпадающий в данном случае с одним из фокусов орбиты. Орбита пересекает небесный экватор в точках Ω и \mathcal{U} , которые называются восходящими и нисходящими узлами орбиты

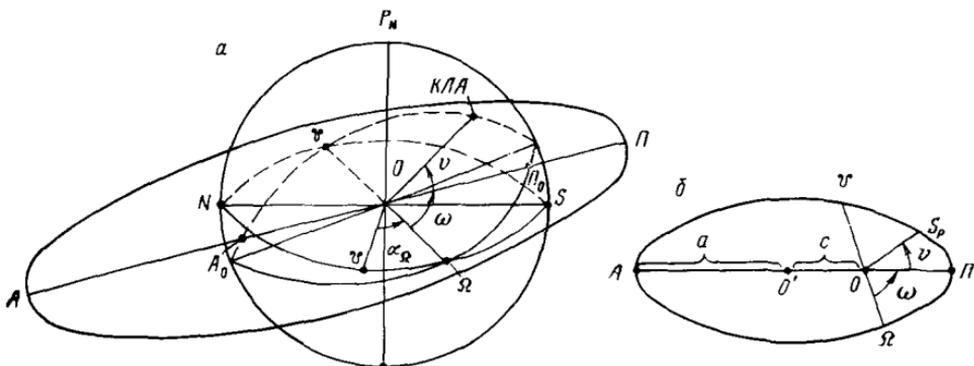


Рис. 9.

соответственно. Линия $\Omega O \mathcal{U}$ называется линией узлов. Проекция апоцентра A и перигея P на небесную сферу есть точки A_0 и P_0 — апогей и перигей соответственно. Точки AOP образуют линию апсид.

Орбита пересекает экватор в точке Ω (рис. 9, а). Угловое расстояние точки Ω от точки весеннего равноденствия Υ называется прямым восхождением восходящего узла орбиты и обозначается α_Ω . Угол наклона плоскости орбиты к плоскости экватора обозначается i . Элементы α_Ω и i определяют ориентацию орбиты в пространстве.

Для того чтобы определить элементы, характеризующие форму орбиты и положение на ней ИСЗ, рассмотрим проекцию орбиты на плоскость (рис. 9, б). Здесь, как и на предыдущем рисунке, AOP — линия апсид, $\Omega O \mathcal{U}$ — линия узлов, O — один из фокусов орбиты. Расстояние $AO' = O'P$ называется большой полуосью орбиты и обозначается, как правило, a . Форма орбиты характеризуется эксцентриситетом e , который вычисляется так:

$$e = c/a, \quad (1)$$

где c — расстояние между центром O' и фокусом O орбиты.

Отметим, что в зависимости от значений эксцентриситета орбита может быть: $e=0$ — окружностью; $0 < e < 1$ — эллипсом; $e=1$ — параболой; $e > 1$ — гиперболой.

Дуга ΩP_0 — угловое расстояние перигея от узла, обозначается ω и называется долготой перигея. Положение спутника на орбите характеризуется истинной аномалией ν (дуга PS_p) или временем τ , прошедшим с момента прохождения спутника через перигей до данного момента. Итак, положение спутника в пространстве полностью определяется шестью элементами: α_Ω , i , a , e , ω , ν (τ), которые соответствуют некоторому моменту времени t , называемому эпохой элементов.

§ 13. СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Вследствие непрерывного движения КЛА любые координаты, характеризующие его положение в пространстве, относятся к определенному моменту времени. Поэтому важно рассмотреть системы измерения времени.

Основные единицы измерения времени связаны, как известно, с периодическими процессами, происходящими на Земле: вращением Земли вокруг своей оси (сутки) и обращением Земли вокруг Солнца (год).

Положение в пространстве Солнца и других светил (звезд), наблюдаемых с целью определения времени, выражают в сферических координатах на небесной сфере (рис. 10), центр которой O совпадает с центром масс Земли. Рассмотрим основные точки и круги этой небесной сферы.

Направление силы тяжести (отвесная линия) в некоторой точке земной поверхности пересечет небесную сферу в точке Z , называемой зенитом, противоположная ей точка Z' называется надиром. Плоскость, перпендикулярная к отвесной линии, образует небесный (астрономический) горизонт. Проведем теперь линию, параллельную оси вращения Земли, она пересечет небесную сферу в точках P и P' , называемых северным и южным полюсами мира. Линия POP' называется осью мира. Плоскость, перпендикулярная к оси мира RR' , называется небесным экватором и пересекает небесный горизонт в точках запада и востока: W и E ; точки, отстоящие на 90° от них, N и S — точки севера и юга соответственно. Большой круг $NPZS$ — меридиан данного пункта.

Плоскость, в которой происходит видимое годичное движение Солнца \odot , называется эклипстикой (QQ'). Эклиптика пересекает небесный экватор RR в точках Υ и ϖ , называемых точками весеннего и осеннего равноденствия. С точкой весеннего равноденствия связано звездное время.

Звездные сутки — промежуток времени между двумя последовательными кульминациями (наивысшими положениями) точки весеннего равноденствия Υ на одном и том же мери-

диане. Звездное время—время, отсчитываемое от момента верхней кульминации точки весеннего равноденствия до любого другого ее положения. Звездное время s на данном меридиане в любой момент численно равно часовому углу точки весеннего равноденствия t_{γ} , т. е. $s = t_{\gamma}$. Звездное время есть сумма часового угла t любого светила и его прямого восхождения α , т. е.

$$s = t + \alpha. \quad (2)$$

Истинные солнечные сутки — промежуток времени между двумя последовательными кульминациями центра видимого диска Солнца (так называемого «истинного» Солнца) на одном и том же меридиане. Истинное солнечное время — время, отсчитываемое от момента нижней кульминации истинного Солнца до любого другого ее положения. Истинное солнечное время Солнца на данном меридиане равно часовому углу истинного Солнца плюс 12^h , т. е.

$$m_{\odot} = t_{\odot} + 12^h. \quad (3)$$

Среднее экваториальное Солнце — воображаемая точка небесной сферы, движущаяся равномерно по небесному экватору, так что в каждый момент T ее прямое восхождение α равно средней долготе истинного Солнца L . Средние солнечные сутки — промежуток времени между двумя последовательными кульминациями среднего экваториального Солнца на одном и том же меридиане.

Среднее солнечное время — время, прошедшее от момента нижней кульминации среднего экваториального Солнца до любого другого ее положения.

Среднее солнечное время m на данном меридиане численно равно часовому углу среднего экваториального Солнца плюс 12^h , т. е.

$$m = t_{cp} + 12^h. \quad (4)$$

Уравнение времени E — разность часовых углов среднего экваториального t_{cp} и истинного Солнца t_{\odot} :

$$E = t_{cp} - t_{\odot}. \quad (5)$$

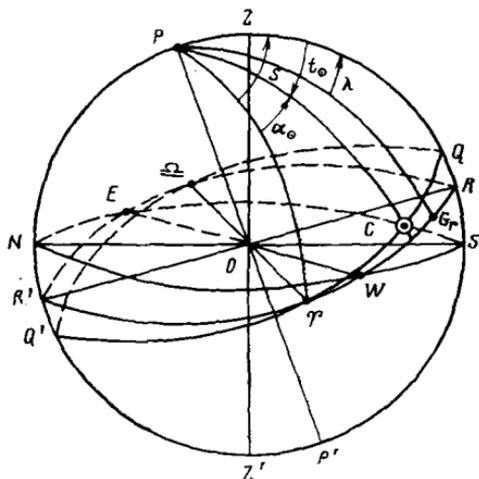


Рис. 10

Мировое или всемирное время UT_0 — это местное среднее солнечное время гринвичского меридиана PG_r (см. рис. 10).

Значения E и UT_0 даются в Астрономическом ежегоднике на начало каждого дня.

Местное среднее солнечное время какого-либо пункта на Земле определяется по формуле

$$m = UT_0 + \lambda, \quad (6)$$

где λ — географическая долгота данного пункта, считаемая положительной к востоку.

Поясное время T_n — это местное среднее солнечное время основного географического меридиана того часового пояса, в котором расположен данный пункт,

$$T_n = m + N - \lambda, \quad (7)$$

где N — номер часового пояса (отсчитывается от нулевого меридиана к востоку).

Часовые пояса — 24 участка вдоль меридианов, ширина которых примерно равна 15° (1^h).

Отметим, что для теоретического изучения движения небесных тел, в том числе КЛА, и предвычисления их положений (вычисление эфемерид) применяется эфемеридное время $T_{эф}$ — время, текущее равномерно.

§ 14. ТИПЫ ОРБИТ КЛА

Существует большое количество параметров, по которым могут различаться орбиты КЛА, из них выделяют несколько основных признаков, которые и характеризуют типы орбит.

Орбиты подразделяют по величине наклона КЛА, по направлению движения КЛА, периоду вращения, высотам полета КЛА.

По значению наклона орбиты подразделяют на экваториальные, наклонные и полюсные (или полярные). На рис. 11 показаны виды этих орбит. Наклон экваториальной орбиты $i=0$, КЛА пролетает над экватором. Если его высота над поверхностью Земли будет постоянна и равна $H=35\ 786$ км, то период обращения КЛА и период вращения Земли совпадут. КЛА, перемещаясь по орбите в направлении, совпадающем с направлением вращения Земли, будет как бы висеть над поверхностью Земли, находясь все время над одной и той же точкой планеты. Такие орбиты называют геостационарными.

У спутников, имеющих наклонную орбиту ($0 < i < 90^\circ$), их траектория проектируется на поверхность Земли в пределах широт ($-i \leq \varphi \leq i$).

Полюсные КЛА ($i=90^\circ$) имеют ту особенность, что они могут наблюдаться в любой точке земной поверхности. Вследствие вращения Земли проекция траектории полюсного КЛА на по-

верхность планеты при каждом новом обороте перемещается к западу.

При разделении КЛА на прямые и обратные учитывают направление, в котором происходит запуск КЛА относительно направления вращения Земли. Прямой спутник движется с запада на восток, его орбита имеет наклонение $0 \leq i < 90^\circ$. При вы-

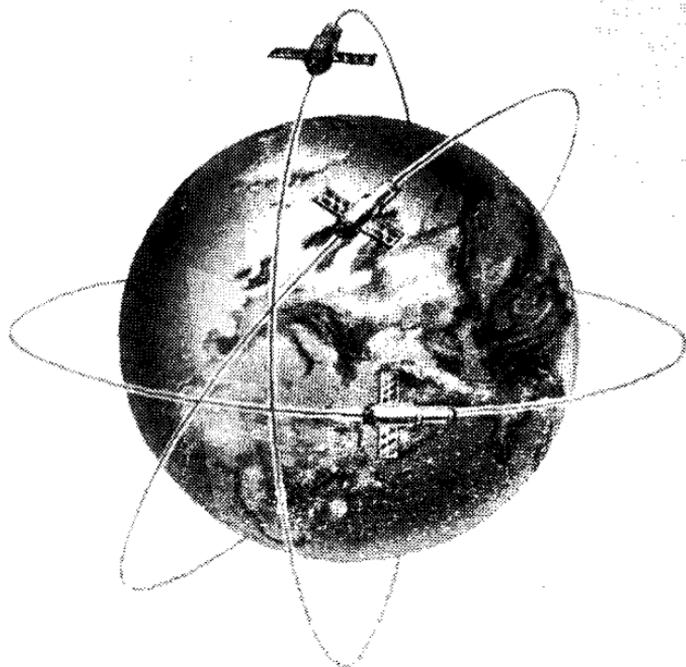


Рис. 11.

воде прямого спутника на орбиту к скорости ракеты прибавляется линейная скорость вращения Земли v_3 :

$$v_3 = \omega_3 \cdot r_0 = \frac{2\pi}{T_3} r_0 = \frac{6,28 \cdot 6378}{88\,164} = 0,465 \text{ км/с.} \quad (8)$$

Обратные спутники движутся с востока на запад. Наклонение орбиты находится в пределах $90^\circ < i < 180^\circ$. При запуске обратных спутников из скорости ракеты вычитается линейная скорость вращения Земли.

По высотам полета КЛА подразделяют следующим образом: до 500 км, от 500 до 2000 км, от 36 000 до 40 000 км. На высоты до 500 км запускают спутники серии «Космос», пилотируемые космические корабли, орбитальные станции и другие космические летательные аппараты. На высоты от 500 до 2000 км за-

пускают метеорологические, геодезические, астрономические спутники и другие ИСЗ.

На больших высотах (36 000 ÷ 40 000 км) находятся спутники, предназначенные для целей связи, для прослеживания в глобальном масштабе облачных образований и земной поверхности. При эксцентриситете $e=0$ и высоте над поверхностью Земли 35 786 км эти спутники являются геостационарными. К ним относятся советские спутники типа «Экран», «Радуга», американские спутники серий АТС, Марисат, Интелсат и др.

§ 15. НЕКОТОРЫЕ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ КОСМИЧЕСКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

При решении задач, связанных с определением геометрических параметров космических съемок, расчетов орбиты КЛА, определения трассы движения спутника, т. е. проекции орбиты на

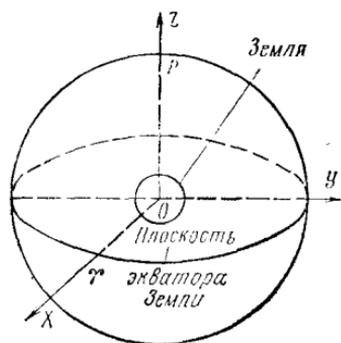


Рис. 12.

земную поверхность, координации работы наземных измерительных комплексов и т. д., необходимо точно знать, в какой системе координат задано положение КЛА. Системы координат бывают прямоугольные и криволинейные (сферические), вращающиеся и невращающиеся (инерциальные); экваториальные и эклиптические и т. д. Системы координат различаются по началу отсчета, положению основной плоскости и направлению основной оси. В зависимости от места положения начала координат

системы делятся на: гелиоцентрические, геоцентрические, топоцентрические, барицентрические, селеноцентрические и планетоцентрические, что соответствует положению начала системы координат в центре масс Солнца, Земли, в точке наблюдения на поверхности Земли, в центре масс КЛА, в центре масс Луны, в центре масс планеты.

В зависимости от положения основной плоскости системы координат делятся на экваториальные, эклиптические и др.

В зависимости от выбора направления осей систем по отношению к пространственным элементам системы подразделяются на вращающиеся и невращающиеся (инерциальные).

Рассмотрим некоторые наиболее употребительные системы координат.

Геоцентрическая прямоугольная экваториальная система координат XUZ имеет начало в центре масс Земли (рис. 12). Ось X направлена в точку весеннего равноденствия Υ , ось Z совпа-

дает с осью вращения Земли и направлена на северный полюс Земли, ось U дополняет систему до правой.

В случае использования сферических координат различают первую (ρ, t, δ) и вторую (ρ, α, δ) экваториальные сферические системы координат (рис. 13, а, б). Положение объекта в первой

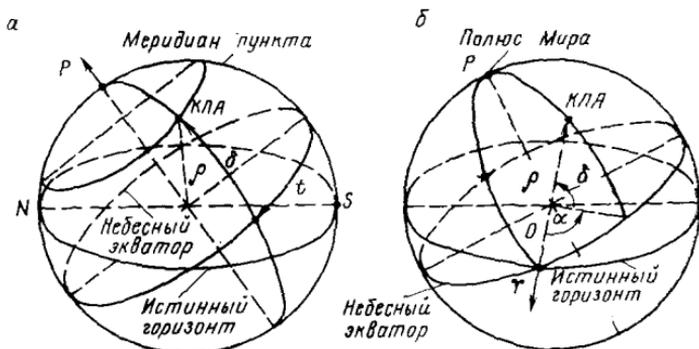


Рис. 13.

экваториальной системе определяется часовым углом t , склонением δ и радиусом-вектором ρ . Часовой угол t измеряется дугой небесного экватора между меридианом пункта наблюдения и меридианом КЛА, склонение δ — угловым расстоянием от небесного экватора до проекции КЛА на небесную сферу. Радиус-

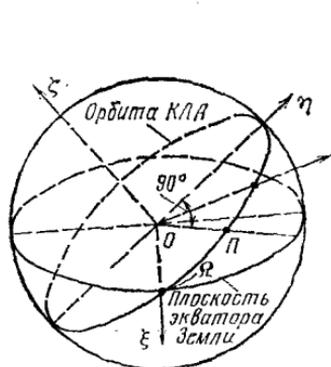


Рис. 14.

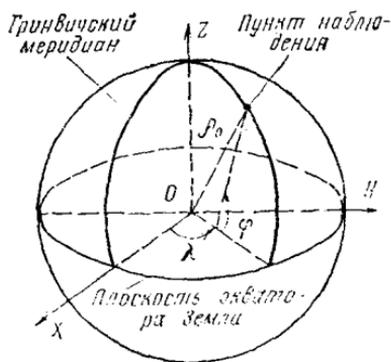


Рис. 15.

вектор КЛА ρ — расстояние от центра масс Земли до КЛА. При определении координат во второй экваториальной сферической системе координат необходимо знать прямое восхождение α КЛА, угловое расстояние по небесному экватору от точки весеннего равноденствия Υ до меридиана КЛА, склонение КЛА δ и радиус-вектор КЛА ρ .

Орбитальная система координат $\xi\eta\zeta$ (рис. 14) предусматривает, что начало находится в центре масс Земли, ось ξ направ-

лена в восходящий узел орбиты Ω (или в перицентр орбиты Π), ось ζ — по нормали к плоскости орбиты, в сторону вектора кинетического момента движения КЛА, ось η дополняет систему до правой.

Рассмотрим также географическую сферическую систему координат ρ, φ, λ (рис. 15). Начало системы находится в центре масс Земли, ось X направлена в Гринвичский меридиан Gr , ось Z — в сторону северного полюса Земли, ось Y дополняет систему до правой. Положение пункта наблюдений (или подспутниковой точки КЛА) определяется в этой системе долготой λ — углом между Гринвичским меридианом и меридианом пункта наблюдения или меридианом КЛА, широтой φ — углом между направлением силы тяжести (линии отвеса) в пункте наблюдения (или подспутниковой точке) и плоскостью экватора.

В гелиоцентрической прямоугольной экваториальной системе координат XYZ начало системы расположено в центре масс Солнца, ось X направлена в точку весеннего равноденствия Υ , ось Z — по нормали к плоскости земного экватора, в сторону северного полюса Земли, ось Y дополняет систему до правой.

§ 16. СКОРОСТЬ ДВИЖЕНИЯ СПУТНИКА ПО ОРБИТЕ

Скорость движения спутника в произвольной точке орбиты равна

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2}. \quad (9)$$

где x и y — координаты спутника в прямоугольной системе координат.

Если совместить ось X с линией апсид и перейти к полярным координатам, будем иметь

$$x = r \cos \vartheta; \quad y = r \sin \vartheta. \quad (10)$$

С учетом (10) запишем:

$$v = \sqrt{\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 + r^2 \left(\frac{d\vartheta}{dt}\right)^2}. \quad (11)$$

Запишем уравнение в полярной системе координат с учетом уравнения эллипса:

$$r^2 d\vartheta/dt = -c_1; \quad dr/dt = -c_1 e \sin \vartheta/p. \quad (12)$$

Уравнение эллипса в полярной системе координат имеет вид

$$r = \frac{p}{1 + \cos \vartheta} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + \cos \vartheta}, \quad (13)$$

где

$$p = \frac{a^2 - e^2}{a} = a(1 - e^2). \quad (14)$$

С учетом (12) имеем

$$v = \frac{c_1}{\rho} \sqrt{\frac{\rho^2}{r^2} + e^2 \sin^2 \vartheta}, \quad (15)$$

после преобразований получим

$$v = c_1/\rho \sqrt{1 + e^2 + 2e \cos \vartheta} \quad (16)$$

или

$$v = \frac{c_1}{\rho} \sqrt{2(1 + e \cos \vartheta) + (e^2 - 1)}, \quad v = \sqrt{\frac{c_1^2}{\rho} \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}. \quad (17)$$

Определим постоянную c_1/ρ , умножив первое уравнение системы (12) на dx/dt , а второе на dy/dt и, сложив их, получим

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 \right] = -\frac{\mu}{r^3} \frac{d}{dt} (x^2 + y^2), \quad (18)$$

где μ — произведение гравитационной постоянной на массу притягивающего тела, называемое гравитационным параметром. Для Земли $\mu = 3,98602 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$.

Далее

$$\frac{d\vartheta^2}{dt} = -\frac{2\mu}{r^2} \frac{dr}{dt}. \quad (19)$$

После дифференцирования уравнения получим

$$\frac{d\vartheta^2}{dt} = -\frac{2c_1^2}{\rho r^2} \frac{dr}{dt}. \quad (20)$$

Для эллиптической орбиты скорость движения спутника будет определяться следующей формулой:

$$v = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}. \quad (21)$$

В случае круговой орбиты, т. е. при $r=a$, скорость движения спутника определится формулой

$$v_{\text{кр}} = \sqrt{\mu/r}. \quad (22)$$

Круговую скорость можно определить для любого расстояния r от центра Земли или для любой точки орбиты, имеющей высоту H над земной поверхностью,

$$H = r - r_0, \quad (23)$$

где r_0 — средний радиус Земли, равный 6371 км.

На поверхности Земли $H=0$, $r_0=r$ и круговая скорость равна 7,91 км/с. В связи с влиянием на движение КЛА сопротивления атмосферы круговая орбита вблизи Земли неосуществима. При теоретических расчетах первой космической скоростью называют скорость КЛА на стандартной орбите на высоте 200 км

над Землей. Она равна 7,79 км/с. Эта скорость входит в расчеты интервала фотографирования при выполнении космических съемок, определения геометрического сдвига изображения и др.

Движение спутника по эллиптической орбите происходит с переменной скоростью, которая в соответствии с законом Кеплера достигает максимального значения в перигее и минимального — в апогее.

В случае если эллиптическая орбита имеет предельно вытянутую форму, т. е. $a \rightarrow \infty$, получим

$$v_{\text{осв}} = \sqrt{2\mu/r}. \quad (24)$$

КЛА, находящийся на такой орбите, имеет скорость, необходимую для освобождения от поля тяготения Земли ($v_{\text{осв}}$). Эта скорость называется второй космической. Она равна 11,02 км/с для $H=200$ км, $r=r_0=6371$ км. Вторая космическая скорость (параболическая) $v_{\text{осв}}=v_{\text{кр}}\sqrt{2} \approx 1,41 v_{\text{кр}}$. Скорость освобождения от поля тяготения Луны равна 2,4 км/с, т. е. почти в пять раз меньше, чем у Земли.

Период обращения спутника определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} a^3. \quad (25)$$

Математическим выражением третьего закона Кеплера является формула

$$T^2/a^3 = 4\pi^2/\mu = \text{const}. \quad (26)$$

Для круговой орбиты, когда $e=0$, $a=r$, формула примет вид

$$T_{\text{кр}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\mu}} r^3. \quad (27)$$

На движение спутника в пределах атмосферы влияет ее сопротивление — КЛА постепенно снижается. Период от момента выведения спутника на орбиту до полного торможения в плотных слоях атмосферы называется временем его существования. Оно зависит также от возмущающих воздействий Луны и Солнца и в значительной степени определяется высотой орбиты спутника.

Так, на высоте более 42 000 км спутник, не испытывая торможения вследствие влияния атмосферы, может оказаться (при определенных параметрах орбиты) вечным спутником Земли.

§ 17. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ИСЗ. НЕВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

На спутник, движущийся по околоземной орбите, действует сила притяжения Земли и других небесных тел. Предположим, однако, что только Земля обладает свойством притягивать тела, и не будем принимать во внимание другие силы: влияние ат-

мосферы, солнечное давление и т. д. Известно, что в этом случае, согласно законам механики, сила притяжения будет пропорциональна произведению масс Земли и спутника и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Если на спутник действует только одна центральная сила гравитационного притяжения, то движение спутника под действием этой силы называют невозмущенным. Пусть m_1 и m_2 — масса Земли и масса спутника соответственно, $m_1 + m_2 = M$ — их общая масса. Выберем произвольную систему координат и рассмотрим невозмущенное движение спутника в центральном поле тяготения Земли:

$$F' = F'' = F = \gamma \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2, \quad (28)$$

где F' , F'' , F — величина (модуль) сил взаимного притяжения; $\gamma = 6,668 \cdot 10^{-3} \text{ см}^2/(\text{г} \cdot \text{с}^2)$, γ — коэффициент пропорциональности, называемый универсальной гравитационной постоянной; r — расстояние между центрами масс.

С учетом гравитационного параметра μ , характеризующего поле тяготения данного небесного тела, формулу можно записать

$$F = \mu m_2 / r^2, \quad (29)$$

где

$$\mu = \gamma \cdot m_1. \quad (30)$$

Для Земли $\mu = 3,98602 \cdot 10^{14} \text{ м}^3/\text{с}^2$.

Сила F направлена по прямой, соединяющей центры масс m_1 и m_2 . Обозначим координаты спутника в неподвижной системе координат x' , y' , z' .

Проекции силы F на соответствующие оси X , Y , Z будут равны

$$\left. \begin{aligned} F'_x &= F \cos(\hat{x}_r) = F \frac{x'' - x'}{r} = -\gamma m_2 \frac{x' - x''}{r^3} \\ F'_y &= F \cos(\hat{y}_r) = -\gamma m_2 \frac{y' - y''}{r^3} \\ F'_z &= F \cos(\hat{z}_r) = -\gamma m_2 \frac{z' - z''}{r^3} \end{aligned} \right\}. \quad (31)$$

Мы условились, что никакие другие силы, кроме сил взаимного притяжения, на массы m_1 и m_2 не действуют. Согласно второму закону Ньютона, дифференциальные уравнения движения Земли в неподвижной системе координат имеют вид

$$\left. \begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x'}{dt^2} &= -\gamma m_1 \frac{x' - x''}{r^3}, & m_1 \frac{d^2 y'}{dt^2} &= -\gamma m_1 \frac{y' - y''}{r^3} \\ m_1 \frac{d^2 z'}{dt^2} &= -\gamma m_1 \frac{z' - z''}{r^3} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

и аналогично для массы m_2

$$\left. \begin{aligned} m_2 \frac{d^2 x''}{dt^2} &= -\gamma m_2 \frac{x'' - x'}{r^3} \\ m_2 \frac{d^2 y''}{dt^2} &= -\gamma m_2 \frac{y'' - y'}{r^3} \\ m_2 \frac{d^2 z''}{dt^2} &= -\gamma m_2 \frac{z'' - z'}{r^3} \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

Обозначим координаты центра спутника относительно центра Земли через x, y, z :

$$x = x'' - x'; \quad y = y'' - y'; \quad z = z'' - z'. \quad (34)$$

Вычитая почленно из уравнений (33) уравнения (32) и сократив их на m_1 и m_2 , получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 (x'' - x')}{dt^2} &= -\gamma (m_1 + m_2) \frac{x'' - x'}{r^3} \\ \frac{d^2 (y'' - y')}{dt^2} &= -\gamma (m_1 + m_2) \frac{y'' - y'}{r^3} \\ \frac{d^2 (z'' - z')}{dt^2} &= -\gamma (m_1 + m_2) \frac{z'' - z'}{r^3} \end{aligned} \right\} \quad (35)$$

Учитывая, что $m_1 + m_2 = M$, запишем

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\gamma M \frac{x}{r^3} \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= -\gamma M \frac{y}{r^3} \\ \frac{d^2 z}{dt^2} &= -\gamma M \frac{z}{r^3} \end{aligned} \right\} \quad (36)$$

Так как масса спутника пренебрежимо мала по сравнению с массой Земли, то за M принимают m_1 . Однако когда изучается движение естественных спутников, следует учитывать, что отличие M от m_1 весьма существенно.

Пассивное движение ИСЗ в центральном поле тяготения планеты называют иногда кеплеровым движением. Немецкий ученый И. Кеплер (1571—1630 гг.) впервые описал законы движения материальной точки в сфере действия (притяжения) некоторого тела (планеты).

Плоскость, в которой происходит движение ИСЗ, называют орбитальной, а ее положение задается уравнением

$$\sigma_1 x + \sigma_2 y + \sigma_3 z = 0. \quad (37)$$

Его можно получить, умножив первое уравнение (36) на y , второе — на x и произведя вычитание:

$$y \frac{d^2x}{dt^2} - x \frac{d^2y}{dt^2} = 0. \quad (38)$$

По аналогии получим уравнения

$$z \frac{d^2y}{dt^2} - y \frac{d^2z}{dt^2} = 0; \quad x \frac{d^2z}{dt^2} - z \frac{d^2x}{dt^2} = 0, \quad (39)$$

после интегрирования получим

$$\left. \begin{aligned} y \frac{dx}{dt} - x \frac{dy}{dt} &= \sigma_1 \\ z \frac{dy}{dt} - y \frac{dz}{dt} &= \sigma_2 \\ x \frac{dz}{dt} - z \frac{dx}{dt} &= \sigma_3 \end{aligned} \right\}, \quad (40)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ — постоянные интегрирования.

Далее, умножив первое уравнение системы (40) на z , второе — на x , третье — на y и сложив все уравнения, получим

$$\sigma_1 x + \sigma_2 y + \sigma_3 z = 0. \quad (41)$$

Из уравнения (41) следует, что орбитальная плоскость проходит через центр Земли ($x=y=z=0$).

§ 18. ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ДВИЖЕНИЕ СПУТНИКА ПО ОРБИТЕ. ВОЗМУЩЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ

Истинные параметры движения ИСЗ по орбите отличаются от рассчитанных по формулам невозмущенного движения. На спутник действуют силы, возмущающие его движение. Сюда относятся сила притяжения Луны, Солнца и планет солнечной системы, отличие реального гравитационного поля Земли от центрального, световое давление, аэродинамические и электромагнитные силы и т. д.

Во время полета спутника могут возникнуть и кратковременные (импульсные) возмущения из-за ударов метеоритных тел, притяжения других ИСЗ.

Равнодействующая всех сил (F), действующих на спутник во время его движения по орбите, будет равна

$$F = F_{\text{гл}} + F_{\text{в}}, \quad (42)$$

где $F_{\text{гл}}$ — сила, с которой спутник притягивается к центральному телу; $F_{\text{в}}$ — суммарная возмущающая сила.

Сила $F_{\text{гл}}$ — основная, главная сила, определяемая массой центрального тела M и радиусом-вектором \vec{r} . Ускорение, которое сила $F_{\text{в}}$ придает спутнику, называется возмущающим уско-

рением. Дифференциальные уравнения возмущенного движения спутника в абсолютной прямоугольной системе координат будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= -\gamma M \frac{x}{r^3} + \frac{F_x}{m_2} \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\gamma M \frac{y}{r^3} + \frac{F_y}{m_2} \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= -\gamma M \frac{z}{r^3} + \frac{F_z}{m_2} \end{aligned} \right\}, \quad (43)$$

где F_x, F_y, F_z — проекции возмущающего ускорения на оси координат X, Y, Z .

Учет влияния возмущающих сил обычно производят методом разложения в ряд правых частей дифференциальных уравнений с последующим почленным аналитическим (или численным) интегрированием данных рядов. В результате получают аналитические выражения, с помощью которых возмущения можно вычислить введением времени или его функции. Значительное влияние на параметры орбиты оказывает атмосфера: так как ее сопротивление движению КЛА является постоянно действующей силой, то даже при больших высотах полета необходимо учитывать это возмущение.

Известна формула, по которой определяют величину сопротивления атмосферы R :

$$R = C_x \rho \frac{v^2}{2} S, \quad (44)$$

где C_x — коэффициент лобового сопротивления; ρ — плотность атмосферы на высоте полета КЛА; S — площадь миделева сечения.

Следует отметить, что влияние атмосферы может привести к изменению вида орбиты: период обращения КЛА будет монотонно убывать, следовательно, уменьшится большая полуось орбиты и эксцентриситет — орбита будет стремиться к круговой.

§ 19. УЧЕТ ОСВЕЩЕННОСТИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ВРЕМЕНИ ЗАПУСКА КЛА

В зависимости от назначения спутники Земли используются для выполнения разнообразных задач. Одни из этих задач могут быть решены с помощью одного или нескольких ИСЗ, а другие с помощью даже нескольких десятков спутников, ориентированных определенным образом как относительно друг друга, так и относительно Солнца, планет или звезд. Требуемая ориентация плоскостей орбит в пространстве обеспечи-

вается запуском спутников в определенное время и местом старта. В связи с этим могут возникнуть случаи, когда необходимо осуществить:

запуск одного спутника в плоскость орбиты, как ориентированную, так и произвольно расположенную в пространстве относительно Солнца, планет или звезд;

запуск нескольких ИСЗ для создания системы из λ плоскостей орбит, в каждой из которых находится по одному спутнику;

запуск нескольких ИСЗ для создания системы, состоящей из λ плоскостей орбит, в каждой из которых находится по n спутников.

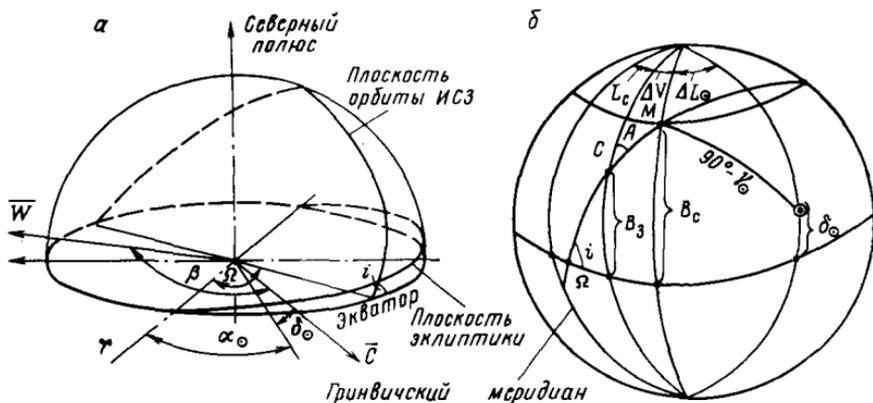


Рис. 16.

Во втором и третьем случаях системы ИСЗ могут быть как ориентированы, так и не ориентированы относительно Солнца, планет или звезд.

Ориентация плоскости орбиты относительно Солнца (планеты) определяется углом β , заключенным между вектором \overline{W} , перпендикулярным к плоскости орбиты, и вектором \overline{C} , направленным из центра Земли на Солнце (планету) (см. рис. 16, а).

Положение вектора \overline{W} определяется наклонением i и восходящим узлом орбиты Ω , положение вектора \overline{C} — углом прямого восхождения α_0 и углом склонения δ_0 Солнца (планеты). Скалярное произведение единичных векторов $\overline{W}(i\Omega)$ и $\overline{C}(\alpha_0\delta_0)$ позволяет найти угол между этими векторами:

$$\cos \beta = \sin i \cos \delta_0 \sin(\Omega - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cos i, \quad (0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ). \quad (45)$$

Ориентация плоскостей орбит считается положительной при $\beta > 90^\circ$ и отрицательной при $\beta < 90^\circ$.

Положение плоскости орбиты относительно любой другой плоскости определяется по аналогии с (45) некоторым углом

ψ_j (где j — номер плоскости). Ориентация плоскостей относительно плоскости отсчета считается отрицательной, если отсчет углов ψ_j ведется от восходящего узла плоскости отсчета по часовой стрелке, и положительной, если отсчет ведется против часовой стрелки (смотря на плоскость экватора с северного полюса).

С течением времени вследствие прецессии орбит и перемещения Земли вместе с орбитами относительно Солнца (планеты) угол β изменяется.

Время запуска спутника в плоскость орбиты с наклонением i и узлом Ω определяется по формуле

$$t_0 = \frac{\Omega + \Delta L - L_0 - S_0}{\omega_3} + M_0 - \tau_\alpha, \quad (46)$$

где S_0 — среднее звездное время в гринвичскую полночь, берется из Астрономического ежегодника на дату пуска; $\Delta L = \arcsin(\operatorname{tg} B_0 / \operatorname{tg} i)$, B_0 и L_0 — геодезические широта и долгота точки выведения; $M_0 = N_{\text{п}} + t_{\text{д}}$ — постоянная времени, учитывающая номер пояса $N_{\text{п}}$, принятого при отсчете времени, и декретное время $t_{\text{д}}$ (для московского времени $M_0 = 3^h$); τ_α — продолжительность активного участка траектории выведения.

Время запуска спутника в плоскость орбиты, угол ориентации которой составляет $\beta \leq \arccos[\sin(i + \delta_\odot)]$, вычисляется по формуле

$$t_0 = \frac{\alpha_\odot + \Delta L + \Delta\alpha - L_0 - S_0}{\omega_3} + M_0 - \tau_\alpha, \quad (47)$$

здесь

$$\Delta\alpha = \arcsin\left(\frac{\cos \beta - \sin \delta_\odot \cos i}{\sin i \cos \delta_\odot}\right), \quad (48)$$

α_\odot и δ_\odot — угол прямого восхождения и угол склонения Солнца (планеты), берутся из Астрономического ежегодника на дату пуска.

Время запуска t_0 спутника в плоскость орбиты с наклонением i вычисляется по формуле (47); при этом принимается $\beta = 90^\circ$, т. е. $\Delta\alpha = \arcsin(\operatorname{tg} \delta_\odot \operatorname{ctg} i)$.

Время запуска спутника в плоскость, восходящий узел которой расположен от восходящего узла плоскости отсчета на угловом расстоянии ψ , вычисляется по формуле:

при положительной ориентации плоскости орбиты

$$t = t_0 + m_0 P_{\text{зв}} \left(1 - \frac{\Delta\psi}{2\pi - \Delta\psi}\right) + \frac{\psi P_{\text{зв}}}{2\pi + \Delta\psi} = t_0 + \frac{t_{\text{зв}}}{1 + \frac{\Delta\psi}{2\pi}} \left(m_0 + \frac{\psi}{2\pi}\right); \quad (49)$$

при отрицательной ориентации плоскости орбиты

$$t = t_0 + m_0 P_{зв} \left(1 - \frac{\Delta\psi}{2\pi}\right) + \frac{\psi P_{зв}}{2\pi} \left(\frac{\Delta\psi}{2\pi} - 1\right) = \\ = t_0 + P_{зв} \left(m_0 - \frac{\psi}{2\pi}\right) - \left(1 - \frac{\Delta\psi}{2\pi}\right), \quad (50)$$

где величина m_0 находится по следующему правилу: $m_0=0$ при $\Delta\tau \leq \Psi/15$; $m_0=1$ при $\Psi/15 < \Delta\tau \leq 24^h$; $m_0=2$ при $24^h < \Delta\tau \leq 48^h$; $m_0=3$ при $48^h < \Delta\tau \leq 72^h$ и т. д.; ψ имеет размерность градусы; $P_{зв}$ — продолжительность звездных суток; $\Delta\tau$ — время подготовки ракеты-носителя, спутника и пусковой установки к очередному пуску в часах; $\Delta\psi = c \cos i P_{зв}/T$; T — период обращения ИСЗ.

Если спутник предназначен для наблюдения поверхности Земли в видимой части спектра, то время запуска должно выбираться с учетом освещенности заданных районов поверхности Земли Солнцем. Освещенность поверхности Земли будет характеризоваться углом места Солнца ν_{\odot} в точке наблюдения. Значение угла места больше некоторого минимального значения $\nu_{\odot \min}$ обеспечивается выбором времени запуска.

На рис. 16, б показаны точка старта C , трасса полета КЛА, точка M , находящаяся на заданной широте наблюдения B_3 , и проекция Солнца на сферу.

Минимальное $t'_{C \min}$ и максимальное $t'_{C \max}$ значения местного времени в точке старта C , при которых обеспечивается освещенность поверхности Земли на заданной широте B_3 , определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} t'_{C \min} &= 12^h - \Delta V - \Delta L_{\odot \max} \\ t'_{C \max} &= 12^h - \Delta V + \Delta L_{\odot \max} \end{aligned} \right\}, \quad (51)$$

здесь

$$\Delta L_{\odot \max} = \arccos \frac{\sin \nu_{\odot \min} - \sin B_3 \sin \delta_{\odot}}{\cos B_3 \cos \delta_{\odot}}, \quad (52)$$

δ_{\odot} — склонение Солнца;

$$\Delta V = \arccos \frac{\cos \Delta u - \sin B_C \sin B_3}{\cos B_C - \cos B_3}, \quad (53)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= u_3 - u_C \\ u_3 &= \arcsin \frac{\sin B_3}{\sin i} \\ u_C &= \arcsin \frac{\sin B_C}{\sin i} \end{aligned} \right\}, \quad (54)$$

B_C — широта точки старта; u_3 и u_C — аргументы широты заданных районов и точки старта.

По формулам (54) значения u будут получаться всегда в I или IV четвертях.

Для приведения углов u_3 и u_C к истинному значению используются зависимости:

для восходящего витка	$270^\circ \leq u_3 \leq 90^\circ$,
для нисходящего витка	$90^\circ \leq u_3 \leq 270^\circ$,
при $270^\circ \leq A \leq 90^\circ$	$0^\circ \leq u_C \leq 90^\circ$,
при $270^\circ \geq A \geq 90^\circ$	$180^\circ \geq u_C \geq 90^\circ$.

Здесь A — азимут запуска.

На практике удобнее пользоваться не местным временем, а гринвичским или московским, для чего необходимо определить максимальное и минимальное значения среднего солнечного времени на гринвичском меридиане:

$$\left. \begin{aligned} t_{C \min}^{\text{rp}} &= 12^{\text{h}} - L_C - \Delta V - \Delta L_{\odot \max} \\ t_{C \max}^{\text{rp}} &= 12^{\text{h}} - L_C - \Delta V + \Delta L_{\odot \max} \end{aligned} \right\} \quad (55)$$

где L_C — долгота точки старта.

Выражения для московского времени старта:

$$\left. \begin{aligned} t_{C \min} &= 15^{\text{h}} - L_C - \Delta V - \Delta L_{\odot \max} \\ t_{C \max} &= 15^{\text{h}} - L_C - \Delta V + \Delta L_{\odot \max} \end{aligned} \right\} \quad (56)$$

Приведенные формулы не содержат уравнения времени, которое при необходимости может быть легко учтено. Это допущение дает ошибку в угле места Солнца менее 4° , что в большинстве случаев вполне приемлемо, поскольку возможность обзора местности или облачного покрова Земли в значительной степени зависит также от характера поверхности Земли, угла (ИСЗ — «цель» — Солнце) и т. д. При проведении точных расчетов необходимо также в значение времени запуска вводить поправку, равную разности времени полета на активном участке выведения и по дуге орбиты от точки старта до точки выхода на орбиту.

Время освещенности поверхности Земли на восходящих или нисходящих витках при полете спутника может быть найдено из выражения

$$t_{\text{в0}} = 2\Delta L_{\odot \max} / \Delta L_{\odot \text{сут}}, \quad (57)$$

$$\Delta L_{\odot \text{сут}} = \Delta L'_{\odot \text{сут}} + \Delta \Omega, \quad (58)$$

где $\Delta L'_{\odot \text{сут}}$ — изменение прямого восхождения Солнца за одни сутки; $\Delta \Omega$ — прецессия узла орбиты за одни сутки.

Значения величин $\Delta L_{\odot \text{сут}}$ для «среднего Солнца» и круговых орбит с различными высотами полета приведены ниже:

i , градус	50	60	65	70	75	80
ΔL_{\odot} сут, градус/сутки, при:						
$H = 200$ км	6,8	5,5	4,8	4,1	3,3	2,6
$H = 1250$ км	4,4	3,7	3,3	2,8	2,4	1,9

§ 20. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ КОСМИЧЕСКОЙ ФОТОСЪЕМКИ

Космическая фотосъемка земной поверхности, планет Солнечной системы с использованием оптико-электронных средств и фотоматериалов производится в разных масштабах и при разных положениях оптической оси фотокамеры. Масштаб плановой космической фотосъемки определяется высотой полета КЛА и величиной фокусного расстояния космической съемочной камеры

$$1/m = f'/H, \quad (59)$$

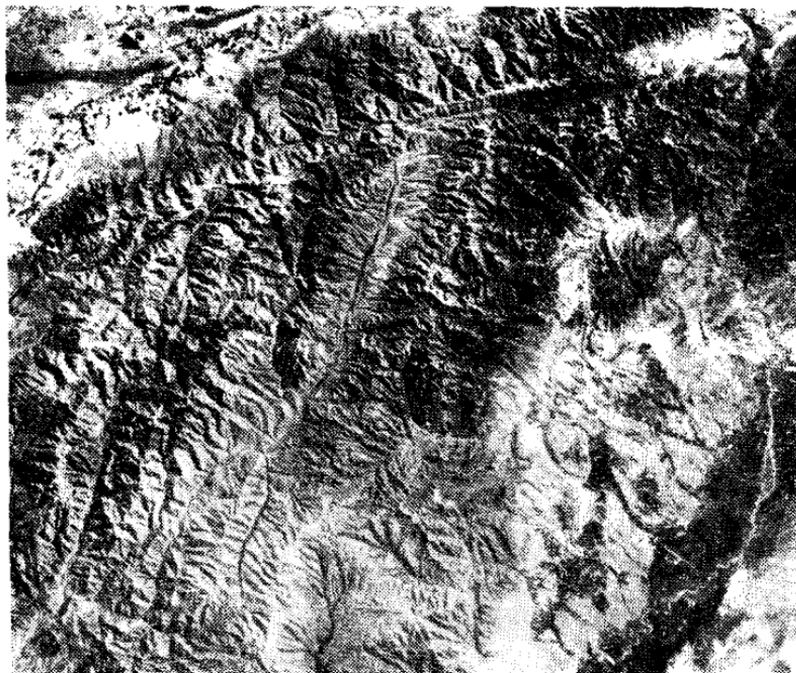


Рис. 17.

где H — расстояние до подспутниковой точки в момент экспонирования светочувствительного материала; m — знаменатель масштаба съемки.

Положение оптической оси определяет метод фотографирования. Плановое фотографирование выполняют при положении оптической оси, направленной на центр Земли. Примером плановой космической съемки является фотоснимок, полученный при полете ОПС «Салют-5» (рис. 17).

С орбитальной пилотируемой станции «Салют-5» была проведена в 1976 году плановая фотосъемка участка западных отрогов Тянь-Шаня с высоты 262 км. Рельеф местности на снимке характеризуется густой сетью долин, глубокими гребневидными водоразделами, крутыми склонами, разломами земной коры. Видны различия ландшафтов в зависимости от высоты местности. С юго-востока горный массив ограничен межгорной Ферганской долиной, покрытой растительностью. По снимкам составлены геологические карты, выделены зоны лавиноопасных районов, прослежено направление Таласского разлома, определены зоны альпийских лугов, площадь ледников и т. д.

Космическая съемка, при которой оптическая ось фотоаппаратной камеры составляет с вертикалью некоторый угол ($\gamma > 10^\circ$), называется перспективной.

При перспективной космической съемке заданный угол γ создается или отклонением оптической оси от вертикали, или установкой космической камеры под заданным углом к плоскости иллюминатора. Масштаб изображения при перспективной космической съемке — величина переменная, для каждой точки определяемая зависимостью

$$1/m_i = dl/dL, \quad (60)$$

где dl — изображение отрезка на снимке; dL — длина отрезка на местности.

Примером перспективной космической съемки является снимок, полученный с орбитальной пилотируемой станции «Салют-3» (рис. 18).

На снимке изображены кольца-спирали облачных вихрей. Высота фотографирования 265 км. Мелкомасштабные снимки позволяют судить о характере процессов, протекающих в атмосфере, о распространении облачности на территории более 400 000 кв. км. Анализ приведенной фотографии позволил обнаружить зарождение крупного циклона на площади более 1500 кв. км, который оказывает огромное влияние на погодообразующие факторы, и составить долгосрочный прогноз погоды.

С орбиты КЛА выполняют одномаршрутное или многомаршрутное фотографирование. Многомаршрутным называют фотографирование, когда во время полета КЛА на каждом витке получают один маршрут, причем последовательные маршруты перекрываются между собой. Перекрытием называют части двух соседних космических снимков с изображением одного и того же участка местности. Продольное перекрытие P космических снимков — в направлении полета КЛА, поперечное Q — в направлении, перпендикулярном к направлению полета КЛА. Промежуток времени между моментами начала выдержек двух последовательных кадров при маршрутной космической съемке,

необходимый для получения заданной величины продольного перекрытия, называется интервалом фотографирования τ . Отношение величины перекрытия к линейному размеру космического снимка в том же направлении определяется коэффициентами перекрытия K_p и K_q .

Основные геометрические съемочные параметры — высоту съемки, продольное и поперечное перекрытия, площадь снимаемой поверхности — рассчитывают с учетом фотограмметриче-

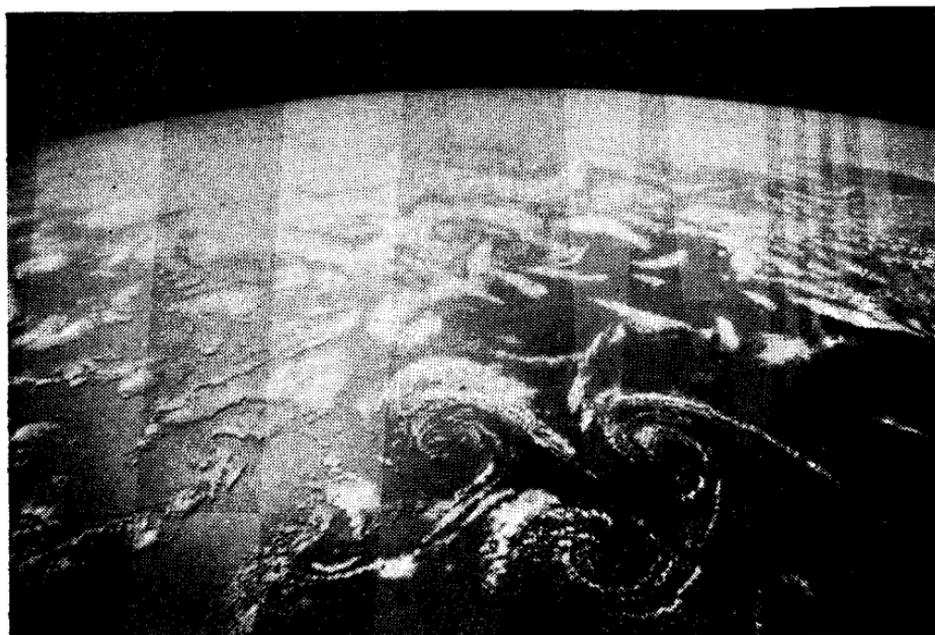


Рис. 18.

ских требований к материалам космической съемки. Аналитическое представление этих параметров значительно усложняется по сравнению с методом аэросъемки. Общая формула для определения продольного и поперечного перекрытий снимков для случая космической съемки с круговой орбиты имеет следующий вид:

$$P\% = \left(\frac{2\theta - \varepsilon}{2\theta} 100\% \right) = \left\{ 1 - \frac{\varepsilon}{2 \left[\arcsin \left(\frac{H + R}{R} \sin \omega \right) - \omega \right]} \right\} 100\%. \quad (61)$$

На рис. 19 показаны зависимости, определяющие формулу (61). При съемке с орбиты, близкой к круговой, имеем ряд

центров проектирования S_1, S_2, \dots, S_i ; H — высота полета КЛА; L_1, L_2, \dots, L_i — последовательно перекрывающиеся космические снимки; 2ω — угол поля зрения космической съемочной камеры; ε_i — величины планетоцентрических углов между последующими кадрами; R — радиус Земли.

Максимальная возможность охвата поверхности планеты одним снимком обеспечивается при условии

$$\sin \omega_{\max} = R/H + R. \quad (62)$$

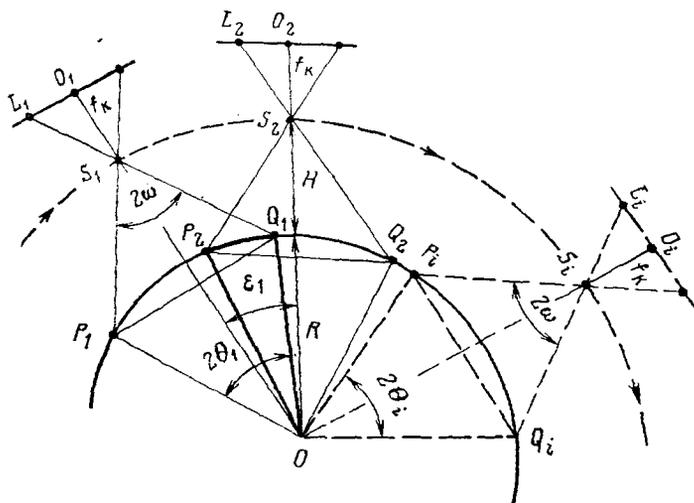


Рис. 19.

В этом случае боковые проектирующие лучи касаются ее поверхности и значение угла θ максимальное. Вся снимаемая поверхность лежит в пределах круга, радиус которого равен R_{Φ} :

$$R_{\Phi} = R \cdot \sin \theta_{\max}. \quad (63)$$

Определение продольного перекрытия снимков требует учета вращения Земли. В этом случае формула для перекрытия вдоль направления движения КЛА по орбите будет иметь вид

$$P_x = \left\{ 1 - \frac{\varepsilon_x}{2 \left[\arcsin \left(\frac{H+R}{R} \sin \omega \right) - \omega \right]} \right\} 100\%,$$

где ε_x — планетоцентрический угол, определяемый по формуле

$$\varepsilon_x = \frac{\tau}{T_{\text{КЛА}}} \cdot 360^\circ,$$

$T_{КА}$ — период обращения КЛА вокруг планеты; τ — интервал времени между последующими экспозициями.

Формулы (64) и (65) справедливы при рассмотрении гипотетического полета относительно невращающейся Земли. В действительности, вследствие вращения Земли, необходимо рассматривать движение КЛА не в абсолютной неподвижной системе координат, а относительно поверхности Земли, ибо именно этой скоростью определяется величина интервала фотографирования при заданном продольном перекрытии космических снимков.

Формула для определения скорости КЛА относительно земной поверхности может быть получена из геометрических зависимостей (рис. 20). На рис. 20: Ω — долгота восходящего узла орбиты КЛА; i — наклонение орбиты; \vec{W} — вектор скорости полета КЛА относительно поверхности Земли; \vec{V}_1 — проекция вектора \vec{W} на поверхность Земли; \vec{V}_2 — вектор линейной скорости суточного вращения подспутниковой точки; φ — широта подспутниковой точки.

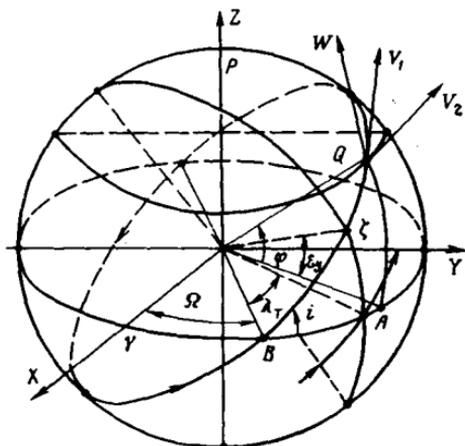


Рис. 20.

Очевидно, что

$$\vec{W} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2. \quad (66)$$

Скорость перемещения КЛА относительно поверхности Земли, т. е. путевая скорость V_1 носителя, может быть определена по формуле

$$V_1 = \frac{R}{R + H} V, \quad (67)$$

где V — орбитальная скорость.

Для круговой орбиты модуль вектора орбитальной скорости определяется по формуле

$$V^k = 2\pi \frac{R + H}{T_{КА}}, \quad (68)$$

где $T_{КА}$ — период обращения КЛА.

В этом случае формула (68) примет вид

$$V_1^k = 2\pi R / T_{КА}. \quad (69)$$

Модуль вектора линейной скорости суточного вращения точки Земли, в которую проектируется в данный момент КЛА, можно определить из формулы

$$V_2 = 2\pi \frac{R \cos \varphi}{T_3}, \quad (70)$$

где T_3 — период вращения Земли.

С учетом формул (69) и (70) на базе формулы (66) и теоремы косинусов получим модуль вектора путевой скорости носителя для круговой орбиты:

$$W^k = 2\pi R \sqrt{\frac{1}{T_{КА}^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{T_3^2} - \frac{2 \cos \varphi \cdot \cos \gamma}{T_{КА} \cdot T_3}}, \quad (71)$$

где угол γ определяется в соответствии с формулой

$$\operatorname{tg} \gamma = \cos^2 \varphi \sqrt{\operatorname{tg}^2 i - \operatorname{tg}^2 \varphi}. \quad (72)$$

От путевой скорости носителя перейдем к его угловой скорости ω_k для момента пересечения подспутниковой точкой параллели с широтой φ : $\omega_k = \frac{W^k}{R}$. Окончательная формула для определения продольного перекрытия P_x , учитывающая вращение Земли и основные элементы орбиты, будет иметь следующий вид:

$$P_x \% = \left[1 - \frac{180^\circ t \sqrt{\frac{1}{T_{КА}^2} + \frac{\cos^2 \varphi}{T_3^2} - \frac{2 \cos \varphi \cos \gamma}{T_{КА} \cdot T_3}}}{\arcsin\left(\frac{H+R}{R} \sin \beta\right) - \beta} \right] 100 \%. \quad (73)$$

КЛА на новой высоте пройдет по новому маршруту, отстоящему по долготе от предыдущего маршрута на величину λ_T . В связи с этим поперечное перекрытие между маршрутами космической съемки обусловлено, главным образом, вращением Земли. Величину угла λ_T можно определить по формуле

$$\lambda_T = 2\pi \omega_3 \sqrt{(R+H)^3/\mu}, \quad (74)$$

где ω_3 — угловая скорость вращения Земли; μ — гравитационный параметр Земли.

Минимальное поперечное перекрытие будет в момент пересечения подспутниковой точкой экватора, ибо в этом случае величина угла λ_T будет максимальной. Заметим, что для определения величины поперечного перекрытия между маршрутами орбитальной съемки по общей формуле перекрытия (61) необходимо знать величину угла ϵ_y (см. рис. 20).

Имеем: A — точка пересечения подспутниковой точкой экватора на предыдущем витке; B — точка пересечения подспутниковой точкой экватора на последующем витке.

Определим значение угла ε_y :

$$\sin \varepsilon_y^m = \sin \lambda_T \sin i. \quad (75)$$

Анализ формулы (75) показывает, что наиболее слабым местом при обеспечении необходимого процента поперечного перекрытия является область экватора.

Очевидно, что значение угла ε_y^m , определенное по формуле (75), справедливо только для экватора. Для всех широт, отличных от нуля, вместо угла наклона орбиты i , следует брать угол γ' , т. е. угол между проекцией траектории движения КЛА на вращающуюся Землю и параллельно с широтой φ . Для определения угла γ' можно использовать следующую формулу:

$$\operatorname{ctg} \gamma' = \frac{1}{[\sqrt{1 - \operatorname{tg}^2 \varphi / \operatorname{tg}^2 i}] \operatorname{tg} i \cos^2 \varphi} - \frac{\omega_3 T_{\text{КА}} \cos \varphi}{2\pi \sqrt{[1 - \sin^2 \varphi / \sin^2 i]} \sin i}. \quad (76)$$

Вследствие вращения Земли подспутниковая точка пересекает экватор не под углом i , а под некоторым углом i' , значение которого можно получить как частный случай формулы (76) для широты $\varphi = 0$:

$$\operatorname{ctg} i' = \operatorname{cosec} i (\cos i - T_{\text{КА}} : T_3). \quad (77)$$

Кроме того, длина дуги λ_T в линейной мере различна для различных широт и приближенное изменение ее длины пропорционально косинусу широты, т. е.:

$$\lambda_T' = \lambda_T \cos \varphi. \quad (78)$$

Итак, поперечное перекрытие между маршрутами орбитальной фотосъемки определяется на основе формулы (61) при условии, что значение угла ε_y равно

$$\sin \varepsilon_y = \sin \lambda_T' \cdot \sin \gamma', \quad (79)$$

где λ_T' — определяется (78), а γ' — из (76).

Для орбит, значительно отличающихся от круговых, например эллиптических, исходная общая формула (61) для определения продольного и поперечного перекрытий космических снимков изменится.

В этом случае

$$P' \% = [1 + (\theta'_{i+1} - \theta'_i - \varepsilon'_i) : 2\theta'_{i+1}] 100 \%. \quad (80)$$

Значение планетоцентрических углов θ_i , входящих в формулу (80), можно определить следующим образом:

$$\theta_i' = \arcsin\left(\frac{H+R}{R} \sin \omega\right) - \omega, \quad (81)$$

где $H+R=r$ — расстояние от центра притяжения до КЛА на орбите — определяется из соотношений между элементами эллиптической орбиты:

$$H+R=r = p/(1+e \cos v), \quad (82)$$

причем p — параметр орбиты, e — ее эксцентриситет, v — истинная аномалия.

Заметим, что в этом случае планетоцентрический угол θ_i' между последующими экспозициями является функцией угловой скорости полета КЛА по эллиптической орбите при $H+R \neq \text{const}$ в отличие от орбиты, близкой к круговой, где $H+R$ принимает const .

Глава III

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 21. КЛАССИФИКАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ КАМЕР

Классификация космических съемочных камер (КСК) определяется их назначением, методом проведения съемки, геометрическими параметрами. Основные типы КСК приведены на рис. 21.

Качественные показатели КСК определяют измерительные и дешифровочные свойства космического негатива; конструктивные и эксплуатационные данные КСК определяют ее массу, габариты, энергопотребление, возможности размещения на борту КЛА. Классификация съемочной аппаратуры по качественным показателям актуальна и сложна из-за большого количества вариантов съемочной аппаратуры, определяющих возможности решения одних и тех же задач разными типами камер.

Фотосъемочные космические камеры могут быть выделены в обособленные группы с некоторой степенью условности. При разделении КСК целесообразно учитывать наиболее характерные признаки, определяющие основные требования на комплект фотосъемочного оборудования для того или иного вида работ, связанных с исследованием природных ресурсов Земли и вы-

полнением космических фотосъемок других планет в широком спектральном диапазоне.

Приведенная классификация основана на выделении признаков, максимально учитывающих целевые, методические и конструктивные особенности КСК и связь этих особенностей с условиями космического полета.

Космические камеры по назначению материалов съемки можно подразделять на четыре основные группы: топографические (ТКСК), дешифровочные (ДКСК), звездные (ЗКСК) и многозональные космические съемочные камеры (МКСК).

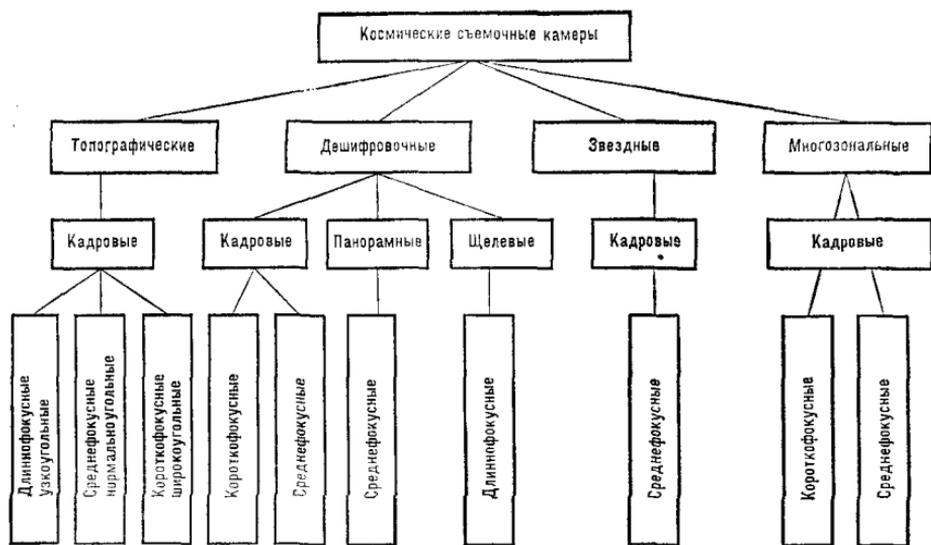


Рис. 21.

К каждому из четырех видов КСК предъявляются специальные требования, характерные только для данного вида, и общие, характерные для всех типов камер. К специальным требованиям относят точность передачи геометрии объекта съемки и качество передачи контраста объекта. Указанные требования в некоторой степени противоречивы, поэтому оптимальные параметры КСК могут быть определены для конкретных съемочных условий на основе математического моделирования системы.

Топографические космические съемочные камеры предназначены для получения плановых фотоснимков, пригодных для создания топографических карт земной и лунной поверхности стереофотограмметрическим методом. Измерительные свойства космических негативов должны позволять определять координаты точек со средней квадратической ошибкой не более ± 10 мкм в масштабе изображения. Ошибки от невыравнива-

ния пленки в плоскость должны быть не более $\pm 0,01$ мм, при этом в камере должно быть обеспечено впечатывание по краю негатива или по полю оптических меток для определения величины деформации, положения центра негатива и направления съемки. Фотозатвор ТКСК не должен вносить геометрических искажений при построении изображения объекта.

Дешифровочные камеры (ДКСК) предназначены для получения снимков, пригодных для составления тематических карт, фотопланов и фотосхем, и проведения комплекса работ по распознаванию объектов съемки. Как правило, дешифровочные камеры имеют фокусное расстояние более 300 мм и большие размеры кадра. В дешифровочных камерах несколько снижены требования к величине дисторсии и точности выравнивания пленки в плоскость.

ДКСК позволяют получать плановые и перспективные снимки.

Для перспективного фотографирования характерно значительное изменение масштаба от одного края снимка к другому, что требует применять при обработке специальные фототрансформаторы. Однако значительно больший захват фотографируемой местности приводит к тому, что в ДКСК использование перспективного способа проектирования является доминирующим фактором.

Панорамное фотографирование основано на сканировании объективом ДКСК местности перпендикулярно к направлению полета КЛА, причем «раствор» луча сканирования может достигать больших величин (до 140°). Панорамные ДКСК сочетают в себе преимущества высокого разрешения с захватом широкой полосы на местности. Размер площадки сканирования по направлению полосы определяет ширину кадра, поперек — длину. Длина изображения (кадра) в несколько раз больше ширины. Панорамное фотографирование производят как с больших, так и с малых высот. Совершенствование аналитических методов фотограмметрической обработки снимков в связи с широким внедрением ЭЦВМ позволяет преодолеть основной недостаток панорамных снимков — гиперболический рост масштаба от центра к краям изображения, а также дает возможность учесть некоторые специфические виды дисторсии, характерные только для панорамного фотографирования.

Панорамные снимки имеют дисторсию сканирования, которая вызывается смещением точек по направлению полета из-за движения КЛА, панорамную дисторсию при проектировании плоскости на цилиндрическую поверхность и дисторсию компенсации сдвига изображения, возникающую вследствие смещения точек на цилиндрической поверхности в результате одновременного перемещения объектива и пленки.

Звездные космические съемочные камеры (ЗКСК) обеспечивают получение снимков с изображением звездного неба, по

которым определяют координаты КЛА в заданной системе координат и точную ориентацию носителя в период работы топографической камеры. Негативы, полученные при съемке звездной камерой, должны обеспечивать возможность измерения координат звезд со средней квадратической ошибкой 5 мкм. Размеры кадра, фокусное расстояние ЗКСК выбирают, исходя из условия получения необходимого количества изображения звезд на одном кадре, обеспечивающего точность решения задач.

Многозональные космические съемочные камеры (МКСК) предназначены для одновременной съемки объектов земной поверхности в разных зонах спектра. Космическая съемка может быть выполнена одной камерой с несколькими объективами на одну и ту же пленку, с применением узких зональных фильтров или несколькими камерами на разные типы пленок с применением узких зональных фильтров для каждой пленки.

Фокусное расстояние объектива космической съемочной камеры является одним из основных параметров, по которому производят классификацию аппаратуры. В ТКСК применяют только высококачественную оптику, что накладывает соответствующие ограничения при расчете объективов и сужает диапазон камер с различными фокусными расстояниями. Ограничения по величине дисторсии, разрешающей способности объектива позволили создать топографические камеры с фокусным расстоянием $f=50-200$ мм.

В ДКСК величина фокусного расстояния изменяется в больших пределах (30—3000 мм).

Многозональные камеры имеют средние фокусные расстояния в пределах 100—200 мм, что позволяет производить одновременную съемку в разных спектральных зонах больших площадок. Космические звездные камеры должны иметь большую светосилу, необходимый захват участка звездного неба. С учетом разносторонних требований оптимальное фокусное расстояние ЗКСК $f=150-200$ мм.

Все КСК с фокусным расстоянием менее 100 мм — широкоугольные, с фокусным расстоянием более 500 мм — узкоугольные.

В космических съемочных камерах компенсация сдвига изображения (КСИ) обязательна, если за время экспозиции его величина составляет десятые доли мм. В длиннофокусных ДКСК компенсация обязательна, в ТКСК наличие системы КСИ не допускается из-за нарушения геометрических соотношений. Наиболее известны два метода компенсации: механический, когда пленка перемещается со скоростью, равной скорости изображения, и оптический, основанный на использовании вращающихся оптических клиньев перед объективом камеры. В короткофокусных ДКСК применяют оптическую компенсацию, в длиннофокусных — механическую.

Приведенные отличительные признаки возможной классификации КСК не охватывают такого важного критерия, как разрешающая способность системы, так как практически все проектируемые камеры должны иметь высокую информационную способность. При съемке с больших высот критерий разрешающей способности является, наряду с геометрическим, основным при создании и выборе ТКСК и доминирующим при использовании ДКСК.

§ 22. БЛОК-СХЕМА КСК

Метод космической съемки определяет комплекс технических средств, размещенных на космическом летательном аппарате и предназначенных для получения фотографических изображений земной поверхности, планет Солнечной системы, поверхности Луны. Сочетание оптической системы, создающей изображение, с определенным фотографическим материалом, регистрирующим изображение, обеспечивает получение снимков для решения различных задач картографирования, дешифрирования, исследования природных ресурсов, изучения акватории Мирового океана.

Космическая съемочная система состоит из космической съемочной камеры, блока автоматического формирования команд управления КСК, электронной системы регистрации вспомогательной информации, установки для крепления КСК к носителю съемочной аппаратуры. В комплект съемочной системы может входить устройство для фотохимической обработки фотоматериала на борту носителя. Процесс космической съемки осуществляется с помощью нескольких систем, обеспечивающих получение высококачественных изображений объектов, удаленных от Земли или других планет на сотни и тысячи километров; измерение геометрических параметров фотографирования; управление съемочной системой; регистрацию временных и других параметров.

Таким образом, космические съемочные камеры являются составной частью сложной технической бортовой системы, обеспечивающей ориентацию и стабилизацию КЛА, управление съемочным процессом, измерение геометрических параметров съемки.

Космическая съемочная камера предназначена для получения изображения объектов съемки на поверхности светочувствительного материала и включает три основных блока: оптический, блок транспорта пленки (кассета) и корпус КСК.

Объектив КСК — коррегированная оптическая система, состоящая из нескольких линз и оправ.

Блок транспорта пленки (кассета) предназначен для размещения и предохранения от засветки светочувствительного материала, его перемотки на величину кадра и выравнивания

пленки в плоскость в момент фотографирования. Корпус КСК предназначен для крепления разных частей камеры, в конусной части КСК расположены объектив, светофильтр, механизм установки выдержки и диафрагмы и в некоторых камерах обогрев (для устранения возможного запотевания объектива при изменении температуры). Корпус КСК объединяет конусную часть и кассету, в корпусе располагают регистрационные приборы, распределительные механизмы. Корпус изготавливается из материалов с малым коэффициентом расширения.

Оптическим блоком КСК называется совокупность оптических элементов, предназначенных для построения оптического изображения в космической съемочной камере.

Оптический блок КСК состоит из объектива; затвора, при помощи которого осуществляется экспонирование светочувствительного слоя фотоматериала; светофильтра, изменяющего спектральный состав света.

Все основные свойства объектива определяются его оптической системой, оправка служит для правильного расчетного положения линз и позволяет изменять диаметр пучка лучей, проходящих через объектив.

Рассмотрим некоторые основные положения геометрической оптики, которые дают возможность судить о построении оптического изображения и возможностях исследования качества материалов съемки, полученных этими системами.

§ 23. КАРДИНАЛЬНЫЕ ТОЧКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Измерение энергии, приносимой световой волной, или измерение величин, связанных с этой энергетической характеристикой, называется фотометрией. С помощью теории волнового процесса решают задачи распространения света в однородной среде в оптических системах через совокупность различных сред. Рассматривая построение изображения оптической системой часто пользуются положениями геометрической оптики, где допускается понятие об отдельных световых лучах, подчиняющихся законам преломления и искажения и независимых друг от друга. Рассматривая реальный световой пучок в однородной среде последовательных диафрагм, возможно выделить узкий параллельный пучок. Переходя к малым отверстиям, можно получить световой луч или прямую линию.

Таким образом, световой луч есть абстрактное математическое понятие, а не физический образ, а геометрическая оптика — предельный случай реальной волновой оптики, когда световая волна исчезающе мала. Следует отметить, что допущения геометрической оптики не всегда оправданы и применимы. Необходимо учитывать, что в оптике вопросы, касающиеся качества системы, изучаются при помощи теории дифракции.

Основные определения лучевой или геометрической оптики связаны с рассмотрением гомоцентрических пучков лучей, т. е. имеющих общий центр. Светящаяся точка как вершина расходящегося пучка лучей после прохождения оптической системы должна изобразиться также светящейся точкой — вершиной сходящегося пучка лучей. Если сохраняется гомоцентричность, каждая точка дает одну точку изображения. Они называются

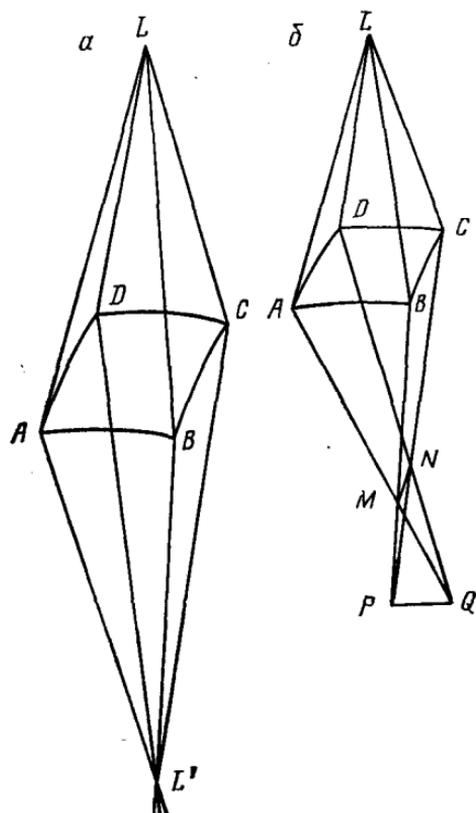


Рис. 22.

точечными или стигматическими. Центры пучков при стигматическом изображении называются сопряженными точками той оптической системы, которая преобразует расходящийся гомоцентрический пучок в сходящийся. Лучи и пучки также называются сопряженными (рис. 22, а).

Если в результате отражения и преломления гомоцентричность пучка нарушается, то стигматичность изображения теряется и точка L уже не изображается точкой L' (рис. 22, б).

Поверхность, нормальная к лучам, называется волновой поверхностью; в случае нарушения гомоцентричности сходящегося пучка лучей она перестает быть сферой. Поэтому вопрос о сохранении гомоцентричности пучка лучей очень важен.

Общая теория оптических систем была разработана Гауссом

в 1841 году и дополнена трудами многих математиков и физиков. Согласно этой теории в идеальной оптической системе сохраняется гомоцентричность пучков и изображение геометрически подобно предмету. Всякой точке пространства объектов соответствует в идеальной системе точка пространства изображения (сопряженные точки). Прямой линии или плоскости пространства изображения соответствует прямая или плоскость пространства объектов. Если рассматривать в реальной центрированной оптической системе область вблизи оси симметрии, т. е. ограничиться парааксиальными лучами, то можно с некоторым приближением считать эту систему идеальной. В центрированной оптической системе линия, соединяющая

центры сферических поверхностей, представляет собой ось симметрии и называется главной оптической осью. Свойства оптической системы можно описать с помощью так называемых точек и плоскостей.

Рассмотрим кардинальные точки системы, приведенной на рис. 23.

Систему ограничивают крайние сферические поверхности NN и MM . Главная ось системы проходит через точки O_1 и O_2 . Луч A_1B_1 параллелен оси O_1O_2 , точка B_1 — место входа луча A_1B_1 в оптическую систему. Этому лучу соответствует сопряженный луч G_2F_2 , выходящий из системы в точке G_2 . Луч P_1Q_1 , идущий вдоль главной оси, сопряжен с лучом Q_2P_2 . Точка F_2 — пере-

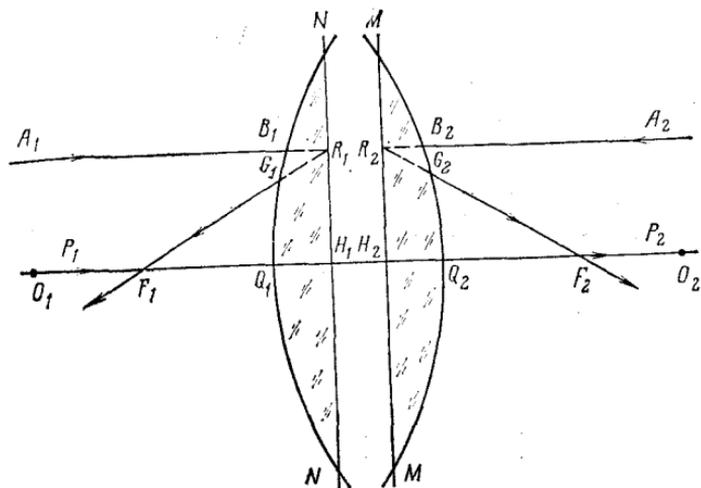


Рис. 23.

сечение двух лучей G_2F_2 и O_2P_2 — фокус оптической системы; плоскость, проходящая через фокус перпендикулярно к оси, носит название фокальной. Для лучей A_2B_2 и P_2O_2 найдем точку F_1 , которая является передним фокусом системы. Если продолжить лучи F_1G_1 и F_2G_2 до пересечения с продолжениями лучей A_1B_1 и A_2B_2 , то получим точки пересечения R_1 и R_2 , которые являются сопряженными.

R_1 и R_2 лежат на одинаковом расстоянии по оси, т. е. линейное поперечное увеличение v при этом будет равно $+1$:

$$v = H_2R_2/H_1R_1 = +1. \quad (83)$$

Плоскости, проходящие через точки H_1R_1 и H_2R_2 перпендикулярно к оптической оси, называются главными плоскостями. Точки пересечения главных плоскостей с оптической осью H_1 и H_2 называются главными точками оптической системы, а расстояние от главной точки до фокуса называется фокусным расстоянием. Соотношения, определяющие положение сопряженных точек в оптической системе, приведены с учетом расстоя-

ния сопряженных точек a_1 и a_2 от соответствующих главных плоскостей, значений показателей преломления сред n_1 и n_2 и правил знаков:

$$\left. \begin{aligned} (f_1/a_2) + (f_2/a_2) &= 1, & x_1 x_2 &= f_1 f_2; \\ f_1/f_2 &= -n_1/n_2; & v &= -x_2/f_2 = -f_1/x_1, \\ \text{где } x_1 &= a_1 - f_1, & x_2 &= a_2 - f_2, \\ \text{если } n_1 &= n_2, \text{ то } & x_1 x_2 &= -f^2; \\ f_2 &= -f_1 = f, & 1/a_2 - 1/a_1 &= 1/f. \end{aligned} \right\} \quad (84)$$

Главные плоскости и главные точки могут лежать как внутри, так и вне оптической системы, могут быть несимметричны относительно поверхностей, ограничивающих систему.

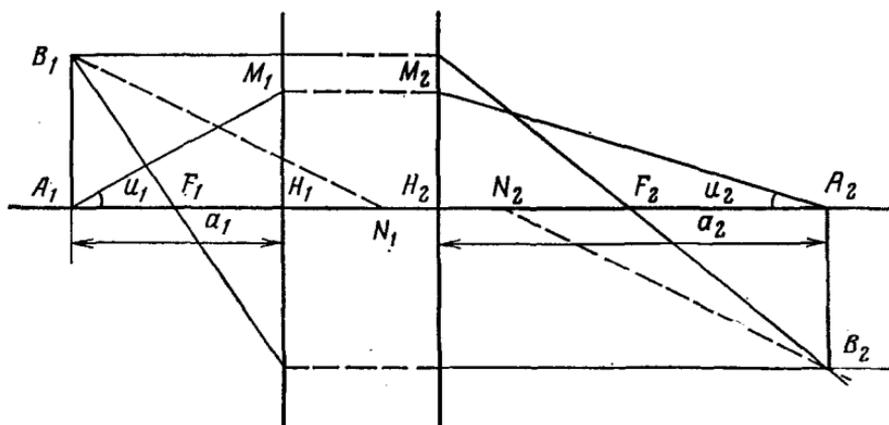


Рис. 24.

Оптическую систему характеризует также угловое увеличение W , которое равно отношению

$$W = \operatorname{tg} u_2 / \operatorname{tg} u_1, \quad (85)$$

где u_1 , u_2 — углы, образованные сопряженными лучами с оптической осью (рис. 24).

Точки, в которых угловое увеличение равно 1, называются узлами или узловыми точками. Сопряженные лучи, проходящие через узлы, будут параллельны друг другу. Эти точки N_1 и N_2 являются сопряженными и будут отстоять от первого и второго фокусов на расстояниях f_2 и f_1 , т. е. $F_1 N_1 = f_2$, $F_2 N_2 = f_1$.

Узловыми плоскостями называются плоскости, проходящие через узловые точки и перпендикулярные к оптической оси.

Кардинальными точками оптической системы называют шесть точек, расположенных на оси: фокусы, главные точки и узлы. Кардинальными плоскостями называются шесть плоскостей,

тей: две фокальные, две главные и две узловые. Если по обе стороны оптической системы будет располагаться одна и та же среда, то $f_1 = f_2$ и узловые точки сольются с главными, $F_1 N_1 = F_1 H_1 = f_2$. Такая система характеризуется четырьмя плоскостями и четырьмя точками. Свойства кардинальных плоскостей и точек позволяют построить изображение в любой системе, пользуясь двумя лучами, исходящими из одной точки. Это особенно удобно при построении изображения в сложной оптической системе. В силу того, что производится фотографирование пространственных предметов, отдельные точки которых лежат на разных расстояниях от главной плоскости, вводят также определение продольного увеличения u . Оно показывает отношение длины изображения Δx_2 к длине изображаемого малого участка Δx_1 , если последний расположен вдоль оси:

$$u = \Delta x_2 / \Delta x_1. \quad (86)$$

Существует следующая связь между поперечным v , угловым W и продольным увеличениями u :

$$v = u \cdot W. \quad (87)$$

Теория идеальной оптической системы носит общий характер и применяется при расчете хода лучей, определения положения главных точек и фокусного расстояния сложных оптических систем. Если сложная система состоит из двух подсистем с известными кардинальными точками и более, то, применяя процесс сложения подсистем, определяют параметры системы в целом.

Следует отметить, что в центрированных системах применять теорию построения изображения возможно только при выполнении основных условий: в системе рассматривается только область параксиальных пучков, с главной оптической осью эти пучки составляют небольшие углы и для всех лучей показатель преломления постоянен.

При построении изображения реальной оптической системой эти условия не соблюдаются, изображение строится не только параксиальными лучами, причем пучки лучей имеют большие углы наклона к оптической оси, а показатель преломления лучей сложного спектрального состава различен. Для того чтобы изображение реальной оптической системы соответствовало идеальной, производят устранение аберраций за счет усовершенствования оптической системы. При этом ставятся условия: каждая точка плоскости изображается стигматически, все точки изображения лежат в плоскости, перпендикулярной к оси системы, на всем изображении сохраняется постоянство масштаба изображения (увеличение). Если эти условия не выполнены, то изображение будет нерезким и деформированным.

§ 24. АБЕРРАЦИИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Реальной оптической системе присущи aberrации, обусловленные широкими пучками лучей, строящими изображение, нарушением гомоцентричности наклонных пучков лучей, нарушением симметрии системы по отношению к пучку лучей, разностью показателей преломления для разных длин волн и др.

Сферическая aberrация возникает из-за различной преломляющей силы разных зон оптической системы. Параксиальный пучок даст изображение в точке L' , пучки лучей, проходящие через краевые зоны, дадут изображение в точках L'' , L''' и т. д. (рис. 25).

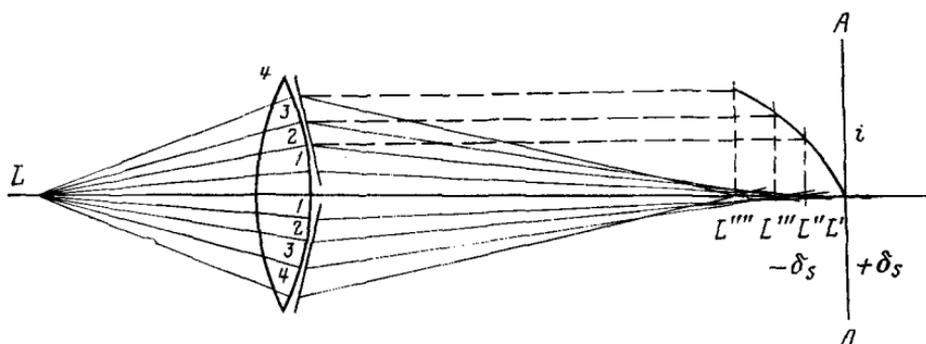


Рис. 25.

Если разместить экран в точке i перпендикулярно к оптической оси, то получится кружок рассеяния вместо точки с неравномерным распределением освещенности. При широком пучке лучей стигматичность изображения отсутствует даже для точек, расположенных на оси. Расстояние между точками L' , L'' , L''' , L'''' , для соответствующих зон называется продольной aberrацией. Если перемещать экран в точки L'' , L''' , то размеры кружка рассеяния и распределение освещенности в нем будут меняться. Положительные и отрицательные линзы имеют величины продольных aberrаций противоположных знаков. Комбинируя простые линзы, в значительной степени устраняют сферическую aberrацию. Если светящаяся точка находится вне оси, то ее изображение будет в виде довольно сложной асимметричной фигуры, причем освещенное пятнышко несколько напоминает комету с хвостом. Отсюда и название этой aberrации — кома. Она уменьшается подбором совокупности оптических компонент системы.

Астигматизм наклонных пучков — aberrация, возникающая из-за нарушения гомоцентричности пучка лучей, падающих на плоскость под некоторым углом. Рассмотрим пучки лучей в меридиональной плоскости, проходящей через ось системы, и

в сагиттальной, перпендикулярной к оси. При достаточном наклоне пучки не дадут стигматического изображения точки L (рис. 26).

Изображения этих точек в двух взаимно перпендикулярных плоскостях расположены на разных расстояниях от главной плоскости системы и дадут кружок рассеяния, форма которого определяется положением экрана. В плоскости I фигура рассеяния имеет вид отрезка прямой, лежащей перпендикулярно к меридиональной плоскости, в плоскости II — имеет вид круга, в плоскости III — расположена в меридиональной плоскости.

При рассмотрении наклонного пучка лучей одновременно с потерей стигматичности можно наблюдать, что резкость изображения в разных участках различна. Это объясняется тем,

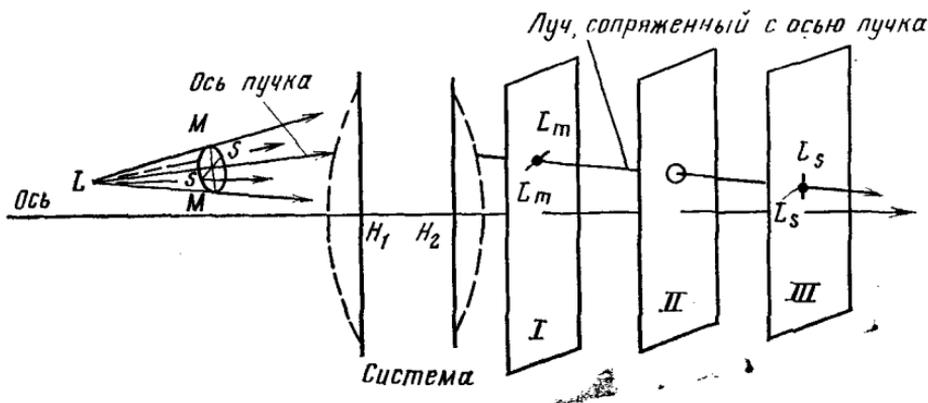


Рис. 26.

что изображение представляет собой не плоскость, перпендикулярную к оси, а в некоторой степени изогнутую поверхность. Степень изгиба пучков лучей в меридиональной и сагиттальной плоскостях различна (рис. 27).

Относительно плоскости неискривленного изображения OS , которая соответствует области параксиальных лучей, плоскости меридиональных и сагиттальных лучей OS_m и OS_s будут искривлены, причем степень кривизны зависит от угла наклона пучков лучей и радиусов поверхностей.

Аберрации, возникшие из-за построения изображения наклонными пучками лучей (астигматизм), исправляют подбором конструктивных элементов системы, т. е. различных радиусов поверхностей, расстояний между поверхностями и показателями преломления. Оптические системы, у которых устранен астигматизм наклонных пучков и одновременно кривизна поля изображения, носят название анастигматы.

Помимо астигматизма и кривизны поля изображения, при больших углах наклона пучков лучей, идущих в оптическую

систему, возникает также aberrация, называемая дисторсией. Она возникает даже тогда, когда изображение строится узкими пучками лучей. Это искажение обусловлено тем, что линейное поперечное увеличение v системы при больших углах зависит от угла между осями пучка и системы и меняется от центра

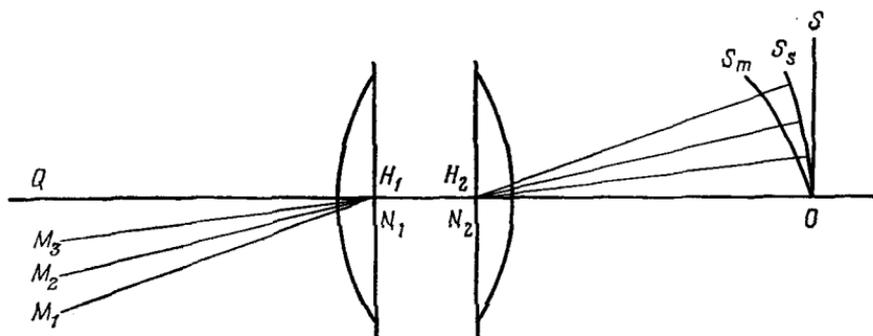


Рис. 27.

к периферии. В связи с этим изображения не оказываются геометрически подобными предмету. Искажения, вызываемые дисторсией объектива, различны, и примеры искажений окружности приведены на рис. 28 (a — неискаженное изображение, b — подушкообразное и $в$ — бочкообразное искажение окружности).

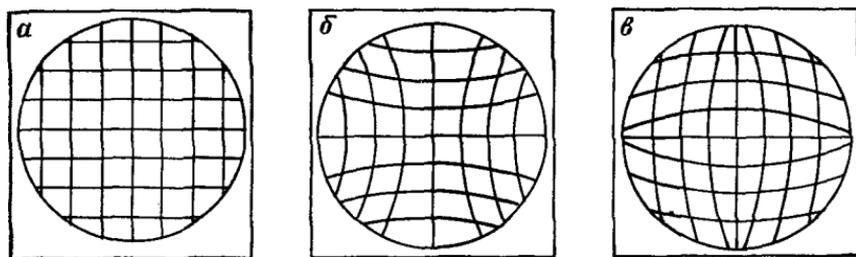


Рис. 28.

В объективах, применяемых для фотосъемки, по материалам которой производятся высокоточные стереофотограмметрические измерения, этот вид aberrаций должен быть максимально исследован и устранен.

Если в оптической системе устранена сферическая aberrация, то это еще не означает, что небольшие участки поверхности, перпендикулярные к оси, будут строиться резко.

Для правильного изображения необходимо, чтобы разные зоны оптической системы давали бы одно и то же увеличение,

т. е. чтобы для точек участков, не лежащих на оси, сохранялась бы стигматичность изображения. Условие, при котором сохраняется постоянство увеличения, определяется следующим выражением:

$$n_1 \sin u_1 / n_2 \sin u_2 = y_2 / y_1 = v, \quad (88)$$

n_1, n_2 — показатели преломления среды со стороны объекта и изображения; v — увеличение; u_1 и u_2 — сопряженные углы; y — расстояние от оси до точки, лежащей на оси.

Условие синусов Аббе (88) примет следующий вид, если по обе стороны оптической системы будет одна и та же среда, т. е.

$$n_1 = n_2, \quad \sin u_1 / \sin u_2 = y_2 / y_1. \quad (89)$$

Если для какой-либо пары устранена сферическая aberrация и выполнено условие синусов, то эти точки называются апланатическими. При широких пучках лучей это условие выполняется с помощью специальной оптической системы и только для определенных пар точек.

Объективам реальных оптических систем присущи также хроматические aberrации. Известно, что фокусное расстояние объектива зависит от формы линзы и показателя преломления:

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right), \quad (90)$$

n — относительный показатель преломления; R_1, R_2 — радиусы кривизны линз.

Для стекла, из которого изготавливается объектив, показатель преломления в видимой спектральной области возрастает с уменьшением длины волны, т. е. фокусное расстояние для линзы с определенными R_1 и R_2 тем меньше, чем больше n . Даже для параксиальных лучей в силу этого явления будет целая совокупность фокусов вдоль оси и точки будут изображаться цветными кружками, размеры которых будут зависеть от расположения фокальной плоскости. Фокусное расстояние определяет как положение изображения, так и его величину. В силу этого искажения, возникающие из-за дисперсии стекла, для разных длин волн называют хроматической aberrацией места изображения и хроматической aberrацией увеличения (рис. 29).

Мерой дисперсии, т. е. зависимости n от λ служит разность показателей преломления $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ для различных значений λ_1 и λ_2 . Средняя дисперсия принята как разность $n_F - n_C$, где n_F относится к $\lambda = 486,1$ нм (синяя линия водорода, F), где n_C относится к $\lambda = 656,3$ нм (красная линия водорода, C).

Величина, обратная относительной дисперсии, называется числом Аббе или коэффициентом дисперсии:

$$v = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}. \quad (91)$$

Тяжелые сорта стекол (флинты) характеризуются большой дисперсией, легкие (кроны) — малой. Для устранения влияния хроматической aberrации к линзе из крона присоединяют линзу из флинта. Выбирая соответствующим образом параметры линз с разными показателями преломления, добиваются совпадения фокусов двух и даже трех длин волн. Для всех видимых лучей добиться совпадения фокусов невозможно, в связи с чем возникает остаточный хроматизм или вторичный спектр. Различие в величине фокусных расстояний для разных длин волн из-за разного положения главных плоскостей для этих волн дает aberrацию, называемую хроматической разностью увели-

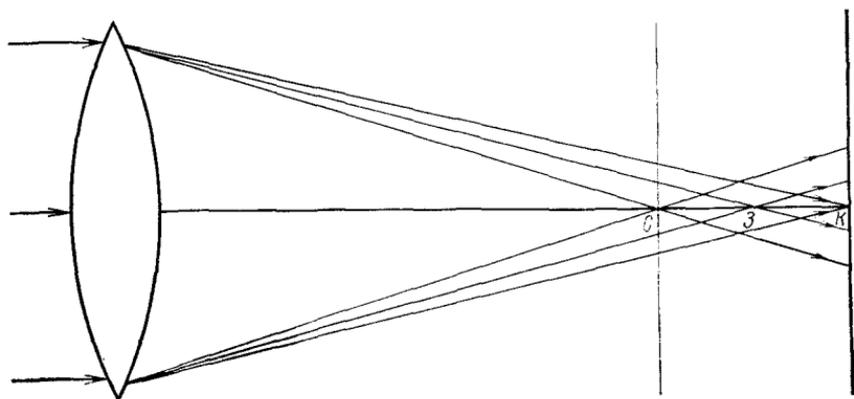


Рис. 29.

чений. Оптические системы, у которых исправлены хроматические погрешности для всех расстояний объектов, называются стабильно ахроматизированными. Для проведения съемки применяют объективы, у которых ахроматизация системы выполняется с расчетом соединения фокусов для длин волн $\lambda_C = 434,1$ нм и $\lambda_D = 589,3$ нм.

Объективы, где соединены фокусы для лучей трех длин волн и устранена одновременно сферическая aberrация, называются апохроматами. Устранение многочисленных aberrаций приводит к тому, что реальная оптическая система очень сложна, а ее построение и изучение качества оптического изображения также является сложной задачей. При создании объективов для КСК учитывают требования к материалам съемки и максимально устраняют те недостатки, которые особенно влияют на качество изображения.

Величины остаточных aberrаций характеризуют качество съемочной системы. Имеется зависимость между характеристиками объектива и величинами остаточных aberrаций. Эмпирическая формула характеризует связь фокусного расстояния,

относительного отверстия, угла поля зрения и качества объектива, у которого устранены все монохроматические аберрации:

$$C = \operatorname{tg} \omega \frac{\sqrt{0,01f' \text{ мм}}}{n_0}, \quad (92)$$

где C — коэффициент добротности объектива; ω — половина угла поля зрения; f' — фокусное расстояние объектива в мм; n_0 — знаменатель относительного отверстия. Величина C может достигать 0,24.

§ 25. ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КСК

Объектив космической съёмочной камеры предназначен для построения оптического изображения объектов поверхности в фокальной плоскости и определяется следующими основными характеристиками: фокусное расстояние объектива f' ; угол поля зрения 2ω ; относительное отверстие $2af/f'$ и геометрическая светосила объектива $(2af/f')^2$; светораспределение по полю изображения E ; коэффициент светопропускания K_a .

Качество объектива определяется разрешающей способностью, добротностью, его ортоскопичностью и функцией передачи модуляции ФПМ.

Объективы КСК состоят из нескольких оптических компонент — положительных, отрицательных и асферических линз.

Фокусное расстояние объектива влияет на величину угла поля зрения и точность последующих стереофотограмметрических работ.

Сложная оптическая система, которой является объектив, называется центрированной, так как центры всех сферических поверхностей лежат на одной прямой. Линия, соединяющая эти центры, называется главной оптической осью системы. Точка, сопряженная бесконечно удаленной точке главной оси, или место схождения лучей, параллельных оси, называется фокусом. Расстояние от главных точек системы до фокусов называется фокусным расстоянием. Оно зависит от показателя преломления сред, ограничивающих сферические поверхности, и радиусов кривизны. Величина, обратная фокусному расстоянию, называется оптической силой линзы и выражается в диоптриях.

Расстояние D от снимаемого объекта до объектива, расстояние от объектива до изображения d и f' связаны известной формулой

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{D} + \frac{1}{d}. \quad (93)$$

При аэрокосмических съёмках D достигает значительной величины ($D = \infty$), и можно считать, что $d = f'$.

$$D = f' \left(1 + \frac{1}{\beta} \right). \quad (94)$$

Отношение величины $\frac{l}{L} = \beta$ называют линейным увеличением β .

Фокусное расстояние определяет численный масштаб изображения

$$m = \frac{1}{L:l}. \quad (95)$$

В случае аэрокосмической съемки численный масштаб определится формулой

$$1/m = f'/H, \quad (96)$$

где H — высота. Отношение $L:l$ съемки будет равно отношению $H:f'$. Высокие требования при проведении съемок, предназначенных для стереофотограмметрических работ, предъявляют к точности определения фокусного расстояния.

Объективы, применяемые для фотогафрирования с больших высот, имеют различные фокусные расстояния и в соответствии с этим съемочные камеры подразделяют на:

- короткофокусные — $f' \leq 150$ мм;
- среднефокусные — $150 \leq f' < 300$ мм;
- длиннофокусные — $f' > 300$ мм.

Основные типы объективов, применяемых в аэросъемочных и космических камерах, приведены в табл. 2.

Угол поля зрения объектива определяется входным и выходным люками системы и диафрагмами. Реальные оптические системы дают удовлетворительное изображение только при известном ограничении ширины действующих пучков лучей. Так как при съемке трехмерные объекты изображаются на плоскости, необходимо ограничить ширину пучков, строящих изображение, так как чем уже пучки, тем отчетливее изображение пространственных предметов на плоскости. Для ограничения пучка лучей применяют ограничивающие диафрагмы, от величины и положения которых зависят четкость изображения и светосила объектива. Апертурные диафрагмы ограничивают пучки лучей, исходящих из точки, лежащей на оси системы. На рис. 30: BB — апертурная диафрагма, B_1B_1 — входной зрачок, B_2B_2 — выходной зрачок системы. Входной зрачок сильнее всего ограничивает входной пучок, а выходной ограничивает выходящий пучок лучей. Роль входного зрачка системы играет оправа объектива, специальная диафрагма или ее действительное или мнимое изображение. Апертурная диафрагма совпадает со входным зрачком, если она расположена перед системой, а выходной зрачок совпадает с ее изображением. Если же апертурная диафрагма лежит внутри системы, то ее изображение B_1B_1 и B_2B_2 будет соответственно входным и выходным зрачками системы. Апертурным углом системы будет называться угол, под которым из точки пересечения оси с плоскостью предмета системы виден радиус входного

№ п/п	Типы объектива	f' , мм	l_n	$2\omega^\circ$	Разрешающая способность	
					центр R , мм ⁻¹	край R , мм ⁻¹
1	2	3	4	5	6	7
Отечественные объективы						
1	Родина-26	55	1 : 8	134	36	12
2	Руссар-29	70	1 : 6,8	122	30	12
3	Руссар-54	70	1 : 6,8	122	30	10
4	МРО-2	100	1 : 8,0	102	40	10
5	Руссар-44Б	100	1 : 6,8	104	34	18
6	Уран-27	100	1 : 2,5	54	45	8
7	Уран-10	100	1 : 2,8	56	32	10
8	Руссар-43	140	1 : 6,3	85	40	20
9	Орион-21	150	1 : 6,8	92	24	10
10	Орион-20	200	1 : 6,3	65	50	20
11	Руссар-плазмат	200	1 : 6	41	45	20
12	Орион-1М	200	1 : 6,3	92	32	6
13	Индустар-51	210	1 : 4,5	60	22	14
14	Руссар-плазмат	350	1:6,0—1:16	41	35	15
15	Телемар	400	1 : 6,3	30	30	16
16	ОФ-41	400	1 : 4,5	25	20	8
17	Индустар-52	500	1 : 5,0	46	25	12
18	Родон-1	500	1 : 5,0	46	30	12
19	Уран-16	750	1 : 3,5	32	31	11
20	Телемар-2	750	1 : 6,3	32	25	10
21	Ленинград-8	750	1 : 6,3	31	37	17
22	Телемар-7	1000	1 : 7,0	24	26	17
23	Ленинград-4	1800	1 : 8,0	21	23	11
24	Телемар-12	1800	1 : 8,0	22	20	11
Зарубежные объективы						
25	Супер-Плеогон	85,5	1 : 4,0	125	50	20
26	Супер-Авиагон	85,5	1 : 5,6	125	80	10
27	Супер-Ламегон	90	1 : 5,6	120	85	20
28	Плеогон	105	1 : 5,6	94	35	15
29	Инфрагон	112	1 : 5,6	100	56	15
30	Ламегон-4	115	1 : 4,5	106	40	15
31	Геогон	150	1 : 5,6	100	40	20
32	Метрогон	150	1 : 6,3	96	30	10
33	Ламегон	152	1 : 4,5	92	40	15
34	Авиатар	210	1 : 4,0	60	43	18
35	Пинатар	210	1 : 4,0	65	40	13
36	Альдебаран	230	1 : 4,5	63	57	20
37	Топар	230	1 : 4,0	65	35	18
38	Топар А	300	1 : 5,6	55	40	15
39	Астротар	300	1 : 2,6	45	38	15
40	Теликон А	600	1 : 6,3	30	30	15

зрачка. Выходной апертурный угол — угол, под которым виден радиус выходного зрачка из точки пересечения оси с плоскостью предмета. В сложной оптической системе ограничение поля зрения создается специальными диафрагмами поля зрения. Изображение контура диафрагмы поля зрения называют входным

люком системы, а изображение входного люка в оптической системе — выходным люком. Если лучи проходят через центр апертурной диафрагмы и через центры входного и выходного люков, то они называются главными лучами. В конусе лучей, опирающемся на входной люк и имеющем вершину в точке предмета, главным лучом будет его ось. В случае когда главный луч от внеосевой точки предмета касается края входного люка, то часть лучей (примерно половина) не пройдет через оптическую систему. Величина угла поля зрения оптической системы определится главными лучами, которые касаются краев входного люка. В центральной части поля зрения изображение будет более резким и освещенность его выше. Максимальный формат снимка вписывается в поле резкого изображения, при-

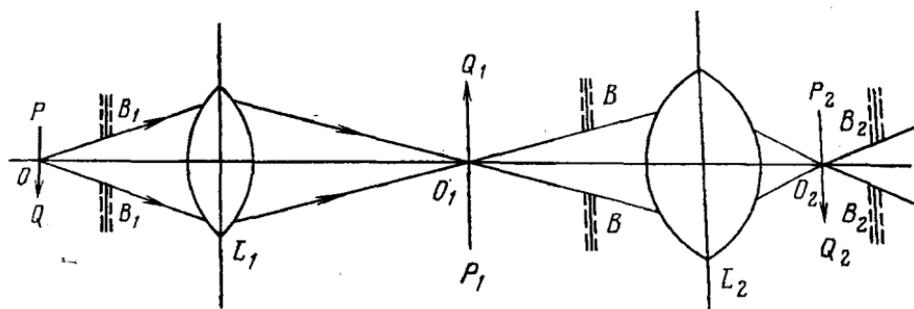


Рис. 30.

чем диагональ формата не должна превышать резкой части изображения.

Таким образом, в объективах используют только часть полного поля зрения объектива, так как изображение на краях бывает сильно искажено из-за остаточных aberrаций. Эту часть поля зрения называют угловым полем изображения, в пределах которого максимально устранены все виды aberrаций и качество снимка высокое. Поле изображения в объективах определяется диаметром окружности, в которую вписывается формат кадра. По углу поля зрения объективы съемочных камер делят на узкоугольные, с нормальным полем зрения, широкоугольные (см. табл. 2).

Светосила объектива определяется величиной диаметра действующего отверстия объектива $2a$ и фокусным расстоянием. Способность оптической системы создавать определенную освещенность в фокальной плоскости зависит от относительного отверстия объектива. Относительное отверстие определяется отношением диаметра входного зрачка объектива к фокусному расстоянию $2a/f'$ или $\frac{1}{f'/2a}$.

Известно, что для сравнения светосилы объективов необходимо учитывать площадь действующего отверстия и фокусное расстояние. Геометрическая светосила объектива пропорциональна величине $(d/f')^2$. В связи с тем, что при прохождении светового пучка через объектив часть лучей будет поглощена, часть отражена, светосила изменится. С учетом потерь световой энергии при прохождении через оптическую систему получим физическую (фактическую) светосилу объектива.

Под светосилой объектива понимают отношение освещенности изображения, создаваемого данным объективом, к яркости объекта:

$$K = E'/B = \pi T_0/4 (d_0/f')^2. \quad (97)$$

Геометрическая светосила не может полностью характеризовать освещенность в фокальной плоскости объектива. Необходимо учитывать коэффициент пропускания τ , который представляет отношение светового потока, прошедшего через объектив F , к световому потоку, падающему на объектив F_0 ,

$$\tau = F/F_0. \quad (98)$$

Этот коэффициент характеризует светопропускание объектива.

Сравнивая два объектива, сопоставляют их физические (эффективные) светосилы $(d/f')^2 \tau$.

Освещенность изображения неодинакова по всему полю снимка и сильно падает от центра к краям. Распределение освещенности по полю изображения у обычных объективов определяется зависимостью

$$E_i = E_0 \cos \omega_i^n \cdot K_B, \quad (99)$$

где E_0 — освещенность в центре фокальной плоскости; E_i — освещенность изображения в точке i ; ω_i — величина угла поля изображения данной точки i фокальной плоскости; n — показатель, характеризующий падение степени освещенности по полю изображения; K_B — коэффициент виньетирования.

Относительное изменение освещенности по полю зрения будет характеризоваться величиной C_0

$$\frac{E_i}{E_0} = C_0. \quad (100)$$

Объективы камер для съемки с больших высот по сравнению с другими аппаратами обладают улучшенным светораспределением в фокальной плоскости, которое определяется соотношением

$$E_i = E_0 \cos^3 \omega_i. \quad (101)$$

В объективах типа «Руссар» и МРО-2 функция, определяющая виньетирование, K_v равна $\cos^{-1} \omega$, $\cos^{-1,5} \omega$ и вследствие этого они обладают улучшенным светораспределением, а именно

$$E_i = E_0 \cos^n \omega_i. \quad (102)$$

Вследствие неравномерности освещенности в фокальной плоскости КСК плотность изображения по полю негатива будет непостоянной. Особенно это следует учитывать при цветной съемке из-за небольшой фотографической широты цветных материалов, позволяющей изменять выдержку при экспонировании в незначительных пределах, а также требований правильности цветопередачи объектов в центре и на краю негатива. Не все камеры, применяемые при съемке на черно-белые материалы, могут быть рекомендованы для цветной.

В случае применения цветных материалов мы имеем возможность изменять экспозицию только в полтора-два раза в силу того, что небольшая широта цветных материалов и необходимость воспроизведения широкого диапазона спектральных яркостных характеристик ландшафта не позволяет значительно отклоняться от средней величины экспозиции.

Для выравнивания неравномерности освещенности в фокальной плоскости в широкоугольных и сверхширокоугольных объективах применяют светофильтры-оттенители. На поверхности светофильтра-оттенителя методом вакуумного напыления наносят оттеняющий слой. Оттеняющие слои можно наносить на одну из компонент объектива, на стекло К-8 и на светофильтры, которые входят в комплект съемочных камер. При съемке на цветные материалы с натуральной цветопередачей необходимо применять нейтральный оттенитель на стекле К-8, при съемке на спектральнозональные материалы с условной передачей применяют светофильтр-оттенитель ОС-14.

Применение светофильтров-оттенителей в значительной степени ослабит физическую светосилу оптической системы, так как уменьшится освещенность по полю кадра.

Следует отметить, что светопропускание системы зависит от качества стекла, количества оптических компонент, входящих в объектив. Каждый сантиметр толщины линзы поглощает порядка одного процента светового потока, падающего на объектив. Свойства обычного стекла определяют степень поглощения лучей определенной длины волны, так, ультрафиолетовые лучи поглощаются полностью (до 350—360 нм). В связи с этим для съемки в ультрафиолетовой зоне спектра необходимо применять кварцевую оптику с иной избирательной способностью, чем у обычного стекла.

В значительной степени свет, идущий от объекта, рассеивается оптической системой. Многократно отражаясь от поверхности линз, рассеянный свет попадает внутрь камеры и более или менее равномерно освещает светочувствительный слой.

Каждая поверхность линзы рассеивает до 5% падающего света, если линзы склеены, то потери света меньше. «Паразитный» рассеянный свет ухудшает фотографическое качество, так как к яркости темных B_{\min} и светлых объектов B_{\max} прибавляется яркость σ , создаваемая рассеянным светом.

Известно, что интервал яркости оптического изображения

$$u = B_{\max}/B_{\min}, \quad (103)$$

а при действии рассеянного света интервал яркости u' равен

$$u' = \frac{B_{\max} + \sigma}{B_{\min} + \sigma}, \quad (104)$$

из равенства (103) и (104) следует, что $u' < u$.

Для уменьшения степени рассеяния света стали применять метод «просветления оптики», сущность которого заключается в нанесении химическим или физическим путем тончайших пленок. Для снижения коэффициента отражения показатель преломления n_1 должен быть меньше показателя преломления n_2 . При этом пленка должна иметь такую толщину d , чтобы разность хода лучей падающего и отраженного была равна половине длины световой волны λ . Вследствие интерференции света эти лучи будут поглощаться и отраженный свет как бы «погаснет», т. е. интенсивность отраженного света будет равна нулю,

$$d = \lambda/4. \quad (105)$$

Известна формула Френеля, определяющая коэффициент отражения R_0 ,

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2. \quad (106)$$

Для полного гашения света необходимо, чтобы коэффициенты отражения для лучей падающего и отраженного были равны:

$$\left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 = \left(\frac{n_1 - n}{n_1 + n} \right)^2, \quad (107)$$

где n , n_1 и n_2 — показатели преломления воздуха, пленки и стекла.

§ 26. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим некоторые положения интерференции и дифракции света.

Условием интерференции волн является их когерентность, т. е. когда разность фаз колебаний сохраняется неизменной за время τ , необходимое для фиксации наблюдений.

Обозначим: $\tau = \varphi_1 - \varphi_2$ — разность фаз, A — амплитуда гармонического результирующего колебания, a_1 , a_2 — амплитуды скла-

дывающихся колебаний, $I \sim A$ — результирующая интенсивность колебания. Вычислим средний квадрат амплитуды результирующего колебания за время τ

$$\begin{aligned} \bar{I} \propto \bar{A}^2 &= \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} A^2 d\tau = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} (a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \psi) d\tau = \\ &= a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \psi d\tau, \end{aligned} \quad (108)$$

если ψ неизменно за период τ , то

$$\frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \cos \psi d\sigma = \cos \psi,$$

отсюда

$$\bar{A}^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \psi,$$

т. е.

$$\bar{I} \neq I_1 + I_2. \quad (109)$$

Такие колебания принято называть когерентными.

В случае некогерентных волн каждому значению τ будет соответствовать своя интерференционная картина, которая сменится другой за промежуток времени, недостаточный, чтобы наблюдать эти интерференционные картины. Интенсивность в этом случае распределится равномерно, монотонно, без максимумов и минимумов, как в случае когерентных волн.

Качество интерференционной картины будет зависеть от суперпозиции волн с равными и неравными амплитудами, соотношения их амплитуд. В случае когерентных волн это будут черные и белые полосы, в случае некогерентных волн интерференционная картина будет накладываться на равномерно освещенный тон, величина освещенности которого пропорциональна $(a_1 - a_2)^2$. Для оценки видности или контрастности интерференционной картины был введен параметр видности v , который позволяет оценить возможность наблюдения темных и светлых полос в интерференционном поле на каком-то фоне:

$$v = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}, \quad (110)$$

где E_{\max} и E_{\min} — максимальная и минимальная освещенности интерференционных полос вблизи выбранной точки поля; v изменяется от 1 до 0.

Чтобы человеческий глаз уверенно различал чередование светлых и темных полос на интерференционной картине, v должно быть не менее 0,1, это соответствует $E_{\min} \approx 0,82 E_{\max}$. Значение v может зависеть и от состояния поляризации интерферирующих волн, наличия некогерентного света в составе ин-

терферирующих световых пучков и т. д. Если осуществляется интерференция световых пучков, в состав которых входит некогерентный свет, то в месте наложения таких пучков лучей некогерентная часть создаст равномерный фон, что снизит контрастность (видимость ν) интерференционной картины. Причем эти изменения тем больше, чем больше доля некогерентного света. Если световые волны, идущие от двух источников света, не дают интерференционной картины, значит ни один из источников не излучает строго монохроматического света. Случаи применения интерференции света нашли применение и в фотографической практике (для исследования величины невыравнивания пленки в фокальной плоскости, при создании «просветляющих» пленок и т. д.). Явление встречи двух или нескольких когерентных волн, между которыми наблюдается интерференция, имеет место, по существу, в любом оптическом приборе. Процессы такого рода происходят при распространении света через любое вещество, преломлении света на границе двух сред, при его отражении и т. д. В случае распространения света в веществе происходит передача колебаний электронами (и ионами), из которых построено вещество. Вторичные электромагнитные волны будут с тем же периодом и когерентны падающей волне, так как они связаны определенным образом между собой по фазе. Именно это явление позволяет объяснить преломление света, его отражение и дисперсию, рассеяние и т. д. При получении изображения, даваемого линзой, наблюдается также интерференционный эффект.

Известно, что в вакууме скорость распространения света c и длина волны λ зависят от показателя преломления среды n

$$\nu = c/n; \quad \lambda = \lambda_0/n, \quad (111)$$

где λ — длина волны в среде.

Если волна проходит путь d_1 в среде с показателем преломления n_1 и d_2 с n_2 , то возникающая разность фаз ψ будет равна

$$\psi = 2\pi \left(\frac{d_2}{\lambda_2} - \frac{d_1}{\lambda_1} \right) = 2\pi (n_2 d_2 - n_1 d_1) \lambda_0. \quad (112)$$

Оптической длиной волны называется произведение показателя преломления на длину пути $n_1 d_1 = (d_1)$, тогда

$$\psi = \frac{2\pi (d_1) - (d_2)}{\lambda_0}. \quad (113)$$

Если $d_1 = d_2$, то $\psi = 0$.

Таким образом, если оптические длины пути равны между собой, то они не внесут никакой разности фаз. Такие пути получили название таухронных, т. е. совпадающих по времени. Свет по этим не равным по геометрической длине путям распространится за одно и то же время. Если бы лучи не были таухронными, то пройдя по разным путям, они обладали бы неко-

торой разностью фаз. В действительности линза не вносит разности хода между отдельными лучами, строящими изображение.

Вследствие таутохронизма оптических систем световые колебания в изображениях различных точек P_1 и P_2 соответствуют одновременным колебаниям в источнике света. Если для различных точек P_1 и P_2 моменты времени t и $t + \tau$ совпадают ($\tau = 0$) и колебания в точках P_1 и P_2 когерентны, то вводят понятие пространственной когерентности колебаний в точках P_1 и P_2 и просто пространственной когерентности.

В оптических приборах пространственная когерентность играет важную роль. Световые колебания от несамосветящихся предметов частично когерентны. К несамосветящимся предметам относятся те, которые освещены прямым солнечным светом. Если освещение объекта наблюдения происходит за счет света, рассеянного облаками, окружающими предметами, то отдельные точки этих предметов будут считаться источниками некогерентных волн. Степень когерентности колебаний в точках P_1 и P_2 , отстоящих друг от друга на расстоянии $2l$ и лежащих на оси, параллельной источнику света, будет равна

$$K_{1,2}(0) = |\sin \alpha / \alpha|; \quad \alpha = 4\pi b l / \lambda d, \quad (114)$$

где $2b$ — длина отрезка прямой, на которой эквидистантно расположены светящиеся точки, d — расстояние между источниками и точками излучения.

Угловые размеры источника света, дающего когерентность колебаний, будут ограничены равенством

$$\theta = 2b/d < \lambda/2l. \quad (115)$$

Если освещение происходит прямым светом от Солнца, угловые размеры которого $\theta = 30' = 0,9 \cdot 10^{-2}$ рад, то размеры области когерентности составят $1,1 \cdot 10^2 \lambda = 0,06$ мм (для $\lambda = 0,55 \cdot 10^{-3}$ мм).

При смешанном освещении объекта следует считать $\theta \approx 1$ и область когерентности будет $2l_{\text{кор}} \approx \lambda$.

Этот критерий останется верен (область когерентности) и для любого протяженного источника света, состоящего из произвольно расположенных светящихся точек. Неравенство, применяемое для определения размеров области когерентности к произвольным протяженным источникам света, — универсальный критерий пространственной когерентности

$$2l < \lambda d / 2b = 2l_{\text{кор}}. \quad (116)$$

Принципы волновой оптики и, в частности, интерференция света позволяют определить интенсивность волн, идущих по разным направлениям, и пространственное распространение этих волн. Вычисляя результаты интерференции элементарных волн, можно определить интенсивность (амплитуду) в любой точке, т. е. определить закономерность распространения света.

Решение вопроса о распределении интенсивности света в случае наличия на пути волнового фронта задерживающих

экранов или краев диафрагм позволило объяснить явления дифракции света. Амплитуда результирующей волны A_φ , идущая в направлении φ , будет зависеть от многих факторов: ширины дифракционной щели b , длины волны λ , амплитуды A_0 :

$$A_\varphi = \frac{A_0 \sin(b\pi\varphi/\lambda)}{b\pi\varphi/\lambda}. \quad (117)$$

Выражение (117) показывает, что освещенность будет меняться вдоль экрана с изменением φ , проходя через максимумы и минимумы. $A_\varphi = 0$ для углов φ , удовлетворяющих условию

$$(b\pi/\lambda) \sin \varphi = n\pi, \quad (118)$$

где $n=1, 2, 3, \dots$ — целые числа, т. е. для случая $\sin \varphi = n\lambda/b$. На рис. 31, *a* показана зависимость интенсивности и амплитуды

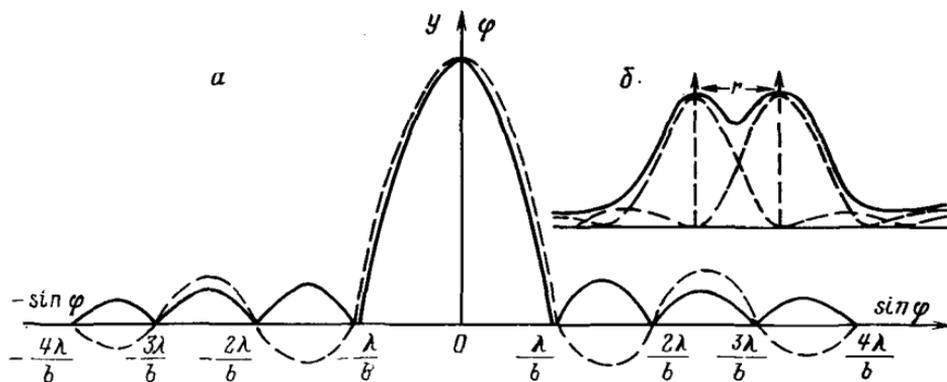


Рис. 31.

от направления при дифракции на щели. Интенсивность в этом случае определится так:

$$I_\varphi = I_0 \frac{\sin^2[(b\pi/\lambda) \sin \varphi]}{[(b\pi/\lambda) \sin \varphi]^2}, \quad (119)$$

где $I_0 = A_0^2$ — интенсивность света, идущего от щели шириной b в направлении первичного пучка лучей.

Величина вторичных максимумов, как видно из рис. 31, быстро убывает и приближенно интенсивности главного и последующих максимумов относятся как $1 : 0,045 : 0,016$ и т. д. В случае белого света будем иметь центральный максимум, совпадающий для всех длин волн, и совокупность максимумов соответствующих картин для разных длин волн, сдвинутых относительно друг друга в соответствии с различиями в длине волны. В центре дифракционной картины будет белая полоска, окруженная цветной каймой, в связи с тем, что вторичные максимумы для разных длин волн уже не совпадут между собой. Ближе к центру будут располагаться максимумы более корот-

ких волн. Если рассмотреть дифракцию света при круглом отверстии (объектив, диафрагма), то общий характер распределения интенсивности будет такой же, как и при рассмотрении прямоугольного отверстия. Максимумы и минимумы будут располагаться в фокальной плоскости объектива в виде концентрических колец и угловой радиус темного кольца определяется формулой

$$\sin \varphi_m = \frac{0,61 + (m - 1)/2}{R} \lambda, \quad (120)$$

где R — радиус отверстия; $m = 1, 2, \dots$; φ — направление диафрагмирующего луча между его проекцией на плоскость параллельно стороне прямоугольника и направлением первоначального распространения.

Относительная интенсивность уже в ближайших максимумах составляет менее 2% от интенсивности центрального максимума. Дифракция световой волны, связанная с ограничением конуса лучей, вырезаемого входным зрачком и другими элементами, входящими в оптическую систему (оправы, диафрагмы, зеркала), ведет к нарушению стигматичности изображений. Из-за наличия дифракционных явлений точка изображается дифракционным кружком, т. е. идеальной стигматичности в оптических системах быть не может. Нарушение стигматичности приведет к ограничению возможности различения тончайших деталей изображения.

Разрешающая способность оптической системы определяется пределом различимости мельчайших деталей изображения, и ее величина объясняется степенью дифракции, возникающей вследствие ограничения пучка лучей, проходящих через объектив. Дифракция на краю круглой оправы приведет к тому, что в фокальной плоскости объектива будет не стигматическое изображение точки, а сложное распределение освещенности с центральным максимумом, интенсивность которого быстро убывает (рис. 31, б).

Радиус первого темного кольца определяется углом φ_1 с вершиной в центре объектива

$$d \cdot \sin \varphi = 1,22\lambda, \quad (121)$$

где d — диаметр объектива; λ — длина волны.

Если же будет не монохроматический, а белый свет, то будет наложение нескольких дифракционных картин

$$r = f' \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (122)$$

Из-за малости угла φ можно записать, что

$$r = 1,22\lambda \frac{f'}{d}, \quad (123)$$

т. е. радиус первого темного кольца тем меньше, чем больше диаметр входного отверстия объектива. Если различают два

максимума, пришедших от разных точек, то величину r считают пределом разрешения для данной оптической системы. Степень взаимного наложения вторичных максимумов, мешающих различению деталей, зависит от объективных причин. Принято считать, что за предел разрешения принимают такое положение, при котором первое темное кольцо проходит через светлый центр второго (по Релею). Если обозначить угловое расстояние между двумя разрешаемыми точками объекта ψ , то разрешаемое угловое расстояние определится следующей зависимостью:

$$\sin \psi = \sin \varphi = 1,22\lambda/d = 0,61 \frac{\lambda}{r}. \quad (124)$$

Из-за малости углов запишем

$$\psi = \varphi = 0,61 \frac{\lambda}{r}. \quad (125)$$

Величина, обратная предельному углу, называется разрешающей силой. Таким образом, разрешение оптической системы зависит от диаметра объектива и тем больше, чем больше диаметр.

Разрешающая способность глаза также ограничивается дифракционной картиной и зависит от размеров зрачка. Предельный угол разрешения глаза при хорошей освещенности составляет $1'$ и значительно изменяется при пониженной освещенности. Так, при освещенности 10 лк угловое разрешение глаза $0,9'$, при освещенности 0,01 лк разрешение составит $9'$.

Все реальные фотографические объективы имеют значительные aberrации и светорассеяние, которые сильно понижают разрешающую способность объектива.

Диафрагмирование (уменьшение действующего отверстия объектива) ведет к некоторому повышению разрешающей способности за счет уничтожения влияния aberrаций от крайних зон, но до известного предела, после которого начинает сказываться действие дифракции света и разрешающая сила снова падает.

Так как фотографический объектив предназначен для построения изображения на фотослое, то принято определять разрешающую способность объектива фотографически.

В результате того, что разрешающая способность объектива не может полностью воспроизводиться пленкой, получают так называемую фотографическую разрешающую способность объектива. Правильнее назвать этот результат взаимодействия разрешающей силой фотографической системы (объектива + фотослоя).

Для определения фотографической разрешающей способности объектива применяют те слои, с которыми объектив должен работать на практике. Фотографическая разрешающая способность объектива зависит не только от фотослоя, но и от контраста и

формы миры, условий освещения и проявления. На рис. 32 приведены штриховые (а) и радиальная миры (б).

Стандартные миры имеют абсолютный контраст $K=1$. Контраст миры — это отношение разности между освещенностями E_{\max} и E_{\min} , измеренными в серединах светлой и темной полос, к максимальной освещенности:

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max}}. \quad (126)$$

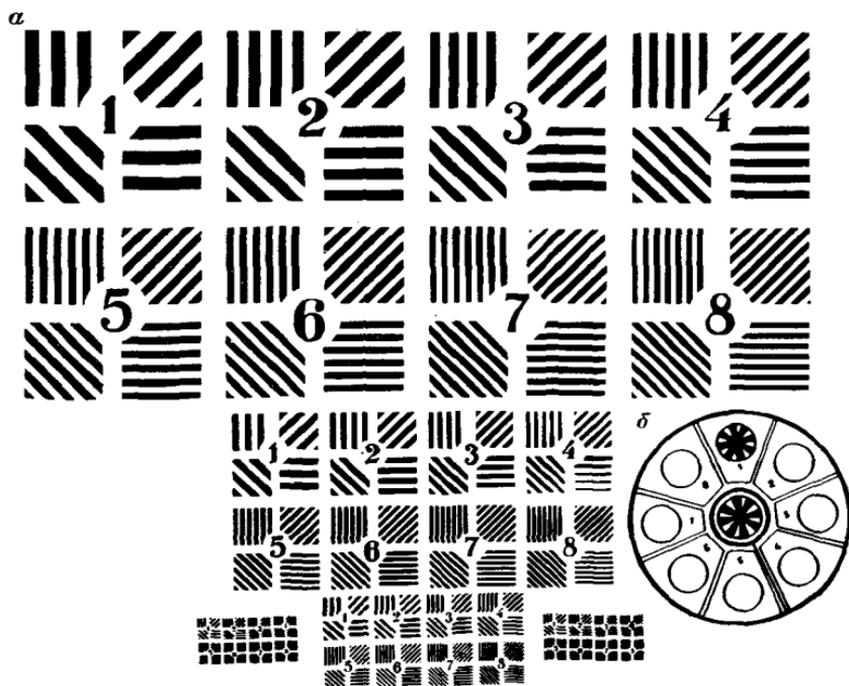


Рис. 32.

Зная разрешающую способность фотослоя R_c и объектива R_B (визуальную), можно подсчитать ожидаемую $R_{\text{фс}}$ фотографическую разрешающую способность объектива по приближенной формуле

$$\frac{1}{R_{\text{фс}}} \cong \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_B}. \quad (127)$$

Фотографическая разрешающая способность объектива определяется при помощи коллиматора, в фокусе объектива которого помещается штриховая миры.

Испытуемый объектив устанавливается задней узловой точкой над осью вращения поворотного рычага оптической скамьи.

На оправу испытуемого объектива, в ходе пучка лучей или между мирой и источником света, ставят тот светофильтр, ко-

торый должен работать с объективом. При помощи микроскопа и матового стекла фокусируют объектив до резкого изображения мира в центре поля. После удаления микроскопа и матового стекла помещают кассету, заряженную фотопластинкой или пленкой.

Съемка мира выполняется с одинаковой выдержкой, начиная от центра кадра и далее в обе стороны от него по всему полю, с установкой испытуемого объектива на симметричные положения.

Установка объектива на углы производится, например, через 5° с углом поля зрения больше 20° или через $2,5^\circ$ для объективов с углом поля зрения меньше 20° .

В случае сильного падения освещенности на краях изображения, когда появляется затруднение в дешифрировании и оценке разрешающей способности, миру экспонируют при переменных выдержках с таким расчетом, чтобы оптическая плотность изображения была приблизительно одинакова по полю и равна единице.

После первого ряда съемок мира производят расфокусировку объектива, смещая его вдоль оси от первоначального положения (визуального фокуса) каждый раз на величину df' . Так, для объективов с $f' = 300$ мм расфокусировка ведется через 0,2—0,3 мм, для объективов с $f' = 200$ мм — через 0,1—0,05 мм.

Расфокусировку объектива можно производить при помощи коллиматора, что практически более удобно, смещая миру на величину df'_k , полученную из расчета по формуле

$$df'_k = (f'_k/f')^2 df', \quad (128)$$

где f'_k — фокусное расстояние объектива коллиматора; f' — фокусное расстояние испытуемого объектива.

Таким образом, для всех смещений объектива получают несколько рядов снимков мира, которые затем дешифрируют при помощи микроскопа 15—20-кратного увеличения.

Дешифрирование снимков ведется от крупных штрихов мира к мелким. За предельное разрешение принимается тот элемент мира, в котором штрихи разрешены по всем четырем направлениям и в каждом направлении можно еще сосчитать число штрихов. При оценке качества изображения или при определении астигматизма снимки дешифрируют до предельно разрешаемых штрихов любого направления. В случае провала или инверсии в изображении мира за предельное значение разрешения принимается предшествующий элемент без провалов или инверсий.

Под провалом понимается случай, когда среди разрешаемых элементов встречается элемент, в котором штрихи неразличимы. Под инверсией понимается случай обращения черных штрихов в белые. То и другое явления возникают чаще от соотношения частоты штрихов на мире и распределения освещенности в изо-

бражении. В результате расшифровки всех снимков делается выбор плоскости наилучшего изображения объектива.

Для целей аэрокосмической фотосъемки плоскость наилучшего изображения выбирают по максимальной разрешающей способности по полю.

При определении фотографической разрешающей способности объектива с углом поля зрения более 50° требуется вводить поправки за изменение проекции изображения различных направлений штрихов миры в фокальной плоскости при углах поворота и изменении положения последнего по отношению миры коллиматора.

Для определения разрешающей способности применяют различные миры: штриховые, радиальные, миры Кобба и др. Следует отметить, что отношение длины линий к расстоянию между ними имеет большое значение при определении разрешающей способности. Если это отношение < 30 , то разрешающая способность остается постоянной. При меньших отношениях изменения разрешающей способности могут достигать до 80 %.

При исследовании оптической системы часто применяют радиальную штриховую миру (см. рис. 32, б). Разрешающая способность R определенная по этой миру, будет получена по формуле

$$R = 2n/\pi d_k; \quad R = N/\pi d, \quad (129)$$

где n — число белых или черных штрихов миры ($2n = N$ — число пар штрихов); d_k — диаметр нерезкости кружка изображения миры, где штрихи слились.

§ 27. СВЕТОФИЛЬТРЫ

Светофильтром называется оптическая среда, изменяющая в той или иной степени проходящий через нее свет.

Светофильтры, применяемые в фотографии и аэрокосмических съемках, можно условно разбить на следующие виды: 1) цветные: а) монохроматические; б) селективные; в) субтрактивные; г) компенсационные; 2) нейтрально-серые; 3) поляризационные.

Цветные светофильтры имеют избирательное поглощение света (рис. 33, а). В зависимости от веществ, входящих в их состав, они по-разному изменяют проходящий через них свет.

Монохроматические светофильтры поглощают широкую зону спектра, пропуская обычно один монохроматический свет (рис. 33, б). Эти фильтры используют для освещения фотолaborаторий неактивным светом, а также применяют при научно-исследовательских работах.

Селективные (зональные) светофильтры пропускают более широкий участок спектра — обычно одну из зон (синюю, зеленую или красную); их используют при цветной фотопечати аддитивным способом (рис. 33, в).

Субтрактивные светофильтры пропускают широкую область и используются при субтрактивной цветной фотопечати (рис. 33, а).

Компенсационные светофильтры поглощают коротковолновую зону спектра и широко применяются при съемках на черные

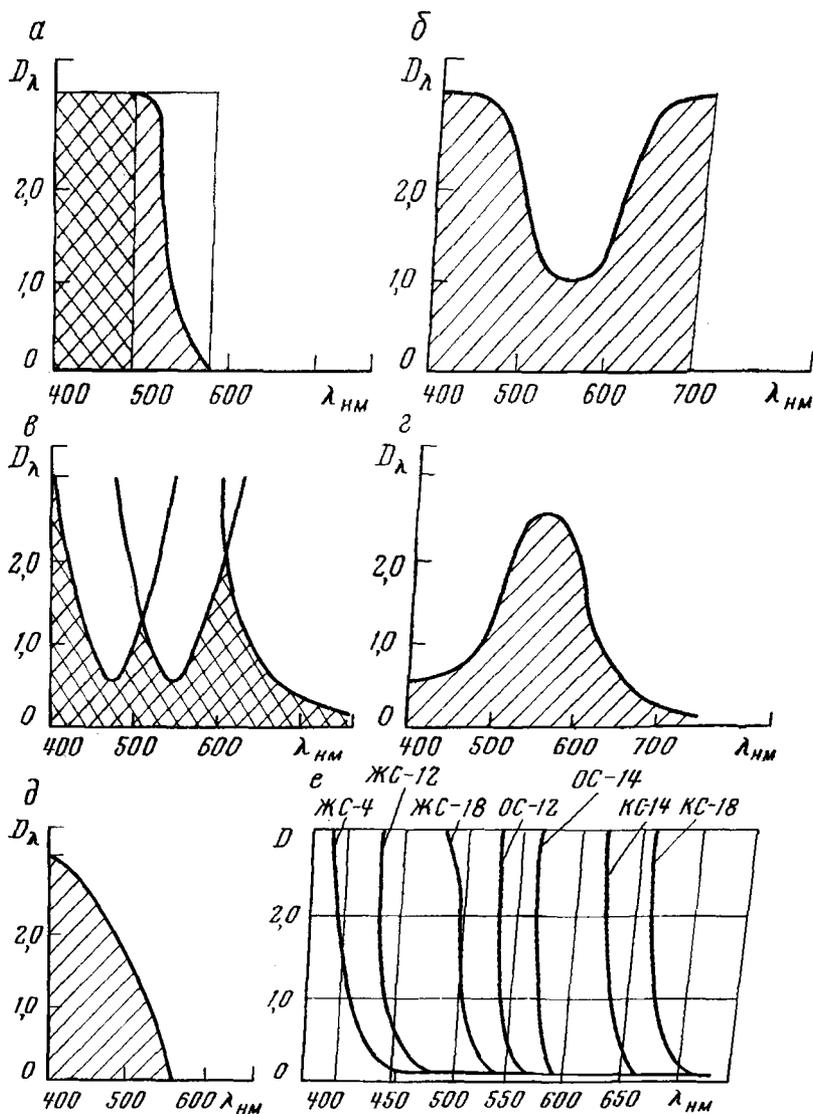


Рис. 33.

белые фотоматериалы (рис. 33, д). Это объясняется несовершенством фотоматериалов, имеющих максимум чувствительности в сине-фиолетовой зоне спектра, что не соответствует чувствительности глаза. Применяя светофильтр, избирательно поглощающий сине-фиолетовые лучи, можно добиться улучшения

передачи черно-белым материалом цветных объектов. При выборе светофильтра необходимо учитывать, что желаемый эффект может быть получен только в том случае, если фотоматериал чувствителен к цветам, проходящим через данный светофильтр.

В практической работе обычно пользуются твердыми светофильтрами, но не исключена возможность применения и жидких фильтров. Твердый фильтр представляет собой окрашенное в массу стекло или желатиновую пленку, заключенную между двумя стеклами, жидкий светофильтр выполняется в виде плоской кюветы, заполненной раствором красителя.

В фотографии наиболее часто применяют светофильтры с различным спектром поглощения. Некоторые светофильтры выглядят бесцветными, но обладают избирательным поглощением в соседнем с видимым участком спектра за счет специальных веществ, введенных в массу светофильтра. К одному из таких веществ относится и стекло, поглощающее ультрафиолетовые лучи. Свойства светофильтров определяются с помощью специальных приборов — спектрофотометров, показывающих плотность светофильтра для различных длин волн.

Спектральные характеристики съемочных светофильтров, выражающие их пропускание в различных участках спектра, показаны на рис. 33, е.

Светофильтры характеризуются кратностью — числом, показывающим, во сколько раз необходимо увеличить выдержку при использовании данного светофильтра. Кратность светофильтра не постоянна. Она зависит от спектральной чувствительности используемого фотоматериала и спектрального состава освещения. При выборе светофильтра учитывают, что он высветляет цвета, близкие к его центру, и притемняет обратные (дополнительные) ему цвета.

Поляризационные светофильтры снижают влияние отражений от неметаллических глянцевых поверхностей, не изменяя при этом спектрального состава проходящего через них света. Их применяют в том случае, если при съемке требуется устранить блики от воды, стекла, поверхности окрашенных блестящих предметов.

Поляризационный светофильтр имеет тонкую прозрачную пленку с закрепленными, очень мелкими кристаллами поляризующего вещества, ориентированными в одном направлении. Пленку крепят между двумя круглыми защитными стеклами. Светофильтр имеет двойную оправу: внешняя необходима для установки светофильтра на объективе, а внутренняя — для поворота его вокруг оптической оси и установки в положение, при котором происходит выделение и избирательное пропускание световых волн в определенной плоскости и устранение бликов на изображении.

Нейтрально-серые светофильтры предназначены для уменьшения физической светосилы фотообъектива.

При съемке на цветные фотоматериалы применяют так называемые конверсионные светофильтры, приводящие состав пропускаемого ими света в соответствии с требованиями используемого съемочного материала.

§ 28. ФОТОЗАТВОРЫ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ КАМЕР

Фотозатворы относятся к наиболее сложным и ответственным узлам космической фотосъемочной системы. Фотозатвором КСК называют устройство, при помощи которого световые лучи от объекта съемки пропускаются на светочувствительный слой. Время, в течение которого осуществляется экспонирование светочувствительного материала, т. е. время открытия затвора, называется выдержкой. В остальное время затвор должен быть закрыт и полностью исключать возможность засветки светочувствительного материала. К фотозатворам предъявляют требования, определяемые задачами космической съемки, диапазонами яркостных характеристик, качественными показателями, надежностью системы и т. д. Учитывая, что во время одного витка производится космическая съемка при разных уровнях освещенности объектов с большим изменением коэффициента яркости (например, водные поверхности и заснеженные горы), необходимо, чтобы фотозатвор имел большой интервал выдержек, т. е. обеспечивал возможность проведения съемки с большими и малыми выдержками. Фотозатвор не должен вносить геометрических искажений при построении изображения объекта, т. е. должен сохранять ортоскопичность изображения. Это требование особенно тщательно надо учитывать при создании фотозатворов для топографических космических съемочных камер, материалы съемки которых применяют для высокоточных измерений. К затвору предъявляют также требование, чтобы коэффициент полезного действия был высокий, т. е. потери световой энергии при прохождении через экспонирующее устройство должны быть минимальными. Экспонирование светочувствительного материала должно осуществляться одновременно по всему кадру и равномерно.

Фотозатворы должны быть надежными в работе, просты в эксплуатации и обеспечивать возможность автоматического регулирования экспозиции. Классификация фотозатворов производится по принципу действия, по конструктивным признакам, по характеру движения механизма экспонирования (шторки, лепестков, заслонок и т. д.), по месту расположения фотозатвора в общей съемочной системе.

По принципу дозирования света на эмульсионный слой фотозатворы делят следующим образом: в центральных затворах экспонирование происходит от центра к краям кадра, в щелевых фотозатворах экспонирование производится при перемещении щели перед светочувствительными материалами, в жалю-

зийных затворах экспонирование осуществляется открытием створок жалюзи.

По конструктивным признакам фотозатворы подразделяют на дисковые, шторные, жалюзи, обтюраторы, световые, электронно-оптические и т. д.

По характеру движения механизма экспонирования имеются фотозатворы с возвратно-поступательным или возвратно-вращательным движением, с установившимся и неустановившимся движением.

Рассмотрим основные характеристики фотозатворов, определяющие его эксплуатационные возможности. Одной из важных характеристик фотозатвора является оптический коэффициент

полезного действия η (ОКПД). Он определяется отношением количества световой энергии, прошедшей за время выдержки через фотозатвор, ко всему количеству света, упавшему на него за то же время.

Экспозицией называется количество освещения, подвергнувшегося на данную точку светочувствительного материала (H). Величина экспозиции определяется произведением освещенности изображения (E) на время экспонирования t

$$H = E \cdot t. \quad (130)$$

Выдержкой называется точно определенный промежуток времени, в течение которого фотозатвор пропускает лучи от объекта съемки на светочувствительный слой.

Временем экспонирования кадра называется точно определенный промежуток времени, в течение которого поочередно экспонируются все точки кадра. Время экспонирования кадра больше времени выдержки (например, у шторных затворов).

Эффективной выдержкой t_e называется произведение оптического коэффициента полезного действия на выдержку

$$t_e = \eta \cdot t. \quad (131)$$

Реальный затвор открывает отверстие диаметром $2d$ не мгновенно, а в течение некоторого промежутка времени. Построим кривую, характеризующую фазы начала открытия, полного открытия и закрытия затвора. Обозначим открытую часть площади отверстия объектива буквой F . Кривая $F = f(t)$, выражающая функциональную зависимость открытой затвором площади действующего отверстия объектива диаметром $2d$ от функции вре-

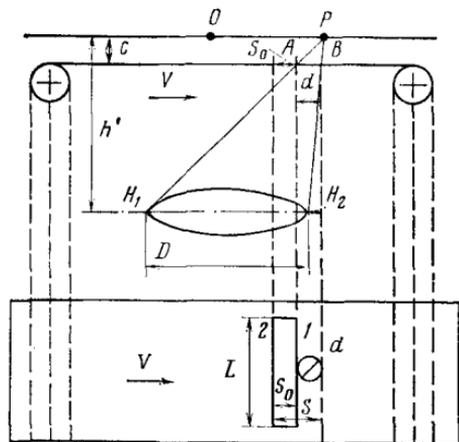


Рис. 34.

мени t , называется характеристической кривой затвора. При ее построении в прямоугольной системе координат по оси абсцисс откладывается время (или путь, пройденный шторкой), а по оси ординат — открытая площадь S . Характеристику затвора получают графическим, аналитическим или экспериментальным методом. Для примера определим ОКПД одношторного затвора при условии, что шторка движется равномерно.

Шторный затвор состоит из одной или двух шторок с одной или несколькими щелями, через которые производится экспонирование светочувствительного слоя. Схематически шторный затвор изображен на рис. 34, причем шторка расположена вблизи плоскости изображения на расстоянии c от нее. Рассмотрим построение изображения при проектировании пучка лучей через щель шторного затвора. Пусть

ширина щели равна S_0 , диаметр круга сечения плоскостью шторки конуса лучей, проектирующих какую-либо точку изображения, равен d . Относительная ширина щели m определится зависимостью

$$m = S_0/d. \quad (132)$$

Шторка со щелью будет передвигаться слева направо. Точку изображения P будет проектировать пучок лучей H_1H_2P . Экспонирование точки P начнется тогда, когда сторона

щели 1 коснется в точке A луча H_1P . Полностью затвор будет открыт для точки P , когда сторона щели 1 пройдет путь, равный $AB=d$, закончится экспонирование в момент, когда сторона щели 2 достигнет точки B . Таким образом, за выдержку шторка пройдет путь S , определяемый шириной щели и диаметром проектирующего светового пучка:

$$S = S_0 + d. \quad (133)$$

Определим d из треугольников H_1H_2P и ABP :

$$d = \frac{c}{h'} 2a', \quad (134)$$

где h' — расстояние от плоскости изображения до выходного зрачка объектива; $2a'$ — диаметр выходного зрачка объектива.

Если шторка движется со скоростью v равномерно, то $S = v \cdot t$. Выдержка t определится формулой

$$t = \frac{S_0 + d}{v}. \quad (135)$$

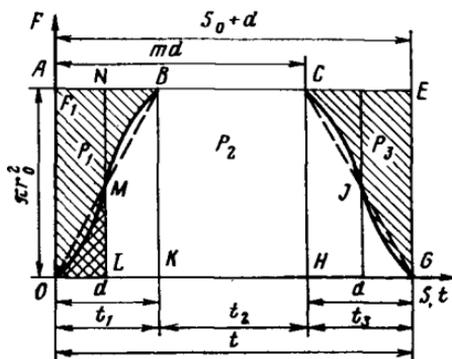


Рис. 35.

В реальных шторных затворах скорость v переменная из-за t . Для случая равноускоренного движения с ускорением j выдержка t будет равна

$$t = \sqrt{\frac{2}{j}(\sqrt{S_2} - \sqrt{S_1})}, \quad (136)$$

где S_1, S_2 — пути, проходимые шторкой от начала ее движения до начала и конца выдержки соответственно,

$$S_2 = S_1 + S_0 + d. \quad (137)$$

Построим графически кривую $F=f(S)$ или $F=f(t)$ при условии, что шторка движется равномерно (рис. 35). Участок OB называется восходящей ветвью характеристики, CG — нисходящей, F_1 — ордината, пропорциональная площади, открытой затвором по прошествии пути S_1 , MN — отрезок, пропорциональный частично открытой площади затвором по прошествии пути S_1 . Открытие затвора происходит на пути $AB=OK$ за время, которое относится к фазе открытия затвора t_1 . Время t_2 относится к фазе полного открытия затвора. В этот период отверстие полностью открыто и вся световая энергия, поступающая на объектив для данной точки снимка, полностью пропускается затвором. Время t_3 относится к фазе закрывания затвора, причем шторка проходит участок $CE=HG$. Выдержка t определится суммой времени открывания, полного открывания и закрывания затвора:

$$t = t_1 + t_2 + t_3. \quad (138)$$

Площадь $OBCG$ будет пропорциональна количеству световой энергии, пропущенной затвором за время t . $OAEG$ — площадь, пропорциональная количеству световой энергии, поступившей на затвор за то же время (идеальный затвор). Оптический коэффициент полезного действия η определится как отношение количества световой энергии реального и идеального затвора или численно он будет равен отношению двух площадей:

$$\eta = \text{пл } OBCG / \text{пл } OAEG. \quad (139)$$

Эта характеристика относится к одной точке снимка, но если ширина щели S_0 будет постоянной, то эту зависимость можно распространить на все точки снимка при условии равномерного движения шторки. Обозначим площадь $OBCG=P$, площадь $OAEG=P_0$, тогда

$$\eta = P/P_0. \quad (140)$$

Площадь P можно рассматривать как сумму трех площадей при условии, что кривые OQB и CIG заменены на прямые OB и CG :

$$P = P_1 + P_2 + P_3, \quad (141)$$

где P_1 — площадь треугольника OBK , образуемого восходящей ветвью, осью абсцисс и ординатой KB ; P_2 — площадь прямоугольника $KBCN$; P_3 — площадь треугольника CGH .

Если движение шторки равномерно, то $P_1 = P_3$, и тогда можно записать:

$$\left. \begin{aligned} P &= 2P_1 + P_2; \\ P_1 &= 0,5\pi r_0^2 d; \\ P_0 &= [S_0 + d] \pi r_0^2; \\ P_2 &= [S_0 - d] \pi r_0^2 A \end{aligned} \right\} \quad (142)$$

Подставив эти зависимости в уравнение (140), получим

$$\eta = \frac{S_0}{S_0 + d}.$$

Ранее было указано, что $\frac{S_0}{d} = m$, учитывая это и разделив числитель и знаменатель формулы на d , получим

$$\eta = \frac{m}{m + 1}. \quad (143)$$

Эффективная выдержка $t_{\text{эф}}$ будет зависеть от скорости и ширины экспонирующей щели S_0 :

$$t_{\text{эф}} = S_0/v, \quad (144)$$

причем равномерность $t_{\text{эф}}$ будет зависеть только от изменения скорости v , так как S_0 — величина постоянная. Эффективная выдержка в шторных затворах не зависит от диафрагмирования объектива и оптического коэффициента полезного действия.

В случае неравномерного движения шторки как выдержка, так и коэффициент полезного действия по всему полю кадра будут переменными. Если шторка движется равноускоренно, то график скорости шторки v в функции времени t будет линейн. Обозначим скорость в начале экспозиции $v_{\text{н}}$, в конце экспозиции $v_{\text{к}}$. Отношение $v_{\text{н}}/v_{\text{к}}$ называют степенью равномерности движения. Если отношение $v_{\text{н}}/v_{\text{к}} = 0$, то практически отсутствует разбег шторки ($S_1 = 0$), т. е. экспозиция начинается с началом движения шторки. Если $v_{\text{н}}/v_{\text{к}} = 1$, то шторка движется равномерно. Коэффициент полезного действия для случая неравномерного движения шторки определяют по измерению площадей P и P_0 планиметром или другим способом и по отношению площадей определяют η для нескольких степеней движения или для разных участков кадра. Максимальное значение потери в коэффициенте полезного действия для равноускоренного движения составляет 12%. Неравномерность движения шторки приводит к тому, что для разных участков кадра в направлении движения выдержка будет разной. Для начального ряда точек, где разгон шторки меньше и меньше ее средняя скорость, выдержка будет максимальной; для конечного ряда, где разгон шторки

S_0 — ширина щели; H — высота фотографирования, c — коэффициент, зависящий от конструктивных параметров затвора и КСК. Величина Δ — смаз изображения из-за движения КЛА по орбите при отсутствии вращательных движений. Если движение шторки будет совпадать с движением КЛА, то произойдет увеличение расстояния на величину δ , весь снимок как бы вытянется вдоль направления полета. Все линейные размеры как в первом, так и во втором случаях, перпендикулярные к направлению полета, искажаться не будут. Если же шторка будет двигаться перпендикулярно к направлению полета, то искажутся все линейные объекты, перпендикулярные к направлению полета. Линейные размеры под различными к направлению полета углами будут искажаться в большей или меньшей степени. При движении шторки перпендикулярно к направлению полета прямоугольник местности изобразится на снимке параллелограммом. Так как сам кадр является прямоугольником, то на местности будет снят каждым снимком не прямоугольник, а параллелограмм. Для уменьшения искажения шторка должна двигаться вдоль короткой стороны кадра. Кроме того, располагая шторный затвор на различных расстояниях от фокальной плоскости, уменьшают искажение изображения до величины, не превышающей допустимую величину смаза, т. е. $aa' = \Delta$. Решая уравнение относительно величины c , найдем

$$c = \frac{l - S_0}{\frac{1}{n} + \frac{l}{f'}}, \quad (147)$$

где l — длина кадра.

Искажения будут отсутствовать, если шторный затвор расположить между линзами объектива, т. е. когда экспонирование всего кадра будет одновременным. Существует также метод компенсации искажения при помощи специальных механизмов, путем перемещения пленки с той же скоростью, с какой движется изображение точки a . К тому моменту, когда затвор будет пропускать лучи от точки A , в точку a подойдет тот участок пленки, который обозначен точкой a . На соответствующую величину переместится и точка b пленки, т. е. участок ab будет сфотографирован без искажения. Шторные затворы располагают у объектива, между линзами объектива и вблизи фокальной плоскости КСК.

В шторных затворах, располагаемых вблизи объектива или между его линзами, возможно осуществить конструкцию, в которой имеются две шторки, движущиеся навстречу друг другу. Выдержка t для двухшторного затвора определится формулой

$$t = S_0/v, \quad (148)$$

где S_0 — ширина щели; v — скорость движения шторки. Выдержка в двухшторном затворе не зависит от диаметра дей-

ствующего отверстия, т. е. продолжительность экспозиции не изменяется при диафрагмировании объектива. Коэффициент полезного действия для двухшторного затвора выше, чем для одношторного. Расчетная формула для определения η дается без вывода:

$$\eta = \frac{m - 0,424}{m}, \quad (149)$$

где m — относительная ширина щели. Формула выведена для случая равномерного движения шторок и при условии $m \geq 1$.

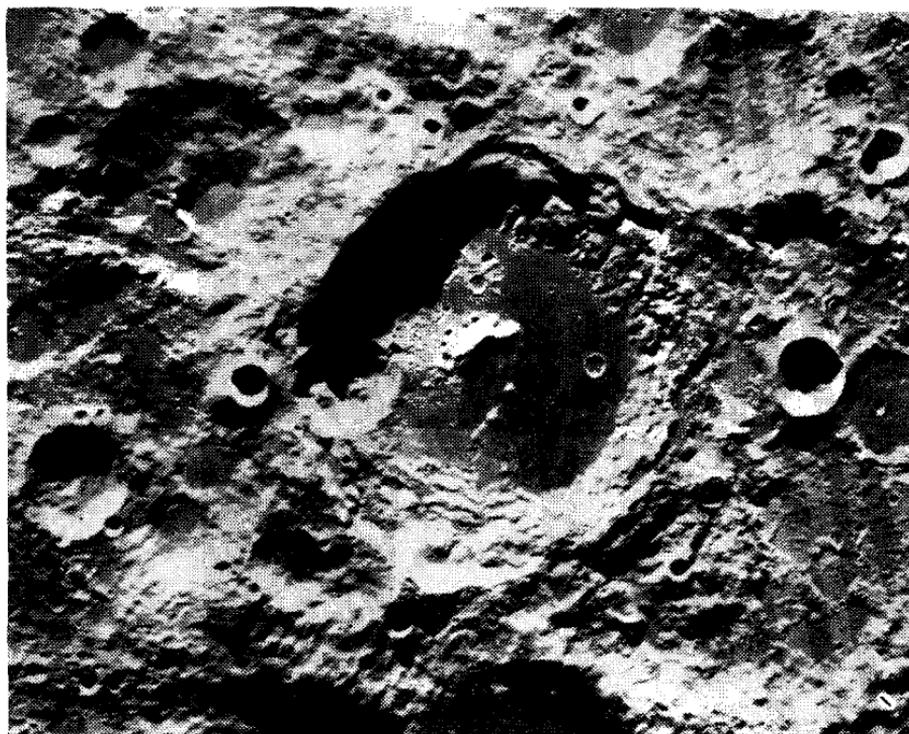


Рис. 37.

Изменение выдержки в шторных затворах обеспечивается различной степенью натяжения пружины, изменением ширины щели, применением двухшторного затвора, уменьшением величины разбега шторки.

Космические съемочные камеры со шторным затвором применялись при фотографировании Луны с автоматических станций типа «Зонд». На снимке, полученном с АМС «Зонд», изображена восточная часть обратной стороны Луны. Расстояние до Луны в момент съемки было 3,3 тыс. км, до планеты Земля 388 тыс. км (рис. 37).

Широкое применение в аэросъемочных и космических короткофокусных камерах нашли центральные фотозатворы. Если в одношторных затворах открывание и закрывание действующего отверстия объектива происходит от края кадра, то центральный затвор экспонирует кадр от его середины, откуда и произошло название затвора. Центральные затворы можно подразделить на три группы: центральные затворы прямого действия, возвратного действия и ротативные. Если за цикл работы диски затвора вращаются в одном направлении, то затвор называется затвором прямого действия. В затворах возвратного действия перед фазой закрывания отверстия диски изменяют направление вращения. В ротативных затворах движение дисков установившееся и непрерывное, приводом является электродвигатель. Центральный затвор прямого действия имеет симметричную форму ламелей относительно оси вращения. Каждая ламель — часть диска с секторным вырезом с угловой шириной α_0 . Ламели могут иметь одинаковую форму, могут попарно отличаться, что определяется способом их расположения. За выдержку диски повернутся на угол α_0 , и фактическая выдержка t при равномерном движении с угловой скоростью ω равна

$$t = \alpha_0 / \omega.$$

Отличительной особенностью в центральных затворах является то, что при равномерном и неравномерном движении ламелей фактическая выдержка не зависит от диафрагмирования объектива, так как угол поворота дисков за время t не зависит от действующего отверстия объектива. Определение величины оптического коэффициента полезного действия производится так же, как у шторных затворов, только по оси абсцисс откладывается угловой путь диска α , по оси ординат — открываемая затвором площадь F отверстия объектива. По оси абсцисс откладываем также время движения диска

$$\eta = \text{пл } OBCG / \text{пл } OAEG = P/P_0, \quad (150)$$

так как движение дисков равномерно, то

$$P_1 = P_3; \quad P_4 = P_5;$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 2P_1 + P_2 + 2P_4.$$

Площади P_0, P_1, P_2 вычислим по формулам

$$P_0 = a_0 \pi r_0^2; \quad P_1 = 0,25 \omega \pi r_0^2; \quad P_2 = (\alpha_0 - \omega) \pi r_0^2;$$

$$\Delta \eta = \frac{P_4}{0,5 \omega \pi r_0^2} = \frac{P_5}{0,5 \omega \pi r_0^2};$$

$$P_4 = 0,5 \Delta \eta \omega \pi r_0^2,$$

где $\Delta \eta$ — приращение ОКПД при $m=1$. Оно вызвано наличием в затворе нескольких дисков и является функцией радиуса ребер

входа и выхода диска. Подставив значения площадей в формулу (150), получим

$$\eta = \frac{m - 0,5 + \Delta\eta}{m}, \quad (151)$$

где

$$m = \alpha_0/\omega.$$

Формулу можно представить в другом виде:

$$\eta = \frac{m - 0,5}{m} + \frac{\Delta\eta}{m}. \quad (152)$$

На величину η центральных затворов влияют форма ламелей и число дисков. В центральном затворе возвратного действия форма ламелей несимметричная и имеет вид лепестка, так как часть ламели не участвует в работе, ее с целью уменьшения габаритов затвора убирают. В затворе ламели расположены на общем кольце или их синхронное действие обеспечивается рычажной системой. Устройство регулирования выдержек позволяет обеспечивать диапазон выдержек. Но следует отметить, что даже лучшие образцы затворов возвратного действия не позволяют получить выдержку менее 1/500 с. Известны центральные затворы, имеющие две группы слоя лепестков, расположенных последовательно. Перед экспонированием во взведенном состоянии одна группа лепестков закрыта, другая открыта. Во время экспонирования происходит открывание объектива первой группой лепестков и закрывание второй, причем за счет строгой синхронизации это происходит только после того, как первая группа лепестков полностью откроет затвор. Каждая группа лепестков работает по принципу прямого действия на фазу открывания или закрывания, в целом же затвор работает по принципу возвратного действия. Следует отметить, что у таких затворов имеется ряд недостатков, необходимо произвести за короткий период времени разгон ламелей и их остановку, что приводит к большим ударным нагрузкам, величина ОКПД незначительна, так как отсутствует фаза полного открывания. Эти недостатки устранены в двоярных затворах роторного типа. Вращение одного и второго яруса ламелей происходит равномерно, что исключает необходимость как разгона, так и их остановки. Вращение одной группы ламелей противоположно другой, угловая скорость достигает 9000 об/мин, что позволяет получить короткие выдержки. В затворах этого типа более высокий ОКПД за счет наличия фазы полного открывания. Для того чтобы при непрерывном вращении ламелей не производилась повторная съемка, в конструкции затвора введена дополнительная заслонка, которая в заданный момент экспонирования открывается. В затворах больших скоростей вращение дисков происходит непрерывно, причем отно-

шение скоростей их вращения составляет как 2:4:6. В момент совпадения вырезов в дисках происходит экспонирование в заданный момент времени T_i .

Рассматривая в целом центральные затворы, следует отметить, что на величину оптического КПД влияют относительная ширина щели m , характер движения затвора, величина относительного отверстия объектива, относительный радиус диска q :

$$q = r_d/r_0, \quad (153)$$

где r_d — радиус диска, т. е. расстояние между центрами круга сечения плоскостью диска конуса лучей, проектирующих данную точку снимка, и осью вращения диска; r_0 — радиус действующего отверстия объектива в плоскости диска.

При конструировании центральных затворов необходимо исключить возможность засечки ламелей, т. е. вырезы дисков должны иметь перемычку. Материал, из которого изготавливаются диски центральных затворов, должен обладать достаточной жесткостью, чтобы диски вращались строго в своей плоскости. При съемке широкоугольными объективами следует учитывать, что перекрытие между дисками не всегда обеспечит светонепроницаемость затвора. Предельное значение угла поля зрения определится формулой

$$2\omega = 2\arctg b/l, \quad (154)$$

где b — величина перекрытия ламелей; l — расстояние между крайними дисками.

Фотозатворы типа жалюзи устанавливаются между оптическими компонентами объектива КСК или между объективом и плоскостью изображения. Затворы жалюзи обеспечивают объективы со значительными диаметрами действующего отверстия. Они имеют большое число ламелей (десять—двенадцать), в то время как центральные затворы две—четыре ламели. Затворы жалюзи, у которых ламели имеют прямоугольную форму, называются «параллельные жалюзи». Если ламели имеют трапециевидную форму, то оси их вращения должны пересекаться в точке, лежащей на оптической оси объектива. Эти затворы называются «радиальные жалюзи». Связь между ламелями обеспечивается специальной рейкой, зубцы которой входят в зацепление с трубками осей ламелей. Оси вращения всех ламелей лежат в одной плоскости, перпендикулярной к оптической оси объектива.

В закрытом состоянии ламели затвора жалюзи должны иметь некоторое перекрытие для обеспечения светонепроницаемости. Если затвор закрыт, то плоскость лепестков будет перпендикулярна к оптической оси объектива. Если плоскости лепестков будут параллельны оптической оси объектива, то лучи света будут проходить через затвор. Фазы работы затвора жалюзи состоят из его открытия и закрытия, т. е. в отличие от дру-

гих затворов у жалюзи нет полного открытия затвора. Если ламели движутся непрерывно, то закрывание объектива начинается сразу после его открытия. Так как ламели затвора находятся в пучке световых лучей и не выходят из него в момент экспонирования, то это приводит к уменьшению оптического КПД. В открытом состоянии затвора сечение ламелей составляет до 10 % площади светового потока. Затворы жалюзи бывают прямого и возвратного действия. Если при выдержке ламели повернулись на угол, несколько меньший 180° , а при последующей выдержке — на такой же угол в противоположную сторону, то такие затворы называются прямого действия. Если же ламели во время выдержки в период открытия затвора повернулись в одну сторону, а в период закрытия в другую, то

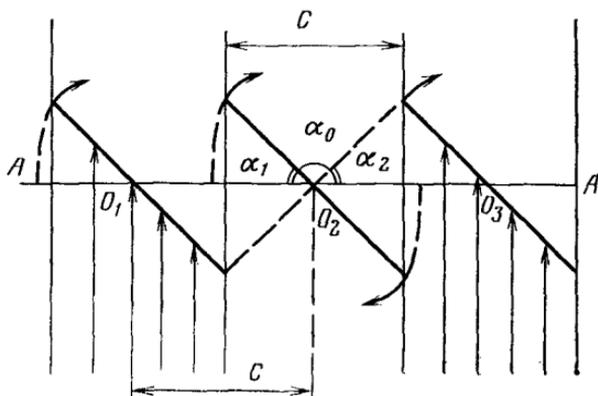


Рис. 38.

такие затворы называются возвратного действия. Открытие объектива происходит после того, как ламели повернутся на угол, больший α_1 (рис. 38). На угле α_0 поворота ламелей будет обеспечиваться экспонирование светочувствительного материала, и этот угол называется углом выдержки. За это время проекция ребра ламелей на плоскость AA пройдет путь C . В конце движения при повороте ламелей на угол α_2 , ламели не пропускают лучей. Для смягчения удара ламелей применяют амортизаторы, и угол α_2 носит название угла амортизации. Величины углов α_1 , α_0 , α_2 зависят от коэффициента перекрытия ламелей, то сумма этих трех углов $\sim 180^\circ$. Затворы, относящиеся к типу параллельных жалюзи, вносят искажения по полю снимка. Так, при равномерном движении ламелей максимальное изменение выдержки составит порядка 30—35 %. При равноускоренном движении ламелей неравномерность выдержки в правой части составит 50 %, в левой части снимка изменение выдержки составит менее 10 %. Затворы с параллельными жалюзи из-за переменной величины разгона ламелей вдоль на-

правления, перпендикулярного к их осям, дают геометрическое искажение снимка из-за неодновременности выдержки по всему кадру. Сдвиг по времени начала выдержек $t_{иск}$ определится так:

$$t_{иск} = t_{P_2} - t_{P_1}, \quad (155)$$

где t_{P_1} — время разгона, относящееся к ближней точке; t_{P_2} — время разгона для точки, которая экспонируется позднее.

Для крайних ламелей время искажения будет наибольшим. Величина искажения δ тем больше, чем больше угол поля зрения объектива. Она зависит от скорости носителя \bar{W} , высоты фотографирования H и фокусного расстояния камеры f' :

$$\delta = \frac{\bar{W}f'}{H} t_{иск}. \quad (156)$$

Если ламели вращаются при четных экспозициях в одну сторону и при нечетных в другую, то и величина сдвига изображения будет то положительной, то отрицательной.

В затворах жалюзи возвратного действия ламели при открывании объектива поворачиваются на угол $\alpha = 90^\circ$, а при закрывании они возвращаются в исходное положение. В затворах такого типа имеется возможность увеличить диапазон выдержек, повысить оптический КПД затвора за счет фазы полного открытия, когда перед началом возвратного движения ламели останавливаются.

Следует отметить, что в период полного открытия затвора, при остановке ламелей почти все лучи параллельного пучка проходят на светочувствительный слой, задерживается только незначительная часть за счет толщины ламелей. Если пучок будет сходящийся, то не все лучи дойдут до центральной точки снимка, часть их будет отсечена за счет толщины ламелей, а также их ширины. Из пучка лучей будут вырезаны затемненные площадки. Лучи, падающие на эти площадки, будут задержаны затвором. Поверхность снимка будет освещаться неравномерно. В левой части снимка эта неравномерность несколько сгладится при вращении ламелей, в правой же части это уже не окажет влияния. Кроме того, следует учитывать, что лучи, отсекаемые боковыми сторонами ламелей во время их остановки, будут многократно отражаться и создавать дополнительный «паразитный» свет, не идущий на построение изображения, а вуалирующий снимок. Затворы с радиальными жалюзи располагают между линзами объектива и применяют в длиннофокусных камерах, с большим диаметром действующего отверстия. Другие затворы для этих объективов (кроме шторного) создать сложно, а затворы типа радиальные жалюзи имеют малые габаритные размеры по сравнению с открываемым отверстием. Ламели затвора также располагаются

внахлестку, с постоянной величиной перекрытия и имеют форму трапеции. Светосила объектива несколько уменьшается из-за того, что центральная опора затвора, крестовина и ламели всегда находятся в поле зрения.

Регулирование выдержки в затворах осуществляется изменением усилия главной пружины затвора в некоторых пределах. Это применяют в шторных затворах, центральных и жалюзи. Изменение ширины светового окна, линейной или угловой скорости, также позволяет изменять диапазон выдержек в некоторых пределах. В некоторых затворах для регулирования t вводят дополнительную инерционную массу, за счет которой увеличивается приведенная масса приводного механизма, и выдержка изменяется. В роторных затворах изменение выдержки осуществляется за счет изменения числа оборотов двигателя, с помощью которого вращаются ламели затвора. Выдержку регулируют также комбинированным методом, т. е. совместным применением двух или нескольких методов, например, изменением ширины щели и крутящего момента главной пружины в шторном затворе и введением дополнительной массы в виде маховика и т. д. У шторных затворов основной недостаток — неравномерность выдержек, которая достигает при расположении шторки вблизи фокальной плоскости при малых выдержках ($1/100$) порядка 40 %. Для устранения этого недостатка применяют дизикциональные пружинные двигатели, изменяющие скорость разгона, в шторных затворах с независимым движением к моменту начала экспозиции ликвидируется перекрытие шторок. К затворам предъявляют также требования по его амортизации, т. е. максимального гашения удара при закрытии затвора. Амортизация может быть пневматическая, инерциальная, с помощью грузов, пружинная, с помощью электродвигателя, когда после экспозиции производят включение электродвигателя для обеспечения вращения в противоположную сторону. В роторных затворах, когда ламели затвора вращаются постоянно, т. е. остановка после каждой экспозиции не происходит, гашение не имеет существенного значения. Движение прекращается в конце съемки, за счет потери кинетической энергии. В шторных затворах также не применяют амортизационных устройств, так как шторка изготовлена из материала, обладающего некоторой упругостью. Затворы должны обеспечивать работоспособность и стабильность выдержек при высоких и низких температурах, т. е. должны быть морозостойкими. Это обеспечивают затворы с параллельными жалюзи, в то время как другие изменяют выдержку или отказывают в работе. Для устранения этих недостатков ламели затворов и шторки делают из специальных материалов, затворы обогревают.

Одной из характеристик затвора является его светонепроницаемость. Так, у затворов типа жалюзи, несмотря на пере-

крытие между ламелями, бывает некоторое «щеление», из-за чего в затвор вводят дополнительную предохранительную заслонку, которая открывается перед экспонированием. В центральном затворе прямого действия с четырьмя ламелями также не обеспечивается полная светонепроницаемость. В шторных затворах разной конструкции применяют разные устройства в виде предохранительной шторки или предохранительной заслонки.

§ 29. КАССЕТЫ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ КАМЕР

Кассета КСК служит для размещения светочувствительного материала — пленки, ее транспорта после очередной экспозиции на величину кадра или непрерывного транспорта в щелевых камерах. В кассете имеется механизм, предназначенный для выравнивания пленки в плоскость перед ее экспонированием. Двигателем, приводящим механизмы кассеты в движение, служит электромотор постоянного тока, получающий энергию в 28 В и расположенный на корпусе камеры, внутри кассеты или вне ее. Кассеты различаются по конструктивным признакам, транспортирующим устройствам, способам выравнивания пленки в плоскость. Конструктивные параметры кассеты определяют скорость перемотки пленки, ее выравнивание, что влияет на величину цикла работы всей съемочной камеры. Запас пленки, размещаемой в кассете, также определяется устройством транспортирующего механизма, мощностью электродвигателя, параметрами съемочного процесса. При выполнении крупномасштабной съемки длиннофокусными камерами при автоматической (без оператора) работе запас пленки, размещаемой в кассете, может быть более 100 м. К транспортирующим механизмам кассет предъявляют требования обеспечения равенства длин отрезков пленки, перемотанных после очередного экспонирования, т. е. сумма длины кадра и межкадрового промежутка должна быть постоянной величиной. Транспортирующий механизм кассеты должен обеспечивать высокую скорость перемотки пленки, т. е. время при общем цикле работы КСК 0,8—1,0 с на перемотку пленки порядка 0,3—0,4 с, при перемотке пленки должны отсутствовать напластования, механические повреждения, электроразряды. Транспортирующие механизмы могут быть с ведущей катушкой или ведущим мерным валиком. В механизм транспорта пленки входят подающая и приемная катушки, измерительный валик, привод электродвигателя, связанный через фрикционную передачу с приемной катушкой, другие вспомогательные элементы. Электропривод автоматически включается после очередного экспонирования кадра и начинается перемотка пленки. Наибольшее распространение получили механизмы с ведущим мерным валиком, в основе работы этих устройств лежит принцип, предложенный

и осуществленный в России Поте в 1913 году. Механизм транспорта пленки должен заменить экспонированный кадр и подвести новый участок пленки. При транспортировке пленки вращается измерительный валик, контакт с которым осуществляется или с помощью перфорационного зубчатого зацепления, или за счет прижима пленки к валику, если на пленке нет перфорации. Когда измерительный валик сделает определенное число оборотов, соответствующих заданной длине пленки, электропривод отключается и пленка останавливается. Чтобы обеспечить необходимое натяжение пленки в процессе работы механизма, подающая катушка имеет фрикционы, с помощью которых она закрепляется на оси вращения. За каждый цикл работы транспортного механизма на принимающую катушку наматывается одинаковое количество пленки. Изменение числа оборотов наматывающей катушки может осуществляться способом радиального регулирования, когда длина протягиваемой пленки рассчитывается по величине радиуса наматывающей катушки.

Если съемка производится КСК с механической компенсацией изображения, то пленка в такой камере непрерывно движется. Это обеспечивается транспортным механизмом, включающим дополнительный электропривод, обеспечивающий постоянное движение пленки с заданной скоростью. Перемотка пленки на величину одного кадра осуществляется с помощью другого электропривода, который подключается только на время перемотки пленки на длину одного кадра. В кассете имеется также механизм для выравнивания пленки, т. е. чтобы фотографирование производилось на плоскость, в целях обеспечения высоких измерительных свойств снимка. Существует два способа выравнивания пленки: механический и пневматический. В механическом способе выравнивание пленки производится путем прижатия ее к выравнивающему плоскопараллельному стеклу. На стекле наносят тарированную сетку отметок (кресты, кружки), по измерениям координат которых производят вычисление ошибок из-за деформации пленки и величины невыравнивания, т. е. определяется искажение ортоскопичности изображения. В случае применения выравнивающего стекла оно должно входить в расчет оптической системы КСК и не вносить изменений в положение фокальной плоскости камеры.

Если установить выравнивающее стекло, то фокусное расстояние оптической системы увеличится, причем величина $\Delta f = f' - f''$ будет тем больше, чем больше толщина стекла δ . Смещение изображения точек для лучей, идущих под углом к оптической оси, будет тем больше, чем больше угол, поэтому в широкоугольных камерах на краях снимка будут значительные геометрические искажения из-за наличия выравнивающего стекла.

Наружная плоскость стекла должна совпадать с фокальной плоскостью объектива. Лучи, идущие перпендикулярно к поверхности стекла, не искажают изображения; лучи, падающие под углом к поверхности стекла, вносят искажение изображения объекта. Этот недостаток в значительной степени устраняется, если стекло входит в расчет оптической системы. На рис. 39 приведена схема широкоугольного объектива с выравнивающим стеклом, входящим в расчет оптической системы.

Механический метод выравнивания пленки в плоскость во время ее экспонирования прост, продолжительность операций по выравниванию пленки мала, метод не требует дополнительных приспособлений. К недостаткам метода следует отнести то, что стекло увеличивает потери светового потока, идущего от объекта, на стекло могут попасть соринки, которые будут проектироваться на эмульсионный слой, в момент прижима пленки стекло прогибается, причем степень прогиба стекла в разных точках разная, из-за трения пленки о стекло могут возникнуть электроразряды, которые могут засветить пленку.

Пневматический метод выравнивания пленки в плоскость требует наличия устройств, обеспечивающих разность давлений между полостью камеры и выравнивающего стола. Если создается положительное давление, то воздух нагнетается во внутреннюю полость камеры и пленка прижимается к плоскости выравнивающего стола избыточным (положительным) давлением. Большое распространение получил пневматический метод выравнивания пленки в плоскость, когда разность давлений создается путем отсасывания воздуха между пленкой и прижимным столом (отрицательное давление). Поверхность прижимного стола имеет неглубокие канавки и отверстия, по которым происходит отсасывание воздуха с помощью вакуум-помпы или подключением шланга от кассеты камеры к шлангу пониженного давления (трубка Вентури на самолетах при полете на высотах менее 10 км). Иногда применяют предварительное натяжение пленки перед ее пневматическим выравниванием. Так как объем полости выравнивающего стола невелик, то расход воздуха в слу-

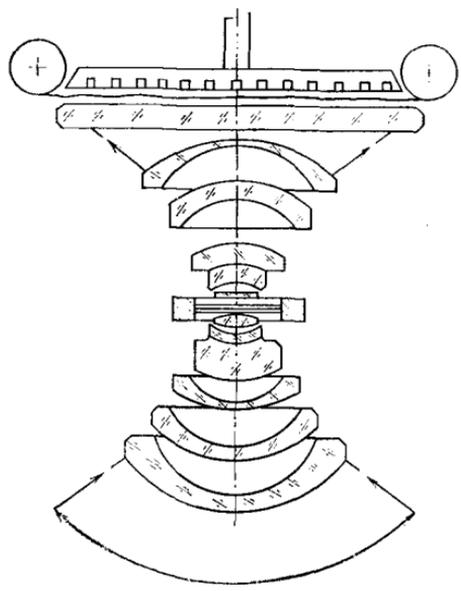


Рис. 39.

чае вакуумного метода невелик и обеспечивает необходимую точность выравнивания. К недостаткам метода относят то, что трудно обеспечить необходимый перепад давлений при полетах носителей на больших высотах, когда атмосферное давление весьма мало.

Кассеты перед полетами проходят испытания на обеспечение эксплуатационных характеристик, т. е. безотказность в работе в течение определенного количества циклов (до 20 тыс.), обеспечение светонепроницаемости, точность выдерживания длины кадра и междукадрового промежутка, точность выравнивания пленки в плоскость. В кассетах космических съемочных камер должно быть обеспечено размещение значительного запаса пленки, телеметрическая индикация процесса работы механизмов кассеты, измерение оставшейся пленки после каждого экспонирования. Контроль выравнивания пленки в плоскость осуществляется перед полетом одним из способов, обеспечивающих необходимую точность.

Существуют прямые методы контроля, основанные на непосредственном измерении величины невыравнивания, например, с помощью профилографа, и косвенные, основанные на фиксации и измерении величины невыравнивания. К косвенным методам относят проектирование предметов на пленку под определенным углом, фотограмметрические методы, метод интерференции света, фотографирование растров и другие. Наиболее точные результаты обеспечивает метод интерференции света.

В общей схеме работы КСК ее основной узел — кассета — определяет цикл работы камеры, точность геометрического построения изображения из-за невыравнивания пленки, длительность сеансов фотографирования, исходя из размещаемого запаса пленки, фотометрические характеристики (отсутствие засветки).

При перемотке пленки должны отсутствовать механические повреждения и порыв пленки, что особенно важно при работе КСК на автоматических станциях, где нет возможности произвести перезарядку пленки.

§ 30. МНОГОЗОНАЛЬНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ СЪЕМКА

Многозональную космическую съемку выполняют с КЛА в целях получения снимков, в определенных узких зонах спектра для дешифрирования объектов местности.

Метод многозональной космической съемки предусматривает выбор зон спектра, определение спектрального яркостного диапазона фотографируемой местности, выбор приемника оптического изображения, определение условий первичной и вторичной обработки материалов съемки.

Многозональную космическую съемку можно подразделить по диапазону спектральных каналов, количеству информацион-

ных каналов. Наиболее часто используют 6 каналов для съемки в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазоне.

Выделение определенной зоны спектра производят с помощью светофильтров, которые устанавливают на объективах съемочных камер. Приемником потока лучистой энергии служат пленки, имеющие спектральную чувствительность в заданной области спектра. Рассмотрим схемы космических съемочных систем, которые отличаются по принципу приема информации об объекте.

Многозональная камера состоит из нескольких съемочных камер, кассет, блока управления.

Космическая фотосъемка объектов производится одновременно в нескольких узких зонах спектра фотосъемочными камерами. Изменение спектрального состава света производится с помощью светофильтров. Построение изображения осуществляется на приемнике лучистой энергии — фотопленке, которая должна быть оптимальна по своим спектральным характеристикам для данной зоны. Фотопленки черно-белые, имеющие разные сенситометрические характеристики, в связи с чем выдержки для разных каналов с учетом кратности светофильтра для данной пленки будут различны. Управление комплектом фотосъемочных камер осуществляется с помощью блока формирования команд БФК.

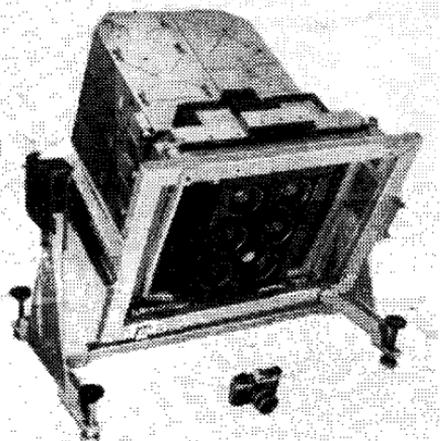


Рис. 40.

На рис. 40 приведен внешний вид многозональной фотокамеры МКФ-6М, предназначенной для съемки с борта космических летательных аппаратов. Камера состоит из корпуса, 6 кассет, рамы для установки на борту КЛА, пульта управления и электронного блока. В камере установлены шесть объективов Пинотар с фокусным расстоянием 125 мм. Угловое поле изображения при условии наименьшего виньетирования 42° , формат кадра 56×80 мм. Космическая фотосъемка производится одновременно всеми шестью объективами, в диапазоне длин волн 480 нм (1-й объектив), 540 нм (2-й объектив), 600 нм (3-й объектив), 660 нм (4-й объектив), 720 нм (5-й объектив) и 840 нм (6-й объектив). В камере установлен дисковый затвор с двумя дисковыми obturators, который обеспечивает ступенчатое изменение выдержки $\frac{1}{18}$, $\frac{1}{25}$, $\frac{1}{36}$, $\frac{1}{50}$, $\frac{1}{75}$, $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{130}$, с отклонением в шести каналах до 3 %.

Оптический коэффициент полезного действия более 75 %. Компенсация сдвига изображения достигается наклоном всей камеры во время экспонирования. Максимальный цикл работы камеры 5,0 с, минимальный 3,5 с. На пульте управления возможно задавать перекрытие 20 %, 60 % и 80 % с точностью до 3 %.

Фотокамера МКФ-6М работает от бортовой сети напряжением $27 \text{ В} \pm 2 \%$, потребляемая мощность 100 Вт. Основной корпус камеры имеет размеры $640 \times 620 \times 226$ мм, масса 73 кг, кассеты без пленки $270 \times 131 \times 558$ мм, масса каждой кассеты 11,5 кг, система рам для установки камеры (система подвески) имеет размеры $1050 \times 940 \times 470$ мм, масса 65 кг, управляющий визир $360 \times 320 \times 760$ мм, масса 18 кг, пульт управления $480 \times 220 \times 180$, масса 7 кг, блок электроники $544 \times 275 \times 182$ мм, масса 13 кг. Общая масса камеры МКФ-6М с шестью кассетами без пленки, системой управления и установки составляет 245 кг. На пленке помимо фотографического изображения местности для установки кадров в проекторе MSP-4 фиксируются высокоточные координатные метки в виде крестов и номера каналов. Для фотометрической обработки материалов космических съемок в каждый кадр впечатывается сенситометрический клин, имеющий 10 полей. Впечатывание номера кадра, часов, палетки для записей производится только в первом канале.

Впервые космическая съемка фотокамерой МКФ-6 была произведена с КЛА «Союз-22».

Для получения многоспектрального (синтезированного) изображения местности производится совмещение частичных изображений, полученных в узких зонах спектра на проекторе MSP-4.

§ 31. ПАНОРАМНАЯ ФОТОСЪЕМКА

Если фотографирование производится относительно вертикали со значительным углом наклона оптической оси с захватом местности от горизонта до горизонта, то оно называется панорамным. Для этой цели могут применяться кадровые съемочные камеры, которые производят одновременно плановую и перспективную съемку, общий их монтаж даст панорамный снимок. Но эта система громоздка, сложна и не обеспечивает необходимого качества. Панорамный снимок может быть получен и при съемке широкоугольным объективом, но качество изображения на краю этих снимков невысокое, кроме того, очень сложно создать длиннофокусный широкоугольный объектив. Для панорамной съемки разработаны специальные схемы съемочных камер, которые отличаются по конструктивным признакам и принципу построения изображения.

Методы панорамного фотографирования можно подразделить на два вида: перспективное и планово-перспективное. Сущность метода панорамного фотографирования заключается

и том, что изображение строится узким пучком лучей, поворачивающимся в момент фотографирования вокруг оси фотографирования, проходящей через заднюю узловую точку проектирования. Известны случаи, когда проектирование изображения происходит на коническую или цилиндрическую поверхность. В случае если проектирование происходит на коническую поверхность (общий случай), мы получим перспективное изображение (перспективно-панорамное), если проектирование происходит на цилиндрическую поверхность (частный случай), получим планово-перспективное (планово-панорамное) изображение. Общие положения панорамного фотографирования определяются конструкцией камер, принципом их действия, методом построения изображения. Эти особенности могут быть сформулированы следующим образом:

построение изображения осуществляется центральной частью поля зрения объектива, т. е. узким пучком лучей;

сканирование участка местности в пределах проектирующего пучка осуществляется перпендикулярно к направлению полета летательного аппарата;

проектирование может осуществляться на цилиндрическую и коническую поверхности;

при создании панорамных аппаратов необходимо учитывать, чтобы скорость движения пленки или поворота объектива была пропорциональна скорости полета летательного аппарата;

панорамные съемочные камеры могут быть циклическими или бесциклическими. Цикл работы панорамного аппарата определяется временем перемотки пленки на длину одного кадра, в бесциклических панорамных съемочных камерах пленка движется непрерывно;

панорамное фотографирование может осуществляться способом прямого или косвенного сканирования;

для работы панорамного фотоаппарата необходимо осуществлять механическую или оптическую компенсацию сдвига изображения.

Этот способ называют способом прямого сканирования.

При панорамном фотографировании на неподвижную пленку происходит непрерывный поворот объектива с жестко связанной щелью относительно пленки. Радиус цилиндра, на котором размещается пленка, равен фокусному расстоянию объектива. Ось вращения объектива проходит через заднюю узловую точку объектива.

В панорамной съемочной камере с качающимся объективом объектив качается вокруг оси вместе с экспонирующей щелью и строит изображение на пленке, которая в процессе экспонирования кадра неподвижна. Плоскость сканирования перпендикулярна к направлению полета. В процессе качания объектива будут фотографироваться разные участки земной поверхности.

Масштаб панорамного снимка переменный и будет определяться расстоянием до фотографируемого участка местности L , кратчайшим расстоянием L_0 , фокусным расстоянием объектива f' и углом между плоскостью полета и направлением на фотографируемый участок β :

$$\frac{1}{m} = \frac{f'}{L} = \frac{f'}{L_0} \cos \beta. \quad (157)$$

Изменение величины экспозиции осуществляется изменением ширины щели (время выдержки) и значения диафрагмы (изменение освещенности). Эта схема сканирования позволяет «осмотреть» поле зрения с угловым размером $140\text{--}160^\circ$.

Пространственно-частотная характеристика съёмочной системы панорамной съёмочной камеры $T_{п.ф}$ будет зависеть от передаточных свойств объектива $T_o(N)$, пленки $T_{пл}(N)$, характеристик, учитывающих сдвиги изображения $T_{сд}(N)$, обусловленные движением летательного аппарата и вибрациями $T_{виб}(N)$. Учитывая все эти факторы, можно записать:

$$T_{п.ф}(N) = T_o(N) T_{пл}(N) T_{сд}(N) T_{виб}(N). \quad (158)$$

Существуют также схемы панорамных съёмочных камер, когда объектив не качается, а вращается, что позволяет строить изображение с углом поля зрения, близким к 360° . Эта схема более совершенна, так как отсутствует резкое торможение объектива для его остановки. Это значительно улучшает качество изображения из-за уменьшения собственных колебаний системы панорамной съёмочной камеры. Время экспозиции определяется шириной щели. Компенсация сдвига изображения из-за перемещения летательного аппарата происходит с помощью линзового барабана. Он совершает качание, скорость которого изменяется по гармоническому закону. В момент экспонирования пленка неподвижна, из-за чего отпадает необходимость тщательной синхронизации пленки и вращения сканирующей системы. Схемы с вращающимися и качающимися объективами весьма громоздки, что является их крупным недостатком.

Тип панорамной съёмочной камеры	Метод получения панорамного снимка	Угол сканирования, градус	f' , мм
РАСА-70	Широкоугольный объектив	150×32	100
ВЗ8-120	Сканирование вращающимся объективом	120×21	300
КА-80	Оптическая консоль	120	600
КА-83А	То же	120	600
КА-85А	»	130	80

При панорамном фотографировании с подвижной пленкой происходит синхронный поворот проектирующего пучка лучей при помощи специальной вращающейся призмы или зеркала, установленного перед объективом камеры, с одновременным перемещением пленки. Экспонирование производится через неподвижную щель, максимально близко расположенную к пленке. Время экспонирования будет зависеть от ширины щели и отношения скоростей летательного аппарата и перемещения пленки.

В панорамной съемочной камере сканирующая призма Дове, внутренняя плоскость которой алюминирована, установлена перед объективом. Она совершает вращательное движение, причем ось вращения совпадает с направлением щели. Синхронно с вращением призмы перемещается фотопленка, находящаяся за щелью.

При вращении призмы производится фотографирование разных участков местности. В этой схеме панорамной съемочной камеры необходимо весьма точно синхронизировать точность перемещения пленки, вращения призмы и компенсации сдвига изображения. Двойная призма-куб, применяемая в панорамной съемочной камере, позволяет при повороте на 90° осматривать угол в 180° . Разрешающая способность системы зависит в том числе от построения изображения призмой. При незначительных изменениях температуры призмы происходит раздвигание изображения, что резко снижает разрешающую способность съемочной системы в направлении сканирования. При значительных изменениях температуры изображение будет плохим по всему кадру. Пространственно-частотная характеристика панорамной съемочной камеры $T_{п.ф}$ со сканирующей призмой зависит от факторов, указанных выше, а также от характеристик, учитывающих влияние сканирующих элементов $T_{с.э}(N)$:

$$T_{п.ф}(N) = T_0(N) T_{пл}(N) T_{сд}(N) T_{сд.в}(N) T_{с.э}(N). \quad (159)$$

Помимо указанных схем имеются также панорамные съемочные камеры с широким углом поля зрения в одной плоско-

Т а б л и ц а 3

1: μ_0	Диапазон выдержек	Размер пленки	Запас пленки, м	Масса, кг	Разрешающая способность, лин.мм
1 : 4,5	1/250—1/500 с	70 мм	75	16,5	103 — центр 47 — край
1 : 3,8— —1 : 7	1/70—1/2000 с	125×630 мм	75	79	118
1 : 3,5	0,29—14,4 мс	11,4—12,7 см	19,5	116	135
1 : 3,5	0,17—11,2 мс	11,4×12,7 см	500	104	70
1 : 2,8— —1 : 22	1/250—1/2000 с	70 мм	120	10	60

сти (до 160°) и небольшим углом поля зрения в другой плоскости. Экспонирование всего кадра производится одновременно, из-за чего отсутствует эффект воспроизведения фотографированной местности.

В табл. 3 приведены основные данные некоторых зарубежных панорамных камер.

Глава IV

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КСК

§ 32. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКТОМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМОЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Выполнение космической фотосъемки КЛА производится в автоматическом режиме, для чего в комплект фотосъемочной аппаратуры входит система управления.

Система управления КСК, установленная на борту КЛА, в общем случае должна решать следующие задачи:

создание временного масштаба в системе единого времени; изменение интервала фотографирования в зависимости от положения на орбите;

регистрация моментов съемки с точностью не ниже 10^{-1} с; измерение и регистрация времени асинхронности срабатывания затворов фотокамер при использовании многокамерных систем;

выполнение действий фотосъемочной аппаратуры в заданной последовательности;

управление многокамерными системами;

корректирование программ, заложенных с Земли.

Основными особенностями, определяющими требования к системе управления фотосъемочной аппаратурой, являются: различные методы навигации; большая протяженность маршрутов; переменная скорость относительно планеты; большая скорость движения КЛА; значительные высоты съемки; различные варианты ориентации оптических осей фотосъемочных камер.

Рассмотрим движение КЛА в инерциальной, т. е. неподвижной относительно звезд, прямоугольной геоцентрической системе координат $OXYZ$, начало которой совпадает с центром Земли.

Напомним, что ось OX этой системы направлена в точку весеннего равноденствия Υ , ось OZ — вдоль оси вращения Земли в сторону Северного полюса, а ось OY дополняет систему до правой.

В рассматриваемой системе координат векторное уравнение движения центра масс объекта представляют в виде системы трех дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} ma_x &= F_{x\Sigma} \\ ma_y &= F_{y\Sigma} \\ ma_z &= F_{z\Sigma} \end{aligned} \right\}, \quad (160)$$

где a_x, a_y, a_z — проекции мгновенного вектора ускорения на соответствующие оси координат; $F_{x\Sigma}, F_{y\Sigma}, F_{z\Sigma}$ — проекции суммарного вектора сил на соответствующие оси координат.

Для определения значения вектора положения на некотором временном интервале t необходимо проинтегрировать систему дифференциальных уравнений движения КЛА (160).

На практике, ограничивая учет некоторых возмущающих факторов и используя значения текущих координат и скорости, предвычисляют траекторию КЛА с достаточной точностью на несколько суток вперед, используя следующую систему дифференциальных уравнений движения:

$$\left. \begin{aligned} m \frac{dV_x}{dt} &= F_{x\Sigma}; & m \frac{dV_y}{dt} &= F_{y\Sigma}; & m \frac{dV_z}{dt} &= F_{z\Sigma} \\ dx/dt &= V_x; & dy/dt &= V_y; & dz/dt &= V_z \end{aligned} \right\}. \quad (161)$$

Так как траектория свободного полета КЛА поддается прогнозированию с достаточной степенью точности, нет необходимости в непрерывном измерении координат и скорости КЛА. Периодические измерения позволяют вычислить медленную девиацию действительной траектории КЛА по отношению к эфемеридной (предвычисленной).

Навигационные измерения дают возможность установить взаимное расположение КЛА и ближайших небесных тел Солнечной системы. Это позволяет определить параметры орбиты.

Точность такого определения орбиты оценивается соотношениями

$$\left. \begin{aligned} \Delta q_i &= \sum_n \frac{\partial q_i}{\partial h_n} \Delta h_n + R_{q_i} \\ \sigma_{q_i} &= \sum_n \left(\frac{\partial q_i}{\partial h_n} \right)^2 \sigma_n^2 + 2 \sum_n \frac{\partial q_i}{\partial h_n} \frac{\partial q_i}{\partial h_n} \gamma_{nn'} \sigma_n \sigma_{n'} + R'_{q_i} \end{aligned} \right\}, \quad (162)$$

где q_i — элементы орбиты; h_n — измеряемые параметры; n — число измеряемых параметров; $\frac{\partial q_i}{\partial h_n}$ — частные производные элементов орбиты по измеряемым параметрам; $\gamma_{nn'}$ — коэффициент корреляции; $\Delta h_n, \sigma_n^2$ — ошибка и величина дисперсии; R_{q_i}, R'_{q_i} — остаточные члены.

Из соотношения (162) следует, что точность определения элементов орбиты зависит от состава измеряемых параметров, точности их измерения и значений частных производных элементов орбиты по измеряемым параметрам.

В траекторных измерениях участвуют различные по назначению устройства, образуя единый замкнутый контур.

В состав контура траекторных измерений входят следующие средства: центр управления полетом; космический аппарат; наземные станции, измеряющие текущие значения параметров движения объектов; бортовые системы автономной космической навигации; аппаратура службы единого времени (СЕВ), создающая единую электронную шкалу на всех средствах контура; бортовые цифровые вычислительные машины и наземные ЭЦВМ, выполняющие математические операции для определения параметров траектории по данным измерений, а также долгосрочное прогнозирование движения КЛА.

На основе поступающей информации о полете КЛА производят уточнение параметров космической съемки в соответствии с коррекцией орбиты.

Для получения космических снимков, обеспечивающих составление топографических карт, должны быть выполнены следующие основные условия:

каждая экспозиция должна производиться точно в заранее определенном месте пространства относительно объекта съемки; оптическая ось фотокамеры в момент экспозиции должна быть направлена на центр масс планеты или угол отклонения от вертикали должен быть определен одним из известных методов для каждого снимка;

должны быть определены параметры движения КЛА.

Наиболее важным является обеспечение необходимой точности измерения и привязки результатов измерений к временной шкале СЕВ (служба единого времени), которую можно рассматривать как составляющую ошибок вычисления параметров движения КЛА:

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_{\Delta t} &= \dot{D}_{\Delta t} + \ddot{D} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \\ \Delta \beta_{\Delta t} &= \Delta \varepsilon_{\Delta t} = \Delta \theta_{\Delta t} = \Delta \dot{\theta}_{\Delta t} + \ddot{\theta} \frac{\Delta t^2}{2} + \dots \\ \Delta \dot{D}_{\Delta t} &= \Delta \ddot{D}_{\Delta t} + \dots \end{aligned} \right\}, \quad (163)$$

где Δt — ошибка привязки результатов измерений к СЕВ; $\Delta D_{\Delta t}$ — ошибка измерения дальности, обусловленная ошибкой привязки результатов измерения к СЕВ; $\Delta \theta_{\Delta t}$, $\Delta \dot{D}_{\Delta t}$ — аналогичные ошибки измерения угла и радиальной составляющей скорости соответственно.

Для оценки величин ошибок измерения параметров $\Delta D_{\Delta t}$; $\Delta \theta_{\Delta t}$; $\Delta D_{\Delta t}$ необходимо вычислить производные от этих параметров.

В настоящее время для КЛА, совершающих облет планеты, различают два основных метода навигации — метод наземного сопровождения и метод автономного определения направлений. Для беспилотных кораблей, совершающих облет планет Солнечной системы, используется смешанный метод навигации.

Оба вида навигационных измерений дополняют друг друга.

Общие черты, с одной стороны, и различия, с другой, двух методов навигации состоят в следующем:

оба вида навигации базируются на оптимальной обработке результатов периодических измерений с учетом законов небесной механики и требуемой точности;

навигационные измерения с помощью наземного метода для конкретной станции выполнимы лишь в случае, когда КЛА находится достаточно высоко над горизонтом этой станции;

для автономных навигационных измерений необходима угловая стабилизация КЛА в определенной ориентации;

наземные станции навигационных измерений могут сопровождать одновременно лишь ограниченное число КЛА, для расширения их возможностей используют увеличенное количество станций со сложной коммуникационной сетью;

возможности автономной навигации ограничены допустимым весом бортовых чувствительных элементов и ЭВМ;

наземные средства в отличие от большинства автономных средств КЛА многократного действия;

возможность использования наземных средств КЛА ограничена радиотенью планеты.

При смешанном методе навигации определение и корректирование орбиты КЛА производится совместно наземными средствами и бортовой автономной навигационной системой.

Характерными для этого метода являются необходимость угловой стабилизации КЛА в момент космической съемки; минимальная масса автономных навигационных чувствительных элементов; неограниченное использование смешанного метода в районах радиотени; возможность корректирования орбиты КЛА наземными станциями слежения по информации, поступающей от бортовых автономных навигационных устройств.

При космической съемке наиболее важным является обеспечение необходимой точности и привязки результатов измерений к временной шкале, которую можно рассматривать как составляющую ошибок вычисления параметров движения КЛА.

При допустимых ошибках измерения дальности и угла ошибка привязки результатов измерений к СЕВ при наземном методе сопровождения не должна превышать $1 \cdot 10^{-3}$ с.

При допустимых расчетных значениях ошибок измерений дальности и скорости ошибка привязки результатов измерений не должна превышать $1 \cdot 10^{-2}$.

Таким образом, привязка результатов измерений при космической фотосъемке должна находиться в пределах $1 \cdot 10^{-2}$.

Одним из основных требований, предъявляемых к системе управления фотосъемочной аппаратурой, является выдерживание интервала съемки, обеспечивающего заданное продольное перекрытие в соответствии с формулами (73), и выдача целого ряда временных программ управления для основных узлов фотокамер в реальном масштабе времени. Для этой цели применяют в качестве бортовых приборов различные временные устройства.

В зависимости от требуемой точности и задач КЛА в целом используются в основном два метода коррекции временных механизмов — метод астрономического измерения времени и беззапросный.

Ошибки астрономического метода измерения времени могут быть вызваны ошибками определения направлений на центры небесных тел, ошибками координат станций наблюдений и ошибками в определении места положения КЛА. Это вызывает ошибки в определении сферических углов и в конечном счете приводит к неточной коррекции временного механизма.

С учетом ряда явлений, обусловленных атмосферой планеты, особенностями работы фотоследящей системы, установленной на борту, абберациями и др., ошибка в определении направлений на спутник — планету возрастает до $1'$.

Беззапросный метод, основанный на сравнении частоты принятого сигнала и колебаний специального эталона частоты, установленного на КЛА, используется при способе наземного сопровождения и смешанном способе навигации.

§ 33. ЧАСТОТНЫЙ И КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ ОТНОШЕНИЯ W/H ПРИ ФОТОСЪЕМКЕ

Рассмотрим методы, позволяющие автоматизировать работу блока формирования команд. Как известно, интервал фотографирования, т. е. время между двумя последовательными экспозициями, определяющее продольное перекрытие фотоснимков, зависит от высоты и скорости полета:

$$\tau = Hb_k/Wf_k, \quad (164)$$

где W — истинная скорость КЛА; H — высота над фотографируемой местностью; b_k — заданный базис фотографирования; f_k — фокусное расстояние камеры.

При решении задачи компенсации сдвига изображения также возникает задача о вычислении отношения W/H , так как скорость v перемещения изображения в фокальной плоскости

камеры пропорциональна отношению скорости к высоте полета:

$$v = f' \frac{W}{H}. \quad (165)$$

Таким образом, измеряя скорость перемещения изображения в фокальной плоскости камеры, мы косвенным образом решаем задачу вычисления W/H .

Устройство, преобразующее световое изображение фотографируемого ландшафта в электрический сигнал, будем называть в дальнейшем датчиком скорости изображения (ДСИ).

Использование электрического сигнала на выходе ДСИ в системах управления фотографических камер обуславливается способом транспортировки фильма и назначением фотокамеры. В топографических КСК, в которых транспортировка фильма идет по кадрам, сигнал с выхода ДСИ может использоваться в сервосистемах для обеспечения заданного продольного перекрытия с высокой степенью точности.

При непрерывной транспортировке фильма, как это имеет место в щелевых камерах, сигнал используется для автоматической синхронизации пленки и изображения местности. В этом случае осуществляется механическая компенсация сдвига изображения.

Рассмотрим автоматические устройства, обеспечивающие компенсацию сдвига изображения, в основу работы которых положены корреляционный и частотный методы определения характеристик сигнала на выходе ДСИ.

В корреляционном методе компенсации сдвига изображения электрический сигнал, поступающий с фотоэлемента датчика скорости изображения, можно рассматривать как случайную функцию времени, представленную одной реализацией $\xi(t)$, значения которой в любые моменты времени являются величинами случайными. Это очевидно, так как распределение объектов с разными яркостными характеристиками по линии полета является чисто случайным.

Электрический сигнал на выходе ДСИ как случайная функция времени является также функцией стационарной, т. е. функция распределения любого порядка такого случайного процесса $W_n(x_1 x_2 \dots x_n \dots t_1 t_2 \dots t_n)$ не меняется при любом сдвиге этого процесса по оси времени. Начало отсчета для анализа стационарного случайного процесса не имеет никакого значения. Такие статистические характеристики процесса, как среднее значение (или первый момент одномерного закона распределения)

$$m_1 \{ \xi(t) \} = \int_{-\infty}^{+\infty} x W_1(x, t) dx = a(t) = a_0, \quad (166)$$

дисперсия (второй центральный момент одномерного закона распределения)

$$m_1 \{[\xi(t) - a_0]^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - a)^2 W_1(x, t) dx = \sigma^2(t), \quad (167)$$

являются постоянными и не зависят от времени. Корреляционная функция стационарного случайного процесса (или смешанный второй начальный момент двумерного закона распределения) зависит только от

$$m_1 \{[\xi(t) - a_0]^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - a)^2 W_1(x, t) dx = \sigma^2(t) \quad (168)$$

ввиду того, что вторая функция распределения зависит от τ :

$$W^2(x_1, x_2, t_1, t_2) = W(x_1, x_2, t_1 - t_2). \quad (169)$$

Далее необходимо указать на то, что сигнал с выхода ДСИ принадлежит к классу эргодических стационарных процессов. Отметим, что случайный процесс является эргодическим, если любая его реализация имеет одни и те же статистические характеристики, т. е. с течением времени одна реализация случайного процесса испытывает в среднем одни и те же свойства, что и любая другая реализация.

Для корреляционной функции на основании теоремы эргодичности процесса выражение запишется в виде

$$B(\tau) = m_1 \{ \xi(t) \xi(t + \tau) \} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) \xi(t + \tau) dt. \quad (170)$$

Такая функция называется автокорреляционной и в данном случае с хорошим приближением описывает свойство случайного процесса.

Корреляционную функцию случайного процесса изменения напряжения на выходе датчика скорости изображения можно использовать в системах управления камер, так как она будет зависеть от скорости перемещения изображения. Для нахождения корреляционной функции используются корреляционные системы, в состав которых входят цепь задержки, умножитель, интегрирующая цепь и регистрирующий прибор.

Так, если мы имеем какой-то сигнал и тот же сигнал, сдвинутый по времени, то корреляционная функция

$$B(\tau) = \lim \frac{1}{T} \int_0^T \xi(t) \xi(t + \tau) dt \quad (171)$$

будет характеризовать наш случайный процесс в зависимости от степени сдвига. При $\tau=0$ корреляционная функция будет максимальной.

Рассмотрим блок-схему устройства, выполняющего компен-

саию сдвига изображения, т. е. синхронизацию движения фильма и изображения (рис. 41).

Оптический узел этого устройства 2, называемый двухщелевым коррелятором, работает следующим образом. Фотоэлементы 3 и 4 воспринимают один и тот же участок движущегося изображения 1, но не сразу, а с задержкой $\tau = d/v$, где v — скорость изображения; d — расстояние на пленке между фотоэлементами. Сигнал с первого фотоэлемента записывается записывающей головкой 9 после предварительного усиления 5, 6 на магнитный барабан 10, скорость вращения которого регулируется. В то время когда участок изображения, соответствующий записи на магнитном барабане, будет восприниматься вторым фотоэлементом, записанный от первого фотоэлемента сигнал при вращении барабана окажется под воспроизводящей головкой 8. В том случае, если скорость магнитного барабана такова, что записанный сигнал с первого элемента окажется под воспроизводящей головкой в один момент времени с аналогичным сигналом, поступившим со второго элемента, то сдвиг во времени τ практически будет отсутствовать, а корреляция будет максимальна.

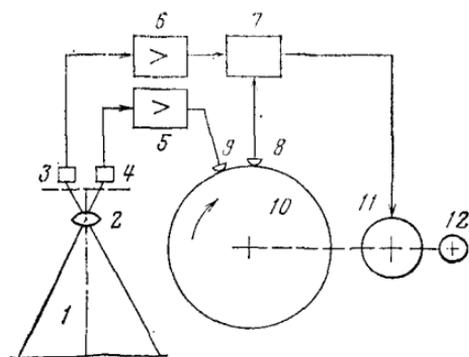


Рис. 41.

В этом случае корреляционный блок 7, на вход которого поступили оба сигнала, выработает сигнал, максимальный по амплитуде. Это означает, что скорость вращения магнитного барабана пропорциональна скорости перемещения изображения в фокальной плоскости камеры. В противном случае задержка во времени τ будет заметно отличаться от нуля, и это отразится на значении корреляционной функции. Различие в значении корреляционной функции $V_{\tau_{\max}} - V_{\tau}$ будет пропорционально разнице в скорости вращения барабана и движения изображения, которую надо установить. Это выполняется автоматически: сигнал, характеризующий сдвиг изображения с корреляционного блока, поступает на мотор-генератор 11, регулирующий вращение магнитного барабана. Мотор-генератор будет изменять скорость вращения барабана до тех пор, пока с корреляционного блока не поступит сигнал (соответствующий $V_{\tau_{\max}}$), говорящий о том, что скорость вращения барабана кратна скорости изображения. В конечном итоге скорость вращения барабана, через синхрогенератор передается к исполнительному механизму транспортировки фильма 12.

Устройства, реализующие корреляционный метод измерения скорости изображения, обеспечивают заданное продольное перекрытие с точностью $2 \div 2,5 \%$.

В частотном методе компенсация сдвига изображения осуществляется на основании информации, заключенной в электрическом сигнале, который поступает с оптического узла ДСИ (рис. 42). В фокальной плоскости оптического блока ДСИ 1 находится стеклянная пластина с нанесенными на ней через строго равные промежутки непрозрачными и прозрачными линиями. Эта решетка соответствующим образом модулирует световой поток, поступающий от движущегося изображения местности, а затем весь свет собирается конденсорной линзой в плоскость фотоэлемента. Фотоэлемент, воспринимая пульсирующий световой поток, вырабатывает соответствующий электрический сигнал, который, пройдя через усилитель 2, частотомер 3, дифференциальный усилитель 4, содержит информацию для servосистемы 7, необходимую для компенсации сдвига изображения в фотокамере. Блок опорного напряжения 6 служит для определения сдвига изображения в зависимости от фокусного расстояния f' и продольного перекрытия p . Блок опорного напряжения связан с мотор-генератором 5.

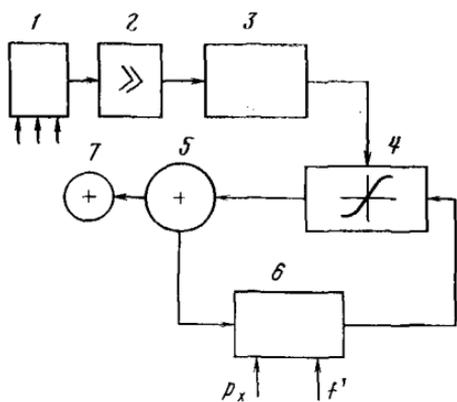


Рис. 42.

Следует отметить, что перемещение изображения относительно стороны щели (а также системы щелей) перпендикулярно. В случае неперпендикулярности параметры, характеризующие сигнал, будут изменяться пропорционально косинусу угла наклона ДСИ относительно горизонта.

Сигнал, характеризующий изменение светового потока, получится, если над территорией с заданным распределением яркости перемещать систему из m щелей.

Предположим, что на такое распределение освещенности накладывается в какой-то момент времени i решетка с параметрами m , n . Пользуясь методом графического интегрирования, получаем суммарный световой поток, прошедший сквозь решетку в этот момент времени A_i . В следующий момент времени решетка займет новое положение, при котором световой поток, прошедший сквозь нее, будет равен предыдущему.

Итак, повторяя эту операцию K раз, получаем ординаты точек кривой изменения сигнала на выходе фотоэлемента. Результирующая кривая носит периодический синусоидальный

характер с частотой, пропорциональной скорости перемещения изображения. Так, если бы у нас мимо решетки двигалось яркое пятно со скоростью $v = \frac{di}{dt}$, то частота сигнала для решетки с периодом $\frac{1}{2W}$ была бы равна

$$F = \frac{di}{dt} \cdot \frac{1}{2W} \quad (172)$$

или

$$F = F_{об} \cdot \frac{W}{H} \cdot \frac{1}{2W}.$$

Кривые распределения освещенности с другими решетками показывают определенную зависимость формы, а главным образом частоты получаемого сигнала от геометрии решетки.

С точки зрения теории информации этот процесс складывается следующим образом.

Первичная информация, передаваемая объективом, состоит из двумерного распределения бесконечного числа точечных источников различной интенсивности $Q(x, y)$. Так как изображение движется, то распределение зависит от времени $Q_2(t)$. С другой стороны, изображение передаточной функции объекта можно представить в виде ряда Фурье, т. е. в виде суммы бесконечного числа синусоидальных колебаний, охватывающих бесконечный спектр частот. Хотя их начальные фазы носят хаотический характер, они постоянны во времени (так как сам объект признается не меняющимся во времени).

Прежде всего необходимо сказать, что существуют ограничения, свойственные развертывающей оптической системе (т. е. оптическая система ведет себя как полосовой фильтр низких частот). Поэтому не все гармонические составляющие, присутствовавшие в объекте, воспроизводятся в изображении, что является следствием узости канала, по которому передается информация. Надо иметь в виду, что на первичные данные оказали воздействие следующие факторы: а) апертура диафрагмы собирающей линзы; б) геометрия щели; в) разрешающая способность объектива; г) спектральная и частотная характеристика фотоэлемента; д) частотная характеристика регистратора.

Таким образом, решетку и линзы можно рассматривать как фильтры пространственных частот ДСИ при условии, что они известны. Результирующий сигнал можно выразить через суммарное воздействие на первичные данные всех элементов датчика с помощью преобразования Фурье

$$I(x, y, t) = Q_1(x, y) Q_2(t) L_1(x, y) L_2(x, y) R(x, y). \quad (173)$$

В связи с тем, что основным элементом обоих датчиков является объектив, работа приборов в условиях плохой освещенности

ценности, контрастности и прозрачности атмосферы затруднены. На качество работы датчиков также сильно влияет вибрация особенно в корреляционном методе.

Атмосферные помехи, влияющие на качество работы датчиков, отпадают в случае отсутствия атмосферы.

Достоинством датчиков является их автономность, т. е. полное отсутствие связи с наземными приборами.

Датчики скорости изображения в сочетании с фотоэлементами, чувствительными в инфракрасной зоне, позволяют производить работу в условиях плохой освещенности и в ночное время суток.

Системы, работающие как по корреляционному, так и по частотному методу, могут быть применены для измерения и автоматической компенсации угла сноса.

§ 34. УСТРОЙСТВО КОМПЕНСАЦИИ СДВИГА ИЗОБРАЖЕНИЯ

При выполнении космической съемки кадровыми КСК из-за движения КЛА относительно местности возникает сдвиг изображения. Пленка в момент экспонирования остается неподвижной, а оптическое изображение движется, это приведет к изменению (ухудшению) разрешающей способности, точечный источник на пленке изобразится отрезком δ . Величина этого отрезка на местности S , соответствующая сдвигу δ , называется приведенным сдвигом изображения

$$S = \delta/M, \quad (174)$$

$$\delta = V_{\text{из}} \cdot t_{\text{ф}}, \quad (175)$$

где $V_{\text{из}}$ — скорость оптического изображения; M — масштаб.

Если производится плановая съемка или перспективная в сторону от направления полета, то величина приведенного сдвига $\delta = W \cdot t_{\text{ф}}$ будет постоянна по всему угловому полю зрения объектива. Если производится перспективная съемка вперед, то приведенный сдвиг изображения определится зависимостью

$$\delta = W \cdot t_{\text{ф}} \cdot \text{ctg}(\gamma + \beta), \quad (176)$$

γ — угол наклона оптической оси КСК вперед; β — угловое положение объекта относительно оси КСК.

Учитывая, что стабилизация КЛА осуществляется с высокой точностью, величиной линейного сдвига из-за угловых перемещений КЛА можно пренебречь.

Резкость оптического изображения объектов, определяемая закономерностью изменения количества освещения на границе объект—фон, из-за влияния сдвига изображения будет уменьшена. Контраст K изображения также будет уменьшен

$$K = \frac{H_0 - H_{\text{ф}}}{H_0}, \quad (177)$$

где H_o и H_ϕ — количество освещения объекта и фона оптического изображения.

Разрешающая способность космической съемочной системы в случае сдвига оптического изображения не превысит величины $R_{сд} = \frac{1}{\delta}$, а величина приведенной разрешающей способности $R_{сд}^{пр} = \frac{1}{S}$. Качество изображения, таким образом, в значительной степени определяется сдвигом изображения. Например, сдвиг изображения порядка 0,1 мм приведет к ухудшению качества изображения настолько, что увеличение снимка, его измерение или дешифрирование не даст необходимых резуль-

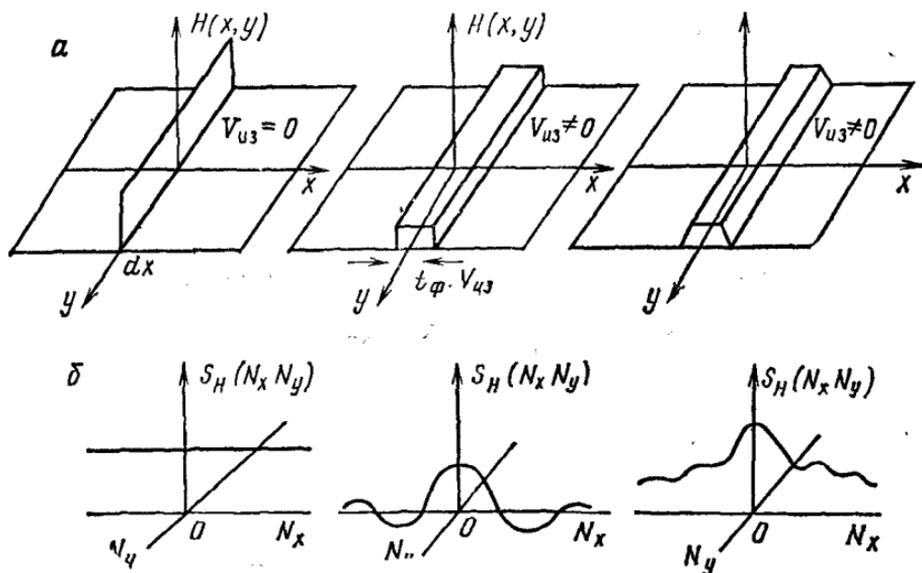


Рис. 43.

татов. Оценить влияние сдвига изображения на качество фотографического изображения можно с помощью пространственно-частотной передаточной функции.

Известно, что распределение освещенности вдоль отрезка δ зависит от формы характеристической кривой затвора. Если скорость изображения будет равна нулю $V_{из} = 0$, то распределение экспозиции на кадре при съемке объектов прямоугольной формы будет иметь вид, приведенный на рис. 43, а. Пространственно-частотный спектр линии не изменяется вдоль оси x и имеет одномерный характер:

$$S_H(N_x) = 1, \quad (178)$$

где N_x — пространственная частота вдоль оси x .

Распределение экспозиции при съемке линии идеальным затвором при условии $V_{из} \neq 0$ будет иметь в изображении сече-

ние в виде прямоугольника, причем основание его $\delta = V_{из} t_{\phi}$. Искажение пространственно-частотного спектра такого изображения линии показано на рис. 43, б. Формула, определяющая пространственно-частотный спектр изображения, имеет вид

$$S_{H_{из}}(N_x) = \frac{\sin \pi \cdot V_{из} \cdot t_{\phi} \cdot N_x}{\pi \cdot V_{из} \cdot t_{\phi} N_x}. \quad (179)$$

Передаточная функция сдвига $W_{сд}(N_x)$ будет определяться отношением спектра $S_{H_{из}}(N_x)$ к спектру $S_H(N_x)$. Преобразование спектра изображения $S_H(N_x)$ в $S_{H_{из}}(N_x)$ определяется формой характеристической кривой идеального затвора. Таким образом, передаточная функция сдвига равна

$$T_{сд}(N_x) = \frac{S_{H_{из}}(N_x)}{S_H(N_x)}, \quad (180)$$

подставив значения (178) и (179), получим

$$T_{сд}(N_x) = \frac{\sin \pi \cdot V_{из} \cdot t_{\phi} \cdot N_x}{\pi \cdot V_{из} t_{\phi} N_x}. \quad (181)$$

Передаточная функция сдвига представляет собой преобразование Фурье от функции $H(x)$, которая получена из характеристической кривой затвора, при этом необходимо также учесть скорость движения изображения и время экспонирования

$$x = V_{из} t.$$

Чтобы получить передаточную функцию сдвига, необходимо вычислить интеграл

$$T_{сд}(N_x) = \int_{-\infty}^{\infty} H(x) e^{-i 2\pi \cdot N_x x} dx. \quad (182)$$

При построении характеристической кривой затвора учитывают фазы открывания, полного открытия и закрывания затвора. Если характеристическую кривую аппроксимировать трапецией, то распределение экспозиции в изображении линии, перпендикулярной к оси xx , будет также иметь вид трапеции и может быть записано в следующем виде:

$$H(x) = \left\{ \begin{array}{ll} H \frac{x_2 - x}{x_2 - x_1} & x_1 \leq |x| \leq x_2 \\ H & \text{при } 0 < |x| \leq x_1 \\ 0 & |x| > x_2 \end{array} \right\}. \quad (183)$$

Передаточная функция реального затвора с учетом $H(x)$ из (183) будет иметь вид

$$T_{\text{сд}}(N_x) = \frac{\sin \pi \cdot N_x (x_2 + x_1)}{\pi N_x (x_2 + x_1)} \frac{\sin \pi N_x (x_2 - x_1)}{\pi N_x (x_2 - x_1)}, \quad (184)$$

с учетом того, что

$$x_2 = V_{\text{из}} \frac{t_{\Phi}}{2} \quad \text{и} \quad x_1 = V_{\text{из}} \frac{t_{\Pi}}{2};$$

$$x_2 + x_1 = V_{\text{из}} \left(\frac{t_{\Phi}}{2} + \frac{t_{\Pi}}{2} \right) = V_{\text{из}} t_{\Sigma} = V_{\text{из}} t_{\Phi} \eta; \quad (185)$$

$$x_2 - x_1 = V_{\text{из}} t_{\Phi} (1 - \eta). \quad (186)$$

Учитывая формулы (185) и (186), получим

$$T_{\text{сд}}(N_x) = \frac{\sin \pi N_x V_{\text{из}} \cdot t_{\Phi} \cdot \eta \sin \pi \cdot N_x \cdot V_{\text{из}} t_{\Phi} (1 - \eta)}{\pi \cdot N_x V_{\text{из}} t_{\Phi} \eta \pi \cdot N_x V_{\text{из}} t_{\Phi} (1 - \eta)}. \quad (187)$$

Для устранения вредного влияния сдвига изображения применяют высокоскоростные затворы, а также устройства для компенсации сдвига изображения. Компенсация может производиться механическим или оптическим методом. Если компенсация сдвига изображения производится механическим путем, то необходимо выполнить равенство

$$\bar{V}_{\text{пл}} = \bar{V}_{\text{из}}, \quad (188)$$

где $\bar{V}_{\text{пл}}$, $\bar{V}_{\text{из}}$ — скорость перемещения пленки и скорость движения оптического изображения.

Если эти скорости не совпадут, то возникнет остаточный сдвиг

$$\delta_{\text{ост}} = (V_{\text{из}} - V_{\text{пл}}) t_{\Phi} = V'_{\text{из}} t_{\Phi}. \quad (189)$$

Остаточный сдвиг может также возникнуть, если произойдет перекompенсация, т. е. $V_{\text{пл}}$ будет больше $V_{\text{из}}$. Если скорости движения оптического изображения и пленки равны, но между векторами $\bar{V}_{\text{из}}$ и $\bar{V}_{\text{пл}}$ имеется угол α , то также возникнет остаточный сдвиг. Механический способ обеспечивает постоянную для всех точек кадра компенсацию при условии, что $\alpha = 0$. К недостаткам метода можно отнести то, что в момент экспонирования нельзя обеспечить высокоточное выравнивание пленки; в случае если производят перспективную съемку, качество снимка будет плохим из-за переменной величины остаточного сдвига изображения по полю кадра.

Для устранения сдвига изображения при оптическом способе применяют дополнительные оптические элементы, которые обеспечивают движение оптического изображения при экспонировании. Это перемещение изображения осуществляется

в направлении, противоположном перемещению носителя съемочной аппаратуры. В момент экспонирования пленка неподвижна, для обеспечения компенсации сдвига изображения необходимо выполнить условие

$$\bar{V}_k = -\bar{V}_{из}, \quad (190)$$

где V_k — скорость оптической компенсации сдвига изображения.

Таким образом, при оптической компенсации необходимо, чтобы скорости V_k и $V_{из}$ были равны и чтобы направления скоростей были противоположны. Движение оптического изображения относительно пленки осуществляется с помощью разных оптических приспособлений: плоских зеркал, оптических клиньев. Рассмотрим принципиальные схемы узлов компенсации сдвига изображения с помощью поворотного зеркала и вращающихся клиньев.

Рассмотрим схему компенсации изображения, когда смещение изображения осуществляется с помощью поворотного плоского зеркала. Для того чтобы устранить сдвиг изображения, необходимо определить угловую частоту вращения зеркала. Произведем этот расчет для центра снимка. Если перемещение Земли относительно КЛА (будем считать его неподвижным) происходит со скоростью W , то за время t точка A сместится относительно оптической оси КСК на угол α :

$$\alpha = \text{arc tg } Wt/H, \quad (191)$$

так как величина t мала, то можно записать:

$$\alpha = Wt/H. \quad (192)$$

Величину угла γ , на который необходимо повернуть зеркало, чтобы удержать точку A на оптической оси, определим по формуле

$$\gamma = \frac{\pi}{4} - \beta = \frac{\pi}{4} - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \frac{\alpha}{2} = \frac{Wt}{2H}. \quad (193)$$

Этот расчет справедлив только для точек, лежащих на главной горизонтали снимка. На горизонтали кадра, смещенной относительно оптической оси на угол β , будет иная скорость компенсации изображения V_k :

$$V_k = \frac{2f}{\cos^2 \beta} \cdot \omega, \quad (194)$$

где ω — угловая частота вращения зеркала.

На снимке при компенсации сдвига изображения с помощью плоского зеркала будет остаточная скорость движения изображения $V_{ост}$, которая определяется соотношением

$$V_{ост} = V_{из} - V_k = \frac{Wf}{H} \left(1 - \frac{1}{\cos^2 \beta} \right). \quad (195)$$

Из-за остаточной скорости по полю снимка для каждой его точки будет остаточный сдвиг изображения $\delta_{ост}$. Приведенный остаточный сдвиг изображения по всему полю снимка $\delta_{ост}$ равен

$$\delta_{ост} = t_{\phi} \cdot W \left(1 - \frac{1}{\cos^2 \beta} \right). \quad (196)$$

Рассмотрим вторую схему компенсации сдвига изображения с помощью оптических клиньев, устанавливаемых перед объективом (рис. 44, а). Если клин вращается со скоростью

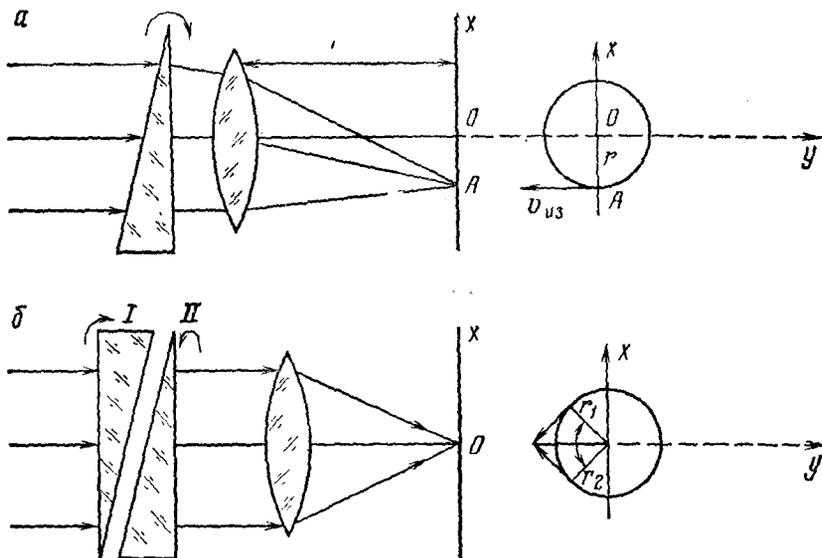


Рис. 44.

ω , то изображение точки A будет перемещаться вокруг оптической оси по кругу радиусом r . Фокусное расстояние объектива f' , число оборотов N определит скорость движения изображения V_k

$$|\vec{V}_k| = 2\pi \cdot r \cdot N = 2\pi \cdot f' \cdot \alpha \cdot N = 2\pi \cdot f' \cdot N \cdot \gamma (n - 1), \quad (197)$$

где γ — угол при вершине клина; n — показатель преломления оптической среды клина.

При вращении клина направление вектора скорости будет непрерывно меняться, и экспонирование надо производить в момент, когда скорость изображения точки A будет равна по модулю и противоположна по направлению скорости компенсации.

Лучшую компенсацию сдвига изображения обеспечивает система, когда перед объективом устанавливают два вращаю-

щихся клина, причем их вращение происходит в противоположных направлениях, но с одинаковой частотой ω . Клинья при установке повернуты друг относительно друга на 180° . Клинья будут перемещать изображение точки в противоположных направлениях по одной и той же окружности. Изображение объекта будет колебаться с переменной скоростью относительно точки O вдоль оси x , так как вдоль оси y составляющие скорости всегда равны и направлены в противоположные стороны (рис. 44, б):

$$V_{K_1} = |V_{K_1}| \sin \alpha, \quad (198)$$

V_{K_1} — составляющая скорость компенсации в направлении оси x , создаваемой одним клином;

$$V_K = V_{K_1} + V_{K_2} = 2V_{K_1}, \quad (199)$$

V_{K_2} — скорость компенсации при двух клиньях при условии, что скорости вращения клиньев равны;

$$V_{K_1} = V_{K_2}; \quad V_K = 4\pi \cdot f' N \gamma (n-1) \sin \alpha. \quad (200)$$

Экспонирование производят в тот момент, когда $\alpha = \pi/2$. С учетом этого запишем

$$V_K = 4\pi f' N \cdot \gamma (n-1). \quad (201)$$

При компенсации изображения с помощью оптических клиньев будет также наблюдаться остаточный сдвиг. Это происходит из-за того, что равенство (200) возможно только в бесконечно малый отрезок времени, а выдержка при съемке имеет конечное значение и остаточный сдвиг будет тем больше, чем больше выдержка. Это не позволяет рекомендовать в камерах, предназначенных для съемки в условиях малой освещенности, оптическую компенсацию сдвига изображения. Необходимая для компенсации скорости вращения клиньев может быть рассчитана с учетом значений (200) и (201):

$$\left. \begin{aligned} V_{\text{из}} &= \frac{W}{H} f' \quad \text{и} \quad V_{\text{из}} = \frac{W f' \cos(\gamma + \beta)}{H \cos \beta} \\ N &= \frac{W f'}{H \cdot 4 f' \pi \gamma (n-1)} = \frac{W}{4 \pi \cdot H \cdot \gamma (n-1)} \end{aligned} \right\}. \quad (202)$$

Если съемка ведется с перекрытиями p_1 и p_2 , то разность интервалов при двух значениях перекрытия должна быть в целое число m раз больше периода вращения клина:

$$T_2 - T_1 = m/N. \quad (203)$$

Величина m определяется исходя из параметров клина γ и n :

$$m = \frac{a(p_2 - p_1)}{4\pi f' \gamma (n-1)}. \quad (204)$$

Размер кадра a , фокусное расстояние и линейный коэффициент перекрытия между снимками определяют параметры

клина γ и n . Рассмотрим изменения разрешающей способности в случае, если производится перспективная съемка КСК, имеющими механическую или оптическую компенсацию сдвига изображения. Эффективность компенсаторов сдвига изображения по мере отклонения оптической оси кадровой КСК от вертикали уменьшается в связи с тем, что скорость в разных точках кадра будет переменной величиной. Величина переменного остаточного приведенного сдвига изображения будет зависеть от направления и угла γ наклона оптической оси, от качества настройки узла компенсации. Можно рассчитать графики остаточного сдвига с учетом, что $V_k = \frac{Wf}{H} \cos \gamma$ и $\delta_{ост} = (V_{из} - V_k) t_{э}$.

Величина приведенного остаточного сдвига $\delta_{ост}$ равна

$$\delta_{ост} = Wt_{ф} \left[1 - \frac{\cos \beta \cos \gamma}{\cos (\gamma - \beta)} \right]. \quad (205)$$

Ухудшение разрешающей способности по полю кадра из-за остаточного сдвига будет происходить по мере удаления от главной горизонтали снимка. Но все же это изменение R (мм^{-1}) меньше, чем если бы съемка велась без компенсации сдвига изображения. На заднем плане снимка разрешающая способность будет меньше при работе узла компенсации, чем при его отсутствии. При значительных углах наклона ($\gamma = 70^\circ$) часть кадра, где происходит ухудшение качества из-за угла компенсации, увеличивается. Неправильная настройка узла компенсации вызовет резкое ухудшение качества в пределах всего поля зрения.

Для измерения скорости изображения применяют приборы, с помощью которых можно вести непосредственное измерение W/H .

Глава V

КАЛИБРОВКА КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

§ 35. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ ВНУТРЕННЕГО ОРИЕНТИРОВАНИЯ

Под калибровкой космических съемочных систем понимают определение элементов внутреннего ориентирования и определение поправок в координаты точек космических снимков, характеризующих отличие проекции реального снимка от идеальной центральной проекции. В результате калибровки опре-

деляются такие величины, как элементы внутреннего ориентирования фотографической камеры, величины дисторсии ее объектива, а иногда и величины деформации фотоматериала, влияющие атмосферной рефракции и др.

Существует несколько способов калибровки фотографических камер. Они разделяются на визуальные и фотографические. Фотографические способы можно, в свою очередь, подразделить на лабораторные и полевые.

Прежде чем перейти к описанию каждого из них, следует отметить, что большинство способов предполагает измерение

только радиальной составляющей дисторсии и лишь некоторые из них позволяют определять тангенциальную составляющую, да и то с недостаточной точностью.

Способ визуального определения постоянных является широко распространенным и наиболее часто встречающимся в производстве.

Сущность способа состоит в измерении в пространстве предметов углов, соответствующих калиброванным радиальным отрезкам, выравнивающего стекла, являющегося прикладной рамкой фотосъемочной камеры (рис. 45).

По известным отрезкам и соответствующим измеренным

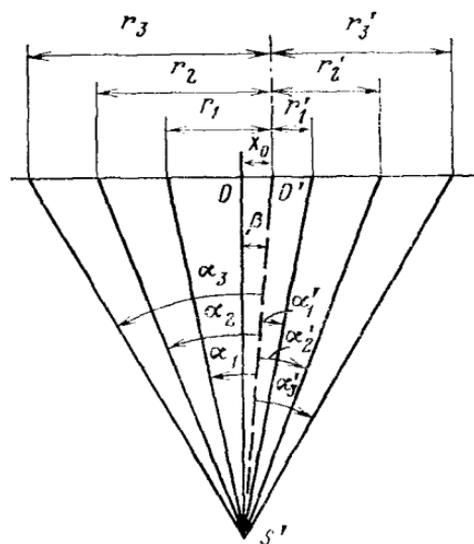


Рис. 45.

углам вычисляются элементы

внутреннего ориентирования,

а также величины дисторсии

$$\left. \begin{aligned} f_k &= \frac{\sum r_i}{\sum \operatorname{tg} \alpha_i}, \quad \delta_i = r_i - f_k \operatorname{tg} \alpha_i \\ x_0 &= \frac{\sum \delta_2 - \sum \delta_1}{2 \sum \operatorname{tg}^2 \alpha_i} \end{aligned} \right\}. \quad (206)$$

Для измерения центральных углов в пространстве предметов в визуальном способе используется оптическая скамья. Устройство оптической скамьи может быть самым различным, но неотъемлемой частью является лишь наличие угломерного устройства, позволяющего с высокой точностью выполнять измерения. Обычно точность измерения углов составляет 1—2", а точность определения параметров находится в пределах ± 5 мкм.

Однако визуальные способы имеют существенный недостаток — этот способ не соответствует фотографическому процессу

получения снимков в реальных условиях. В связи со стремлением производить измерения в условиях, приближающихся к условиям эксплуатации фотокамеры, возник фотографический способ калибровки.

Сущность фотографического способа состоит в фотографировании естественных или искусственных объектов и точек, расположенных по определенной системе. Лабораторные фотографические способы предполагают фотографирование марок коллиматоров, оптические оси которых расположены под известными углами и пересекаются в одной точке. Марки фотографируются испытуемым объективом на фотопластинку, помещенную в плоскости прикладной рамки. По измеренным радиальным отрезкам между изображениями марок коллиматоров и соответствующим им известным углам вычисляются элементы внутреннего ориентирования и дисторсия фотографической камеры. При этом тангенциальная дисторсия определяется как отклонение изображения марок от линии нулевого искажения для данного радиального направления.

Для практической реализации лабораторного фотографического способа созданы специальные приборы, получившие название фотографической скамьи.

Фотографические скамьи бывают двух видов: пространственного и плоскостного типа. В скамье первого вида оптические коллиматоры располагаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, в скамье второго вида коллиматоры расположены в одной плоскости.

Многоколлиматорные установки выпускаются в СССР, США, Канаде, ГДР и отличаются между собой способом установки коллиматоров, типом съемочных камер и рядом других конструктивных решений.

Рассмотрим более подробно фотографическую скамью для определения элементов внутреннего ориентирования.

Условия калибровки съемочных камер должны быть максимально приближены к эксплуатационным. В фотографической скамье с этой целью плоскость прикладной рамки располагается горизонтально и съемка производится на пленку, соответствующую спектральным характеристикам той, на которой будет производиться съемка в натуральных условиях. Чтобы обеспечить определение элементов внутреннего ориентирования с высокой точностью, на всю площадь кадра проектируются изображения крестов ряда коллиматоров, оси которых расположены под некоторыми углами. Съемочную камеру поворачивают вокруг вертикальной оси, чем обеспечивается полнота исследования. Для того чтобы контролировать расположение прикладной рамки после ее поворота, применяют автоколлиматор, установленный над камерой. Ось автоколлиматора параллельна оси центрального коллиматора.

На рис. 46 показана схема фотографической скамьи.

Съемочную камеру 2 устанавливают в горизонтирующее устройство 3, которое позволяет с помощью подъемных винтов изменять направление оптической оси камеры, т. е. привести плоскость прикладной рамки в горизонтальное положение. Угломерное устройство 4 позволяет фиксировать поворот камеры с точностью до $1,3''$.

Перемещая вертикально камеру, устанавливают ее так, чтобы горизонтальная ось вращения угломерного устройства была расположена в той же плоскости, что и входные зрачки объектива камеры.

Нижняя часть прибора содержит одиннадцать коллиматоров 5, углы между которыми устанавливаются в зависимости

от фокусного расстояния испытуемой фотокамеры. Для обеспечения единого начального направления при измерении тангенциальной дисторсии на фотопластинке создается недисторсированное направление, которое реализуется путем впечатывания двух меток со стороны подложки с помощью специальных проекторов 6. Оси проекторов устанавливаются параллельно коллимационной плоскости теодолита, с которой совмещены оси одиннадцати коллиматоров. Для сохранения единой системы координат при определении радиальной дисторсии вдоль разных направлений имеется верхний автоколлиматор 1 и кольцевое зеркало 7, устанавливаемое параллельно плос-

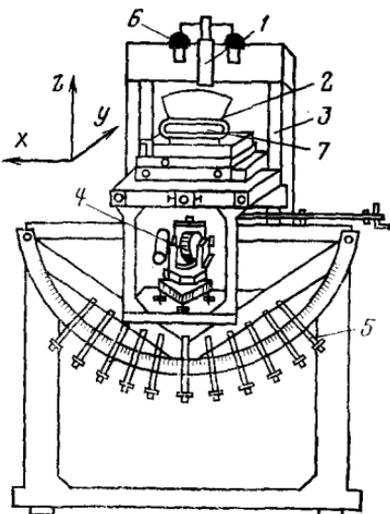


Рис. 46.

кости прикладной рамки. Положение прикладной рамки фиксируется по автоколлимации от этого зеркала.

Калибровку фотографической камеры начинают с наладки скамьи, которая выполняется в определенном порядке согласно прилагаемым инструкциям и, естественно, является очень ответственным процессом. После того как скамья приведена в рабочее положение, на горизонтирующее устройство устанавливается фотосъемочная камера и на поверхность пластинки, расположенной в фокальной плоскости объектива, фокусируют оба проектора, расположенных в верхней части прибора. Проекторы впечатывают на фотопластинку метки, определяющие линию, параллельную коллимационной плоскости теодолита.

Таким образом, смещение изображения марок коллиматоров от этой линии будет представлять собой тангенциальную дисторсию.

Контроль за положением прикладной рамки осуществляют

с помощью специального зеркала, размещенного на горизонтирующей платформе. Одновременно фотографируют марки всех коллиматоров и метки проекторов через специальные отверстия в кассете. Отключив центральный коллиматор и вращая камеру вокруг оптической оси на заданные углы, последовательно фотографируют марки наклонных коллиматоров и метки обоих проекторов. После того как марки коллиматоров сфотографированы по всему полю изображения, выполняется фотохимическая обработка негатива.

Измерения негатива выполняют на монокомпараторе или микроскопе УНМ-21. При установке негатива в приборе необходимо, чтобы метки проекторов совпадали с координатной осью прибора. В прямом и обратном направлениях (ходе) измеряют координаты изображений марок. По средним значениям из двух ходов находят радиальные отрезки, соответствующие известным углам между визирными осями коллиматоров, а по ним величины радиальной дисторсии

$$\delta_{r_n} = r_n - f_k \operatorname{tg} \alpha_n, \quad (207)$$

где

$$f_k = \Sigma r_n / \Sigma \operatorname{tg} \alpha_n.$$

Для вычисления тангенциальной дисторсии по каждому изображению марки коллиматора составляют систему уравнений типа

$$\delta_{tn} = \Delta P_n - K r_n, \quad (208)$$

где ΔP_n — разность отсчетов P_0 по маркам центрального и наклонного коллиматоров; K — коэффициент, учитывающий систематическую ошибку, обусловленную несовпадением линии отсчета со следом коллимационной плоскости; r_n — радиальное расстояние от изображения центральной марки до марки n .

Решая систему уравнений (208) при условии $\delta_{tn}^2 = \min$, получают вероятнейшее значение коэффициента K и величин тангенциальной дисторсии.

Из полевых способов калибровки камер наиболее известны два способа: это калибровка съемочных камер по снимкам испытательного полигона и снимкам звезд. Первый способ в основном используется для калибровки топографических аэрофотокамер, используемых при аэросъемке, второй — при исследовании космических съемочных камер, устанавливаемых на КЛА, поэтому рассмотрим более подробно этот способ.

§ 36. КАЛИБРОВКА КСК ПО СНИМКАМ ЗВЕЗД

Элементы внутреннего ориентирования камеры и график дисторсии по полю снимка можно определить на основании зависимости между координатами изображений звезд на снимке и их расчетными значениями, полученными по астрономиче-

ским данным. Эта зависимость может быть представлена уравнением

$$\begin{pmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ -f_k \end{pmatrix} = KA \begin{pmatrix} l \\ m \\ n \end{pmatrix}, \quad (209)$$

где \bar{x} , \bar{y} — расчетные значения координат изображений звезд; A — матрица ориентации космической камеры (система $sxyz$) в геоцентрической системе координат $OXYZ$; K — коэффициент пропорциональности; l , m , n — направление на звезды в геоцентрической системе координат (направляющие косинуса).

Исключив из (209) коэффициент K , легко получить уравнение коллинеарности следующего вида: \bar{x} , $\bar{y} = (f, l, m, n)$, которое в развернутом виде запишем так:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= -f_k \frac{a_{11}l + a_{12}m + a_{13}n}{a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n} = -f_k \frac{L}{N} \\ \bar{y} &= -f_k \frac{a_{21}l + a_{22}m + a_{23}n}{a_{31}l + a_{32}m + a_{33}n} = -f_k \frac{M}{N} \end{aligned} \right\}. \quad (210)$$

Вычислим координаты главной точки x' , y' и величины дисторсии $\Delta x'$, $\Delta y'$:

$$x' = x - x_0; \quad y' = y - y_0. \quad (211)$$

$$\Delta x' = \frac{\Delta r}{r} x'; \quad \Delta y' = \frac{\Delta r}{r} y'. \quad (212)$$

Составим систему условных уравнений с учетом (211) и (212) и при условии, что все другие систематические ошибки исключены:

$$\left. \begin{aligned} (x' - x_0) \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) + f_k \frac{L}{N} &= 0 \\ (y' - y_0) \left(1 + \frac{\Delta r}{r}\right) + f_k \frac{M}{N} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (213)$$

Каждая изобразившаяся звезда дает возможность составить два уравнения. В обработку обычно берут значительное количество изображений звезд (50—100), равномерно расположенных по полю кадра, и полученную систему уравнений решают по способу наименьших квадратов методом приближений. В результате последнего приближения получают значение элементов внутреннего ориентирования фотографической камеры (f_k , x_0 , y_0) и величину дисторсии.

§ 37. СПОСОБ КАЛИБРОВКИ ФОТОСЪЕМОЧНЫХ КАМЕР ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

Этот способ в последние годы находит широкое применение. Для реализации данного способа необходимо создать специальный полигон с достаточным количеством замаркирован-

ных опорных точек, координаты которых известны с высокой точностью. Затем этот полигон снимается съёмочным фотоаппаратом, установленным на носителе, находящемся в режиме съёмочного полета. Этот способ позволяет получать параметры съёмочных камер в условиях, близких к условиям реальной съёмки. Важным является тот фактор, что способ позволяет определить суммарное влияние различных систематических ошибок на построение изображения.

В основу способа взято известное уравнение зависимости координат точек снимка и объекта

$$\left. \begin{aligned} (x - x_0) \div \Delta x &= -f_k \frac{a_{11}(x - x_3) + a_{12}(y - y_3) + a_{13}(z - z_3)}{a_{31}(x - x_3) + a_{32}(y - y_3) + a_{33}(z - z_3)} \\ (y - y_0) \div \Delta y &= -f_k \frac{a_{21}(x - x_3) + a_{22}(y - y_3) + a_{23}(z - z_3)}{a_{31}(x - x_3) + a_{32}(y - y_3) + a_{33}(z - z_3)} \end{aligned} \right\}, \quad (214)$$

где x, y — координаты изображения точек объекта; x_0, y_0 — координаты главной точки; $\Delta x, \Delta y$ — элементы матрицы ориентации, являющиеся функциями угловых элементов внешнего ориентирования.

Линеаризация уравнений (214) приводит к уравнениям поправок следующего вида:

$$\left. \begin{aligned} A\delta f_k + B\delta x_0 + C\delta y_0 + D\delta K_1 + F\delta K_2 + K\delta\alpha + Q\delta\delta + L\delta A + I = V \\ A_1\delta f + B_1\delta x_0 + C_1\delta y_0 + D_1\delta K_1 + F_1\delta K_2 + K_1\delta\alpha + Q\delta\delta + L\delta A_1 + I_1 = V_1 \end{aligned} \right\}. \quad (215)$$

Таким образом, одна точка полигона, изобразившаяся на снимке, дает два уравнения с одиннадцатью неизвестными, два из которых принадлежат только данной точке. Поэтому решение уравнений необходимо отнести к отдельным зонам снимка и решить методом последовательных приближений.

В результате решения уравнений находят искомые параметры снимка.

Следует отметить, что этот способ калибровки предъявляет высокие требования к испытательному полигону как с точки зрения размещения его точек в плановом и высотном отношении, так и к их закреплению, маркировке и определению геодезических координат.

Важными факторами, определяющими геометрическую точность космического снимка, являются деформации иллюминатора и явление внутренней рефракции.

В условиях космического полета под воздействием механических напряжений, радиального перепада температур на внутренней и внешней поверхностях иллюминатора возникает деформация поверхностей последнего.

Суммарное отклонение проектирующего луча δ_i из-за указанных факторов определяется по формуле

$$\delta_i = d (\operatorname{tg} i - \operatorname{tg} r) \rho \left[\frac{\partial t \Delta t}{d} + \frac{K \Delta P D^2}{d^2 E} + \frac{d \left(\frac{dt}{dR} \right) \alpha_t}{\operatorname{tg} r} \right], \quad (216)$$

где d — толщина иллюминатора; α_t — коэффициент линейного расширения стекла, из которого сделан иллюминатор; Δt — перепад температур по толщине иллюминатора; ΔP — перепад давления; D — световой диаметр иллюминатора; E — модуль Юнга; K — коэффициент, зависящий от геометрии и модуля иллюминатора; dt/dR — радиальный температурный градиент.

При съемках из космоса через иллюминаторы, изготовленные из кварцевого стекла и представляющие собой двухстекольные или трехстекольные конструкции, отклонения проектирующих лучей для углов падения Y ($Y=0^\circ \dots 60^\circ$) не превосходят нескольких секунд и практически не влияют на точность построения изображения.

Из-за различных термобарических состояний газовых сред по обеим сторонам иллюминатора возникает явление внутренней рефракции. Величину угла (δ°), на который отклонится луч, находят, используя известный оптический инвариант

$$n_1 \sin i = n_2 \sin \eta,$$

где n_1, n_2 — показатели преломления соответственных сред; i — угол падения луча; η — угол его преломления.

При плоской границе двух газовых сред влияние отклонения проектирующего луча на положение точек снимка определяется формулами, которые для горизонтального снимка имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \delta x &= \frac{\delta^0 (f^2 + x^2 + y^2) x}{\rho f^2} \\ \delta y &= \frac{\delta^0 (f^2 + x^2 + y^2) y}{\rho f^2} \end{aligned} \right\} \quad (217)$$

Для условий космического полета величины угловых отклонений световых лучей достигают нескольких десятков секунд ($50''$), а соответствующие им геометрические искажения координат точек горизонтального снимка — нескольких десятков микрометров (для короткофокусных и длиннофокусных съемочных камер искажения на краю снимка могут составлять соответственно 20 и 35 мкм).

Одним из способов повышения геометрической точности снимков является взаимная компенсация искажений координат точек снимка. Возможность взаимной компенсации противоположно направленных искажений из-за явления внутренней рефракции и деформации иллюминатора возможна путем изготовления не плоскопараллельного иллюминатора, а имеющего определенную кривизну $1/R_{\text{исх}}$.

Для ее вычисления может быть использована формула

$$\frac{1}{R_{\text{исх}}} = \left(\frac{1}{R}\right)_{\Sigma}^{\circ} - \left(\frac{1}{R}\right)_{\Sigma}^{\circ}, \quad (218)$$

где $\left(\frac{1}{R}\right)_{\Sigma}^{\circ}$ — суммарная кривизна, которую приобретает плоско-параллельный иллюминатор в полете; $\left(\frac{1}{R}\right)_{\Sigma}^{\circ}$ — суммарная кривизна иллюминатора, вычисленная при условии равенства

$$\sum_{i=0}^{\varphi^{\circ}} \left[\delta^2 - d \left(\frac{1}{R}\right)_{\Sigma} (\text{tgi} - \text{tgr}) \rho \right]^2 = S_{\text{min}} \quad (219)$$

при помощи метода наименьших квадратов ($i=0^{\circ} \dots \varphi^{\circ}$).

§ 38. УЧЕТ АТМОСФЕРНОЙ РЕФРАКЦИИ

При прохождении слоев атмосферы различной плотности проектирующий луч испытывает отклонения. Применительно к съемкам с больших высот угловые отклонения из-за явления атмосферной рефракции следует определить по формуле (217), где нет таких параметров атмосферы как t° , τ° и др. Величины угловых отклонений, имеющие место при съемке из космоса, достигают нескольких десятков секунд ($50''$), при этом геометрические искажения координат точек снимка для короткофокусных и длиннофокусных космических съемочных камер могут достигать соответственно 20 и 35 мкм. Влиянием данного фактора при космической съемке аппаратами с фокусными расстояниями до 200 мм практически можно пренебречь.

Глава VI

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

§ 39. ДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА ЭМУЛЬСИОННЫЕ СЛОИ

Приемниками лучистой энергии, отраженной от объектов космической съемки, служат светочувствительные слои разного спектрального диапазона. Учитывая квантовую теорию испускания лучистой энергии, можно записать

$$\epsilon = h \cdot \nu, \quad (220)$$

где ε — величина кванта энергии; h — постоянная Планка, равная $6,62 \cdot 10^{-34}$ Вт; ν — частота колебаний. С учетом длины волны λ и скорости распространения света запишем

$$\nu = c/\lambda; \varepsilon = hc/\lambda. \quad (221)$$

Известно, что поглощение лучистой энергии, так же как ее испускание, происходит квантами.

Известен закон о фотохимическом эквиваленте, который определяет зависимость между числом прореагировавших молекул n и числом поглощенных квантов n_0 . Отношение $n/n_0 = \varphi$ называется квантовым выходом.

Если в соответствии с законом Эйнштейна о фотохимическом превращении каждый поглощенный веществом квант лучистой энергии делает способной к реакции одну отдельную молекулу этого вещества, то квантовый выход равен единице. Фотохимическая реакция зависит также от интенсивности света I , поступающего в регистрирующую систему, и продолжительности его действия t , т. е.

$$I_1 \cdot t_1 = I_2 \cdot t_2 = I_3 \cdot t_3. \quad (222)$$

В соответствии с законом взаимозаменяемости фотохимический эффект должен быть постоянным. При создании фотографических материалов и проведении съемок стремятся увеличить квантовый выход.

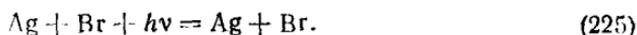
Светочувствительные слои, воспринимающие лучистую энергию, содержат кристаллы галоидного серебра. Следует отметить, что вопрос о механизме действия света на светочувствительный слой очень сложен в связи с тем, что при выдержках в сотые и тысячные доли секунды реагирующее количество вещества чрезвычайно мало и скрытое изображение, зафиксированное светочувствительным слоем, можно обнаружить только проявлением. Учитывая экспериментальные работы в этой области, можно считать, что под действием света сначала на поверхности, а потом и внутри кристалла образуется потемнение — металлическое серебро. Квантовый выход его при умеренном освещении может равняться единице. Эта реакция образования металлического серебра при фотохимическом разложении галоидного серебра будет представлена в виде реакции



Квант лучистой энергии отделяет электрон от иона брома, который связывается далее ионом серебра:



с учетом сказанного можно записать ионную реакцию:



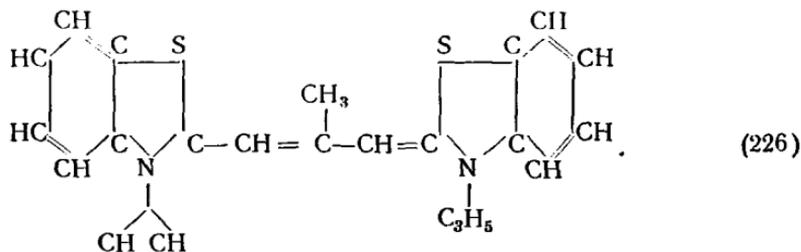
Установлено, что кристалл галоидного серебра очень неоднороден. Отрицательно заряженные участки благодаря накоплению электронов будут притягивать те ионы серебра, которые, получив излишнюю энергию, свободно перемещаются и выходят из узлового положения в решетке. В результате этого образуются атомы металлического серебра, которые и служат центрами проявления. Квантовый выход при описанном процессе образования скрытого изображения значительно меньше единицы. Естественная светочувствительность галоидного серебра распространяется только на синюю, фиолетовую и ультрафиолетовую зоны спектра. Чтобы повысить светочувствительность кристаллов галоидного серебра к определенной зоне спектра, а также общую светочувствительность, производится sensibilization фотографической эмульсии.

§ 40. СЕНСИБИЛИЗАЦИЯ ЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЕВ

Сенсибилизацией галоидо-серебряных эмульсий называется процесс их очувствления с помощью химических и оптических сенсибилизаторов. Химические сенсибилизаторы повышают светочувствительность зерен, что приводит к повышению общей светочувствительности эмульсионного слоя. Оптические сенсибилизаторы поглощают лучистую энергию определенной длины волны и передают ее галоидному серебру, которое к этим длинам волн нечувствительно. Спектральная светочувствительность эмульсионных слоев из-за введения процесса оптической сенсибилизации значительно расширилась и охватывает всю видимую и ближнюю инфракрасную части спектра.

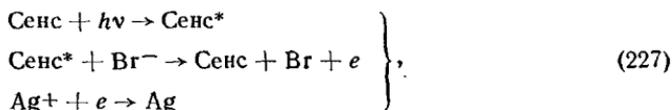
В качестве оптических сенсибилизаторов применяют красители, которые относятся преимущественно к классу цианиновых.

Примером оптического сенсибилизатора может служить краситель, который увеличивает спектральную светочувствительность эмульсионного слоя до 640 нм:



Каждый сенсибилизатор создает светочувствительность эмульсионного слоя только к той зоне спектра, которую сам поглощает. Молекула красителя, поглотившая квант света, при-

ходит в возбужденное состояние и передает квант энергии галоидному серебру, а сама занимает исходное положение



Сенс — исходное положение сенсibilизатора; Сенс* — возбужденное состояние сенсibilизатора.

Увеличение концентрации сенсibilизирующего красителя повышает фотографический эффект вначале пропорционально концентрации, затем медленнее, после достижения максимума дальнейшее увеличение концентрации вызывает уменьшение фотографической чувствительности. Концентрация красителя зависит от природы красителя, типа эмульсии и других факторов. При изготовлении эмульсионных слоев применяют также суперсенсibilизацию — смеси красителей.

Значительное изменение светочувствительности эмульсионных слоев происходит при низких температурах, причем уменьшение светочувствительности больше в оптически сенсibilизированной области спектра, чем в синей, несенсibilизированной части.

При создании фотографических эмульсий необходимо, чтобы в результате поглощения нескольких квантов света и обработки в соответствующем проявителе все кристаллы галоидного серебра восстановились в металлическое серебро. Высокочувствительные эмульсии для негативных пленок в основном содержат бромистое серебро, к которому добавляют порядка 4% йодистого серебра. Изготовление и полив эмульсии осуществляется в несколько стадий: эмульсификация, первое созревание эмульсии, промывка, второе созревание, сенсibilизация, полив эмульсии на подложку.

Эмульсификация заключается в том, что к раствору AgNO_3 добавляют раствор желатины, бромистого калия и небольшое количество йодистого калия. Происходит реакция



в результате которой образуются светочувствительные кристаллы галоидного серебра, находящегося во взвешенном состоянии в растворе желатины. Во время проведения эмульсификации необходимо строго выдерживать необходимую концентрацию AgNO_3 и KBr . Некоторый избыток KBr приводит к тому, что поверхность зерен будет заряжена отрицательно, в силу чего произойдет самопроизвольное восстановление при проявлении, т. е. некоторое увеличение вуали. Величина зерен зависит от скорости смешивания растворов, и при быстром приливании AgNO_3 к KBr образуется большое число мелких кристаллов галоидида серебра. В процессе первого созревания, которое происходит при повышенной температуре — от 40 до 70°,

получают эмульсию с определенным распределением зерен по величине. Это происходит в связи с тем, что в эмульсию вводят растворители галоидного серебра — аммиак и бромистый калий. Образовавшиеся во время эмульсификации зерна галоидного серебра имеют разные размеры. В присутствии растворителя часть мелких зерен растворяется, а более крупные увеличиваются в размере. Полученную эмульсию с однородными по величине кристаллами охлаждают, пропускают через решета и производят промывку, в процессе которой из эмульсии удаляют аммиак, азотнокислый калий и другие вещества, повышающие растворимость галоидного серебра.

При втором созревании эмульсии размеры эмульсионных зерен не изменяются по величине, происходит увеличение светочувствительности за счет образования центров желатино-серебряных комплексов, переходящих далее в металлическое серебро. В этом процессе большую роль играет желатина, реагирующая с ионами серебра при повышенной температуре. В эмульсии создаются центры светочувствительности, причем их количество зависит от свойств желатины. Те центры, которые образовались в период первого созревания эмульсии, практического значения не имеют, так как оказываются не на поверхности, а внутри кристалла. При втором созревании центры светочувствительности (металлическое серебро) располагаются на поверхности эмульсионного слоя и играют большую роль в процессе фотохимической обработки экспонированного фотографического материала. Перед поливом на подложку эмульсию вновь студуют, выдерживают определенное время и вводят оптические красители, изменяющие спектральную светочувствительность фотографического слоя. Норма микрокристаллов бромидов серебра определяется способом приготовления эмульсии. Она может быть в форме октаэдра, куба, шара. Это зависит от условий созревания эмульсии. Если будет избыток ионов брома, то кристаллы будут иметь форму трех- и шестиугольных пластинок, если избыток ионов серебра, то получаются кристаллы в форме куба, в присутствии аммиака образуются микрокристаллы шарообразной формы.

§ 41. ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭМУЛЬСИОННЫХ СЛОЕВ

Для описания слоя указывают величины:

нанос A , определяющий поверхностную концентрацию бромида серебра ($\text{г}/\text{см}^2$);

плотность упаковки зерен P , которая определяется объемной концентрацией бромида серебра ($\text{г}/\text{см}^3$);

толщина слоя h зависит от величин A и P :

$$A = h \cdot P, \quad (229)$$

средний диаметр микрокристалла d ;

относительный объем микрокристалла η ;
средняя площадь микрокристалла f .

После приготовления эмульсии производят ее полив на подложку. В качестве подложки применяют гибкий материал с триацетатной или лавсановой основой. К основе пленки предъявляют ряд требований, определяющих ее оптические, физические и химические свойства. Оптические свойства основы должны обеспечивать ее прозрачность и однородность, основа не должна иметь видимых дефектов и не должна быть окрашенной, за исключением нанесения специальных противореолольных слоев.

Физические свойства основы должны обеспечивать ее прочность, достаточную гибкость, пленка должна быть эластична, обладать определенным сопротивлением разрыву, обеспечивать плоскостность. Важным качеством пленки является стабильность размеров, т. е. отсутствие деформации.

Химические свойства должны обеспечивать постоянство химических соединений, инертность по отношению к эмульсионному слою, неизменяемость при действии растворов проявителя и фиксажа, основа должна хорошо держать эмульсионный слой, не набухать при повышенной влажности. Она должна медленно гореть, иметь высокую температуру размягчения. Для обеспечения необходимого количества кадров в одной кассете КСК (при выполнении космической съемки) пленка должна быть тонкой и достаточной длины.

В течение многих лет применялась в качестве материала для основы пленки нитроцеллюлоза, но так как она обладает малой химической стабильностью и легко воспламенима, произошла замена этой основы на так называемую негорючую, изготавливаемую из трудновоспламеняемых и медленно горящих эфиров целлюлозы.

Широко применяют в качестве основы триацетат целлюлозы. Растворитель эфира целлюлозы — уксусная кислота позволяет растворить эфир и получить тонкий слой при высушивании основы.

Для улучшения гибкости пленки и обеспечения постоянства ее химических свойств в раствор добавляют пластификаторы и стабилизаторы. В качестве малодеформирующейся основы пленки в настоящее время применяют лавсановые подложки, изготовленные из полиэтилентерефталата. Они обладают лучшими механическими свойствами, более тонкие и хорошо выдерживают стабильность размеров. Деформация лавсановых пленок в пять раз меньше триацетатных.

Для того чтобы избежать сползание эмульсионного слоя, на подложку наносится специальный подслоу, скрепляющий эмульсию и основу пленки. Подслоу состоит из желатины и ацетилцеллюлозы. Основа пленки поливается тонким слоем этого раствора и сушится. Желатинна подслоя обеспечивает хорошее

сцепление с эмульсионным слоем, а ацетилцеллюлоза обеспечивает хорошее сцепление подслоя с основной пленки. Основа пленки поливается эмульсией, толщина и равномерность полива выдерживаются очень точно, так как эти характеристики влияют на фотографические свойства пленки.

Эмульсионные слои должны быть одинаковой толщины вдоль и поперек рулона при переходе от одного рулона (оси) к другому. После полива эмульсии на основу пленку охлаждают на холодных барабанах или в камерах с пониженной температурой, и затем широкая лента охлажденной, политой пленки поступает в сушильное отделение. Сушка пленки должна проводиться очищенным воздухом определенной температуры и влажности, равномерно по всей протяженности пленки.

Для исключения влияния скручивания пленки из-за сжатия желатины после высыхания эмульсии на обратную основу пленки наносят «противоскручивающий» слой. Это или желатина, или раствор некоторых эфиров целлюлозы. К желатине, поливаемой на обратную сторону основы, добавляют красители, которые поглощают свет, отразившийся от кристаллов галогенидов серебра и образующий в эмульсионном слое ореолы. Для поглощения этого света, ухудшающего качество изображения, служит противоореольный слой. Для этой цели можно прокрасить противоскручивающий слой или ввести в основу пленки светопоглощающие вещества. Красители противоореольного слоя должны полностью обесцвечиваться при фотохимической обработке пленки. Так как в процессе фотосъемки пленка при перемотке в камере подвергается трению, то эти места становятся проявляемыми, а в некоторых случаях десенсибилизируются. Для исключения этого вредного явления на пленку эмульсионного слоя наносят защитный слой. Схема строения пленки показана на рис. 47.

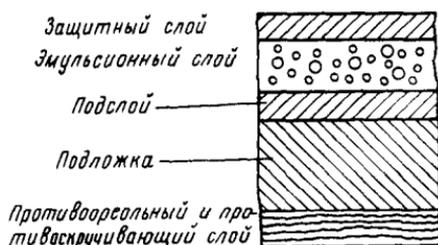


Рис. 47.

Рулон пленки разрезают вдоль на полосы стандартной ширины. Пленки, применяемые для космической съемки, могут быть 8, 19, 32 и 50 см ширины. Длина пленки определяется типом основы и емкостью кассет КСК (от 28 до 120 м).

§ 42. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК

По спектральной светочувствительности пленки можно разделить на категории, определяющие зону сенсibilизации (табл. 4).

Спектральная характеристика пленки	Зона сенсibilизации, нм	Зона спектра, к которой чувствительна пленка
Несенсибилизированная	Естественная до 500	Ультрафиолетовая, фиолетовая, синяя
Ортохроматическая	580	Зеленая, желтая
Изоортохроматическая	600	Синяя, желтая, зеленая
Изохроматическая	640	Синяя, зеленая, оранжевая, оранжево-красная
Панхроматическая	680—700	Синяя, зеленая, красная
Изопанхроматическая	700	Синяя, зеленая, красная
Инфрахроматическая	900	Инфракрасная

Максимумы сенсibilизации черно-белых пленок и снижение спектральной светочувствительности в определенных зонах спектра определяют их применение для съемки объектов, имеющих спектральные коэффициенты яркости, соответствующие максимумам сенсibilизации.

В табл. 5 приведены основные характеристики черно-белых, цветных и спектрональных пленок, выпускаемых отечественной промышленностью.

Определение спектральной светочувствительности фотопленок состоит из трех основных стадий: получение спектросенситограмм, фотометрическая обработка спектросенситограмм и выражения результатов.

Получение спектросенситограммы производится на спектросенситометре типа ИСП-73. Спектросенситометр состоит из двух основных частей: спектрального прибора (светосильного призмного спектрографа) и осветительно-сенситометрического устройства, в который входят источник света, ступенчатый спектрально-неизбирательный ослабитель света и затвор. Для получения спектросенситограмм прибор имеет кассетную рамку для установки кассеты с фотопленкой форматом 9×12 см.

Ослабитель включает набор из двенадцати дырчатых диафрагм, размещенных в двух револьверных дисках. Коэффициенты пропускания диафрагм образуют ряд геометрической прогрессии со знаменателем 1,67 ($\Delta \lg \tau = 0,22$).

В качестве затвора используется дисковый затвор с синхронным мотором, устанавливаемый вплотную перед входной щелью спектрографа. Затвор обеспечивает выдержки 0,05; 0,2 и 1,0 с, которые изменяются путем перемещения всего затвора по вертикали относительно щели спектрографа. Для предотвращения повторного экспонирования при непрерывном вращении диска затвор снабжен вспомогательной заслонкой.

В кассетной части прибора находятся две откидывающиеся рамки. Одна из них содержит специальную шкалу дисперсии,

служащую для привязки плотностей спектросенситограммы к длинам волн излучения источника света, а вторая ограничивает спектр по высоте и имеет реперные прорезы через каждые 10 и 25 мм для точной привязки плотностей спектросенситограммы.

Кассета может передвигаться с помощью ходового винта по вертикали, устанавливаясь в 18 фиксированных положений.

При получении спектросенситограмм на затворе устанавливается выдержка в соответствии со светочувствительностью исследуемой фотопленки. Экспонирование спектра производится за всеми 12 дырчатыми ослабителями. При смене ослабителя кассета каждый раз смещается в новое положение. Перед и после экспонирования спектра впечатывается шкала дисперсии.

Режим питания лампы устанавливается в соответствии с паспортными данными на прибор.

Условия проявления спектросенситограммы влияют на форму спектральной характеристической поверхности, а следовательно, и на относительное спектральное распределение чувствительности и на спектральную кривую коэффициента контрастности. Поэтому при спектрально-сенситометрических исследованиях условия проявления спектросенситограмм должно быть строго нормировано. Для этих целей перед спектросенситометрическими исследованиями проводятся сенситометрические испытания, дающие соответствующие сведения о необходимом времени проявления спектросенситограмм.

Готовая спектросенситограмма подвергается фотометрической обработке. Измерения плотностей спектросенситограммы выполняются на денситометре любого типа. Плотности измеряют через каждые 10 или 25 нм, используя для этих целей реперные метки. При крутых спадах и вблизи максимумов измерения производятся чаще — через 3—5 нм. Кроме того, для измерений могут быть использованы микрофотометры, но при этом необходимо учесть, что в этом случае измерения выполняются в направленном свете. Измеренные так называемые эффективные плотности на микрофотометре численно будут больше диффузных плотностей, измеряемых на денситометре. В среднем значению $D_n = 1,0$ на негативе, измеренному на денситометре, соответствует $D_m \approx 1,25$, измеренное на микрофотометре. Поэтому при обработке спектросенситограмм необходимо после измерения плотностей на микрофотометре перевести их в диффузное значение, используя в этих целях характеристическую кривую, полученную по результатам измерения сенситограммы на денситометре и микрофотометре.

Вычисления спектральной светочувствительности фотопленки производятся в соответствии с известным выражением

$$S_{\lambda} = 1/H_{\lambda} (D = D_n + 1,0)$$

Характеристика	Тип пленки			
	13	13 м	15	15 м
Оптическая плотность вуали	0,25	0,25	0,17	0,17
Светочувствительность	2000	3000	700	1000 1300
γ	2,2	1,2—1,6	1,9	1,2—1,6
Разрешающая способность, мм ⁻¹	70	70	85	85
Толщина, мкм	170	170	170	170
Противореольный слой	—	—	—	—
Фактор G зернистости	40	—	30	—
Коэффициент резкости	25	25	30	30
Фотографическая широта	0,9	0,9	0,9	0,9
Резольвометрическая широта	0,7	—	0,6	—
Рекомендованный проявитель	АСП-3М	АСП-3М	УП-2	УП-2
Рекомендуемая продолжительность проявления, мин	6—8	6—8	6—8	4—8

Характеристика	Тип пленки			
	Н-740 (Н-840)	ЦН-3	СН-6 (СН-6М)	Т-27
Оптическая плотность вуали	0,3	0,3	0,3	0,1
Светочувствительность	250	120	300	400
γ	1,6—2,6	1,2—1,6	1,7—2,6	2,0
Разрешающая способность, мм ⁻¹	1,8 63	58	58	185
Толщина, мкм	—	170	170	80
Противореольный слой	—	—	—	—
Фактор G зернистости	—	—	—	—
Коэффициент резкости	25	20	20	—
Фотографическая широта	0,9	—	—	0,9
Рекомендованный проявитель	УП-2	ЦПП-1	ЦПП	УП
Рекомендуемая продолжительность проявления, мин	—	—	13	13

Тип пленки

16	17	18	20	25	АС-1
0,17	0,2	0,1	0,05	0,12	0,2
1000	350	90	350	400	1000
	500	140	500		
1,7-2,2	1,9	2,3-3,0	1,7	1,5-2,1	1,5-2,1
85	120	250	140	155	63
90	140	145	85	90	145
—	со слоем	со слоем	со слоем	—	—
—	16	10	25	—	—
30	44	22	30	50	25
0,9	1,5	0,75	0,9	0,9	0,9
—	1,0	0,80	0,80	—	—
УП-2	Н-1	УП-2	АСП-20	Н-1	УП-2
6-8	6-8	6	8	6-8	6-8

Тип пленки

Т-22	Т-30	Т-33	Т-28	Т-24	Т-29
0,2	0,05	0,1	0,1	0,3	0,26
1000	800	400	170	4500	3000
1,6-2,1	1,9	1,75	0,3	1,6	1,7-2,1
130	155	155	230	65	68
—	—	—	70	170	170
со слоем	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	20	20
0,9	1,05	0,9	0,9	0,7	0,75
УП	УП	АСП-20	УП	АСП-3М	АСП-3М
9	9	—	—	7	6-9

Каждое частное значение количества монохроматического освещения H_λ находится по формуле

$$\lg H_{\lambda (D=D_0+1,0)} = (\lg E_\lambda + \lg \tau_n + \lg t + \lg l_{\text{щ}})_{D=D_0+1,0},$$

где E_λ — монохроматическая, энергетическая освещенности в фокальной плоскости спектросенситометра при длине волны λ в отсутствие каких бы то ни было ослабителей света ($\tau_n=1$) при ширине щели $l_{\text{щ}}=1$ мм; τ_n — коэффициент пропускания n -й дырчатой диафрагмы осветительно-сенситометрического устройства; t — выдержка затвора; $l_{\text{щ}}$ — ширина щели спектрографа.

Величина E_λ берется из паспорта спектросенситометра для длины волны света λ , которая определяется по спектросенситограмме для измеренного значения $D=D_0+1,0$. Вычисления выполняются для каждого изображения спектра на спектросенситограмме. По результатам обработки спектросенситограммы строится график $\lg S_\lambda=f(\lambda)$.

При таком способе испытания фотопленки с одинаковым относительным спектральным распределением светочувствительности будут описываться одинаковыми по форме кривыми спектральной чувствительности, независимо от того, какова абсолютная величина интегральной светочувствительности. Различия же в последней будут проявляться только в различном положении (высоте) таких кривых относительно оси абсцисс (оси λ).

§ 43. ЦВЕТНЫЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ ФОТОГРАФИЧЕСКИХ СЪЕМОК ИЗ КОСМОСА

Первые космические съемки определили возможность широкого применения цветных фотоматериалов для исследования Земли.

В основе современной цветной фотографии лежит теория трехкомпонентного цветного зрения, впервые выдвинутая М. В. Ломоносовым (1756 г.), развитая впоследствии Ньютоном, Максвеллом (1885 г.) и др.

Система цветоощущающих приемников глаза дает возможность воспроизводить любой цвет смешением трех основных цветов — синего (С), зеленого (З), красного (К).

Попарное смешение этих цветов дает возможность получить дополнительные цвета — голубой (Г), желтый (Ж), пурпурный (П); $Г=С+З$; $Ж=З+К$; $П=С+К$.

При смешении трех основных цветов получается белый свет $С+З+К=Б$.

Дополнительные цвета Ж, П, Г можно получить путем вычитания (поглощения) некоторого участка спектра из белого света: $Ж=Б-С$; $П=Б-З$; $Г=Б-К$.

Пользуясь светофильтрами дополнительных цветов, можно получить все основные цвета: $П+Г=С$; $Г+Ж=З$; $Ж+П=К$.

Получение дополнительных цветов путем сложения основных называют аддитивным синтезом цвета, а светофильтры синий, зеленый и красный называют иногда аддитивными светофильтрами.

Получение основных цветов путем сложения дополнительных (вычитание из белого цвета некоторых участков спектра) называют субтрактивным синтезом цвета, а светофильтры желтый, пурпурный и голубой называют субтрактивными светофильтрами.

Рассмотренные основные закономерности образования цветов лежат в основе различных способов цветной фотографии. В основе современных способов цветной фотографии лежит субтрактивный синтез цвета. Реализация этого способа основана

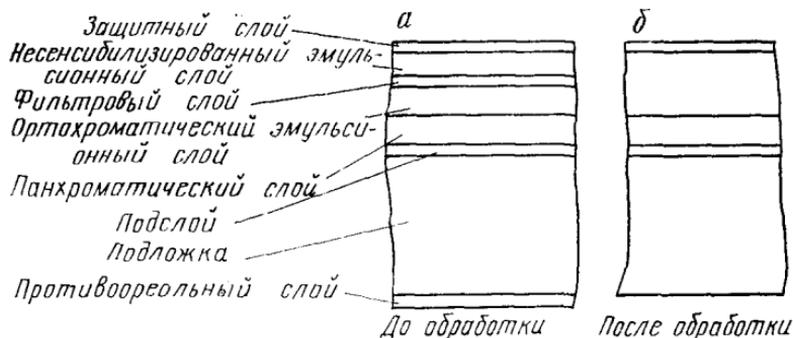


Рис. 48.

на использовании многослойных фотографических материалов.

Существующие цветные фотопленки можно разделить на две группы: пленки, позволяющие воспроизвести объекты ландшафта в цветах, близких к натуральным; пленки, на которых объекты ландшафта передаются в условных цветах, т. е. цветах, не соответствующих цвету фотографируемого ландшафта. Первую группу составляют цветные фотопленки негативные и обратимые. Вторую группу составляют спектрзональные фотопленки.

Цветные фотопленки в соответствии с теорией трехкомпонентного цветового зрения имеют три светочувствительных эмульсионных слоя, обладающих различной эффективной спектральной чувствительностью (рис. 48, а).

Верхний слой несенсибилизированный, имеет чувствительность к лучам синего цвета; средний слой ортохроматический, имеет чувствительность к лучам зеленого цвета; нижний слой панхроматический, имеет чувствительность к лучам красного цвета. Каждый элементарный эмульсионный слой содержит цветообразующую бесцветную компоненту, при взаимодействии которой с продуктами окисления специального проявляющего

вещества, образующимися в тех местах, где происходит восстановление галогенида серебра, выделяется краситель.

Для исключения воздействия синих лучей на ортохроматический и панхроматический слой между верхним несенситивизированным слоем и средним ортохроматическим слоем располагается желтый фильтровый слой. Он состоит из селективно поглощающего коллоидно-дисперсного серебра, устраняемого из слоя в процессе его фотохимической обработки (рис. 48, б).

Спектральная эффективная чувствительность цветной фотопленки лежит в диапазоне от 450 до 680 нм, т. е. соответствует видимой зоне спектра.

Цветные пленки с воспроизведением объектов в натуральных цветах рекомендовали применять при фотографировании с низких высот (2—3 км). Считали, что с увеличением высоты фотографирования увеличивается влияние воздушной дымки. Из-за различной степени рассеивания лучей разных длин волн, различного состояния атмосферы спектральная характеристика и плотность дымки непостоянны. Следует отметить, что влияние дымки на качество негативов изучено еще в недостаточной мере, но опыт цветной космической съемки, полученный при полетах АМС «Зонд-7», ОПС «Салют-3», «Салют-4», «Салют-5», показал широкие возможности этого метода.

Спектральнозональные фотопленки могут иметь два или три эмульсионных светочувствительных слоя. В зависимости от спектральных зон эффективной светочувствительности элементарных слоев различаются различные типы фотопленок.

По спектральной чувствительности пленка СН-6М охватывает диапазон от 520 до 800 нм. Верхний инфрахроматический слой имеет чувствительность в области 720—800 нм, нижний панхроматический 520—700 нм. На негативе все объекты, отражающие инфракрасные лучи, воспроизводятся зеленым частичным изображением; отражающие красные лучи — пурпурным частичным изображением. Объекты, отражающие лучи обеих зон, будут воспроизводиться зеленым и пурпурным частичными изображениями, в результате чего получается зеленовато-серое изображение. Пленка СН-6М рекомендована при космической съемке объектов с существенным значением в величине спектральных коэффициентов яркости в инфракрасной и видимой зонах спектра.

Цветовой баланс спектральнозональных пленок рассчитан на применение светофильтра ОС-14.

Строение спектральнозональной пленки СН-6 показано на рис. 49, а.

Спектральнозональная пленка СН-4 по спектральной чувствительности охватывает диапазон для верхнего ортохроматического слоя 510—590 нм, нижнего панхроматического слоя 540—690 нм и воспроизводит все объекты, отражающие зеленые лучи, пурпурным частичным изображением, отражающие красные

лучи — голубым частичным изображением. Цвета объектов с отражательной способностью в этих зонах спектра воспроизводятся близкими к натуральным. Она представляет значительный интерес при съемке поверхности Луны и открытых объектов земной поверхности с выраженным геологическим строением.

Область спектральной чувствительности пленки СН-5 охватывает диапазон для нижнего инфрахроматического слоя 670—

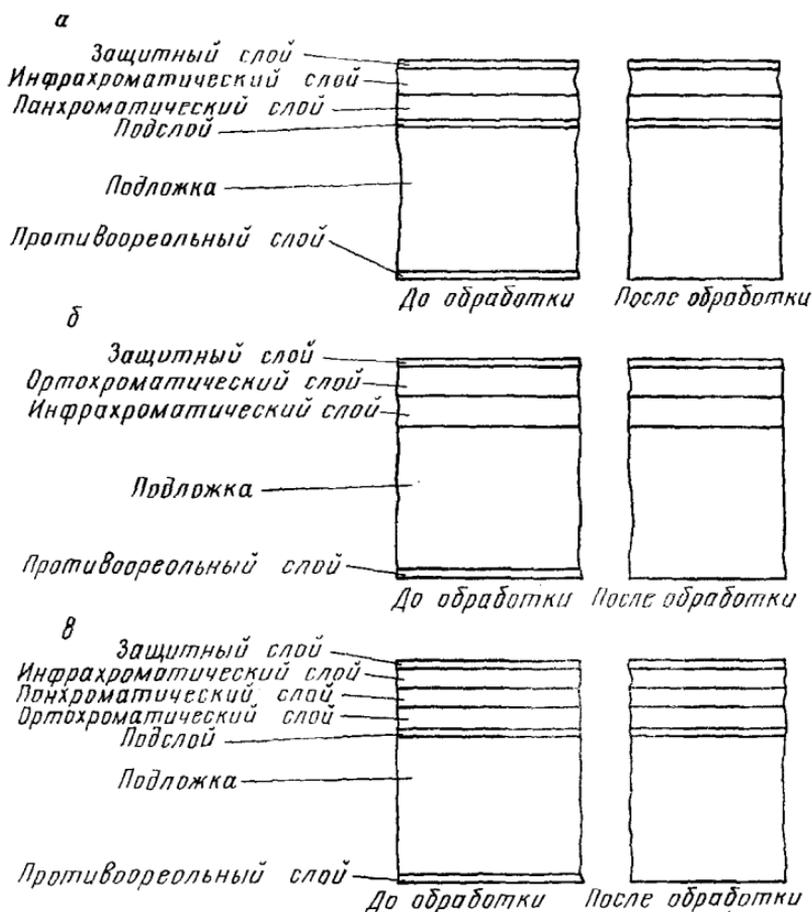


Рис. 49.

800 нм, верхнего ортохроматического 500—600 нм (рис. 49, б).

Объекты, отражающие зеленые лучи на негативе, воспроизводятся пурпурным частичным изображением, отражающие инфрахроматические — голубым. Пленка СН-5 передает объекты в условных цветах. Она представляет значительный интерес при съемке лесных и геологических объектов из космоса.

Спектрзональная пленка СН-23 охватывает и воспроизво-

дит широкую цветовую гамму благодаря наличию трех светочувствительных слоев (рис. 49, в).

Верхний слой имеет чувствительность 670—800 нм и воспроизводит все объекты, отражающие инфрахроматические лучи голубым частичным изображением. Средний слой имеет чувствительность в области 580—600 нм. На негативе все объекты, отражающие красные лучи, воспроизводятся пурпурным частичным изображением. Нижний слой ортохроматический, с чувствительностью 500—600 нм, воспроизводит объекты желтым частичным изображением. Спектрзональная пленка СН-23 передает объекты в условных цветах.

Глава VII

ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ СЕНСИТОМЕТРИЯ

§ 44. МЕТОДИКА СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Методикой испытаний предусмотрена регистрация зависимости количества освещения H , сообщаемого фоточувствительному слою, и полученной оптической плотности D .

Рассмотрим основные светотехнические единицы, которые применяют при измерениях лучистой энергии.

Основной светотехнической единицей является сила света — кандела (кд), равная силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600\,000$ м² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па.

Световой поток Φ определяется произведением силы света I на телесный угол τ , в котором распространяется поток:

$$\Phi = \int_{\tau} I d\tau. \quad (230)$$

При равномерном испускании по всем направлениям

$$\Phi = 4\pi \cdot I. \quad (231)$$

Единицей светового потока является люмен (лм) — световой поток, испускаемый точечным источником в телесном угле 1 ср при силе света 1 кд. Световая энергия Q — величина, равная произведению светового потока Φ на время t , в течение которого излучается или воспринимается этот световой поток:

$$Q = \int_t \Phi dt. \quad (232)$$

Единица измерения — люмен-секунда (лм·с).

Освещенностью E называют величину, равную отношению светового потока Φ , падающего на поверхность, к площади S этой поверхности, т. е.

$$E = d\Phi/dS. \quad (233)$$

Единицей освещенности является люкс (лк).

Освещенность поверхности площадью 1 см^2 при световом потоке падающего на нее излучения, равном 1 лм , называется фотом (фот). $1 \text{ лк} = 10^{-4} \text{ фот}$.

В фотографии применяют также величины светимости R , яркости B , световой экспозиции H .

$$R = d\Phi/dS, \quad (234)$$

За единицу светимости принимают лм/см^2 , т. е. люкс (лк).

Единицей яркости является кд/м^2 — яркость равномерно светящейся плоской поверхности площадью 1 м^2 в перпендикулярном к ней направлении при силе света 1 кд . 1 кд/см^2 получила наименование стильб (ст). $1 \text{ ст} = 10^4 \text{ кд/м}^2$. Яркость идеальной белой поверхности, употребляемая в английской литературе, называется ламберт (Лб). $1 \text{ Лб} = 3193 \text{ кд/м}^2$. Световая экспозиция H — произведение освещенности E на время t , в течение которого происходит облучение, т. е.

$$H = E \cdot t. \quad (235)$$

Она измеряется в $\text{лк} \cdot \text{с}$.

Для общих фотометрических расчетов в фотографии используются единицы измерения в энергетическом масштабе. Поэтому необходимо знать перевод световых величин из одной размерности в другую, т. е. переход от световых единиц к энергетическим и обратно. Для получения закономерно изменяющегося ряда определенных экспозиций на различных участках испытуемого светочувствительного материала (пленке, фотопластинке, фотобумаге) служит прибор, называемый сенситометром.

Изменение экспозиции можно осуществить путем изменения времени, при этом освещенность будет оставаться величиной постоянной, или наоборот. С точки зрения закона взаимозаменяемости безразлично, какая величина будет переменной.

Так как сенситометрические испытания должны быть высокоточными, то нельзя пренебречь даже небольшими отклонениями от закона взаимозаменяемости. При этом шкала выдержки дает другие результаты, чем по закону взаимозаменяемости. Количество скрытого изображения, а значит, и оптическая плотность проявленного изображения D для данного слоя пропорциональна количеству освещения H , действовавшего на слой, и не зависит от времени освещения t и освещенности поверхности E в отдельности. Но это справедливо только в некоторых пределах. Отклонения от закона взаимозаменяемости состоят в том, что при двух равных экспозициях $H_1 = H_2$, где

$H_1 = E_1 \cdot t_1$; $H_2 = E_2 \cdot t_2$, оптические плотности почернения D_1 и D_2 не равны, если освещенности E_1 и E_2 и выдержки t_1 и t_2 не равны соответственно друг другу. Это отклонение объясняется современной теорией скрытого изображения, причем все фотографические материалы имеют большее или меньшее отклонение от закона взаимозаменяемости. С целью максимального приближения сенситометрических испытаний к реальным условиям проведения съемок в сенситометрах применяют выдержку, близкую к практической.

Таким образом, можно сформулировать требования к прибору для получения сенситограмм:

1. Источник света должен иметь цветовую температуру среднего солнечного света (5400 К).

2. Время, в течение которого светочувствительный слой подвергается воздействию светового потока, должно быть постоянным и строго эталонированным.

3. Модулятор количества освещения должен иметь необходимое число изменяющихся оптических плотностей с постоянной константой перехода от одного поля к другому.

4. Прибор должен позволять производить экспонирование светочувствительного материала за светофильтром, который будет применен в условиях аэрокосмической съемки.

Модулятором количества освещения в сенситометре служит оптический ступенчатый клин. Он состоит из ряда нейтральных светофильтров, которые расположены в порядке возрастания оптических плотностей между двумя соседними ступенями на одну и ту же постоянную величину, называемую константой клина. Оптический клин в сенситометре служит модулятором экспозиций.

При освещении светочувствительного слоя через клин в течение известного времени участки материала, находящиеся под разными местами клина, получают различные экспозиции. Величину экспозиции можно легко вычислить, если известны сила источника света, расстояние его до поверхности материала и время освещения. Время освещения всех участков светочувствительного материала будет постоянно, а количество освещения из-за переменной плотности полей клина будет различным.

Таким образом, сенситометр состоит из источника света и модулятора экспозиций. На рис. 50 приведена блок-схема сенситометра. Свет от источника излучения 1 проходит затвор 2, солнечный светофильтр 3, оптический ступенчатый клин 4 и попадает на исследуемый светочувствительный материал 5. Ступенчатый клин имеет 21 поле, его константа равна 0,15. В комплект сенситометра входят цветные светофильтры для определения эффективной светочувствительности. Получают изображение оптического клина — сенситограмму. Сенситометрические испытания включают эталонирование прибора-сенситометра, экспонирование светочувствительного материала, его

фотохимическую обработку и построение по измерениям сенситограммы характеристической кривой.

При сенситометрических испытаниях для измерения и определения оптических плотностей почернений, образовавшихся при воздействии на фотографический материал дозированных количеств освещения, применяют приборы, называемые денситометрами. По принципу действия это фотометры, в которых происходит сравнение яркостей двух потоков при помощи фотоэлементов. Существуют разные конструкции приборов: для визуальных измерений, фото-

электрические, для измерений малых по площади плотностей. Получили широкое применение в практике сенситометрических испытаний регистрирующие фотометрические денситометры. Блок-схема денситометра представлена на рис. 51. Свет от источников излучения 1 попадает на фотоэлемент 2, проходя через измеряемую плотность 4 и через эталонный оптический клин 3. Вначале измеряемая плотность отсутствует, а клин приводится в такое положение, когда наступает фотометрическое равновесие, т. е. когда яркости обоих потоков одинаковы.

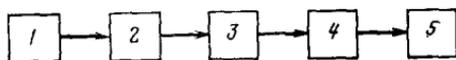


Рис. 50.

После того как световые потоки уравновешены, вводят измеряемую плотность — сенситограмму в световой поток, вследствие чего яркость потока изменится. Для того чтобы яркости одного и второго потоков вновь были равны, передвигают оптический клин до установления равновесия потоков. При этом регистрируется величина оптической плотности, измеренная с помощью фотоэлемента 5. Разность плотностей клина в его начальном и конечном положениях равна измеренной

плотности. Полученные значения оптической плотности каждого поля сенситограммы позволяют построить графически в прямоугольной системе координат кривую, характеризующую связь количества освещения и оптической плотности почернения, с помощью графопостроителя 6.

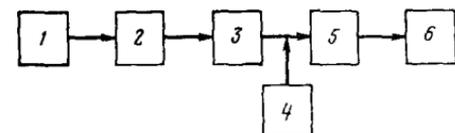


Рис. 51.

§ 45. СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОК

Характеристическая кривая выражает в графической форме зависимость оптической плотности проявленного фотографического материала и логарифма количества освещения, действовавшего на слой. Таким образом, при сенситометрических испытаниях измеряется оптическая плотность D , называемая десятичным логарифмом непрозрачности ($D = \lg O$). Оптиче-

ская плотность пропорциональна количеству серебра, выделившегося на участке слоя. Величина оптической плотности существенно зависит от метода измерений. Одно и то же почернение может показать разную величину оптической плотности, в случае если измерение производить при рассеянном и направленном свете. Зависимость распределения света по разным направлениям характеризуется индикатрисой рассеяния. Если приемник световой энергии расположить вблизи измеряемого почернения, то будет измерен почти весь прошедший через среду поток, если же приемник находится на некотором расстоянии, то будет измерена только его часть. Оптическую плотность, измеренную в рассеянном свете, обозначают $D_{\#}$ и называют диффузной, а измеренную в направленном свете обозначают D_{\parallel} и называют регулярной. В фотометрических приборах в качестве осветителя применяют опаловое матовое стекло, индикатриса рассеяния которого приближается к полусфере, т. е. измерения диффузной оптической плотности будут производиться в рассеянном свете. Регулярная оптическая плотность больше, чем диффузная, так как

$$D = \lg \frac{F_0}{F}, \quad (236)$$

где F_0 — световой поток, падающий на слой; F — световой поток, прошедший через слой. В случае рассеянного света световой поток будет больше, следовательно, $D_{\#} < D_{\parallel}$. При сенситометрических испытаниях принято измерять диффузные оптические плотности D .

Если величина оптической плотности первого (начального) поля клина сенситограммы равна D_1 , то для какого-либо поля n при константе клина K оптическая плотность D_n определяется формулой

$$D_n = K(n - 1) + D_1. \quad (237)$$

По характеристической кривой, построенной по измерениям оптической плотности, в прямоугольной системе координат определяют ряд характеристик. Горизонтальная ось является осью логарифмов экспозиций, вертикальная ось является осью оптических плотностей. Построения ведут на специальных сенситометрических бланках. Область вуали D_0 определяет участок кривой, идущий параллельно горизонтальной оси. На этом участке (1) оптическая плотность постоянна (рис. 52). Экспозиции, соответствующие этой области, не вызывают почернений, которые отличались бы от плотности вуали. В области недодержек (участок 2) равным приращением логарифмов экспозиций соответствуют неравные приращения оптической плотности. Они будут постоянно возрастать и перейдут затем в область пропорциональной передачи (участок 3). Эта область называется областью правильных экспозиций или пропорциональной

передачи. Она характеризуется прямолинейным участком кривой, где равным приращениям логарифмов экспозиций соответствуют равные между собой приращения оптической плотности.

В области передержек (участок 4) равным приращениям логарифмов экспозиций соответствуют не равные между собой постепенно уменьшающиеся приращения оптической плотности. Точка D_{max} на этом участке соответствует максимальной величине оптической плотности. С дальнейшим увеличением экспо-

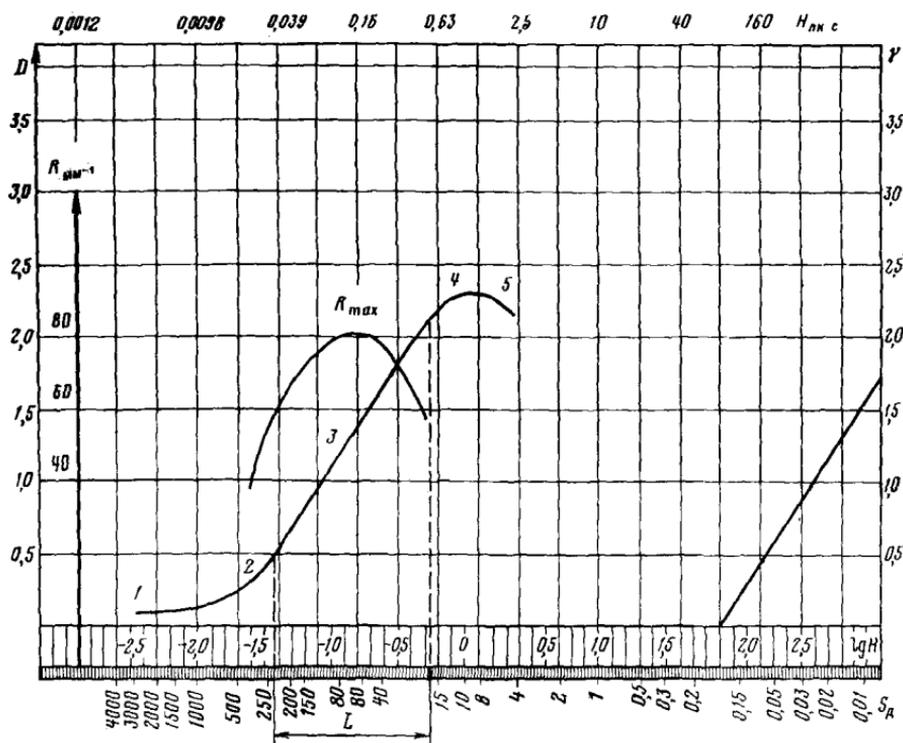


Рис. 52.

зиции величина оптической плотности несколько уменьшается. Эта область (участок 5) называется областью соляризации. Физическая причина явления соляризации связана с превращением негативного изображения в позитивное при очень сильной передержке. Это возникает в силу того, что во время экспозиции наряду с появлением центров проявления на поверхности эмульсионного слоя образуются атомы брома, которые не успевают связываться желатиной при больших экспозициях и взаимодействуют с серебряными центрами проявления. Различают также область так называемой фотографической индукции, или инерции, которая расположена влево от области 1 в виде горизонтальной прямой.

Экспозиции, соответствующие этой области, не вызывают почернений, которые отличались бы от плотности вуали.

Таким образом, характеристическая кривая разделяется на несколько областей, в каждой из которых будет свое воспроизведение объектов съемки. Наиболее правильная передача яркостей объектов будет в области нормальных экспозиций, т. е. на прямолинейном участке характеристической кривой.

Характеристическая кривая необходима для экспонметрических расчетов, выбора и контроля режима фотохимической обработки материалов съемки, для фотометрических измерений. По характеристической кривой определяют светочувствительность пленки, коэффициент контрастности проявленного материала, фотографическую широту, величину вуали, максимальную, минимальную и среднюю плотности, резольвометрическую широту.

Светочувствительность пленки определяет необходимую выдержку при выполнении аэрокосмической съемки и выражается формулой

$$S_D = K/H_{DK}, \quad (238)$$

где H_{DK} — экспозиция, необходимая для получения заданной оптической плотности при данном времени и определенных условиях проявления; K — коэффициент пропорциональности, определяющий численное выражение величины светочувствительности.

Таким образом, светочувствительность определяется величиной, обратной количеству освещения, необходимого для получения заданного фотографического эффекта. Для черно-белых материалов, применяемых для целей аэрокосмических съемок, принята величина оптической плотности, на 0,85 превышающая величину оптической плотности вуали, коэффициент пропорциональности при этом равен 10.

В случае если выбирают величину H , необходимую для получения $D = D_0 + 0,2$, то коэффициент пропорциональности равен 1.

Практически величина светочувствительности определяется графически. К значению оптической плотности D_0 необходимо прибавить 0,85, что определит величину фотографического эффекта. По этому значению D определяют точку на характеристической кривой и опускают перпендикуляр на ось абсцисс, где в соответствующих единицах определяется величина S_D .

Если космическую съемку выполняют со светофильтром, то сенситометрические испытания пленки проводят с тем же светофильтром. Светочувствительность, определенную по характеристической кривой, в таком случае называют эффективной. Отношение светочувствительности пленки $S_{\text{общ}}$ (без светофильтра)

к светочувствительности $S_{эф}$ (со светофильтром) называется кратностью светофильтра,

$$K_c = S_{общ}/S_{эф}. \quad (239)$$

Другой существенной характеристикой является коэффициент контрастности, количественно характеризующий контрастность фотографического материала. Коэффициент контрастности определяется графически и характеризует наклон прямолинейного участка характеристической кривой относительно оси абсцисс:

$$\lg \alpha = \gamma = \frac{D_1 - D_2}{\lg H_2 - \lg H_1}, \quad (240)$$

где D_2 и D_1 — оптические плотности почернений, получаемых под действием экспозиций H_2 и H_1 .

С величиной коэффициента контрастности связан интервал оптических плотностей негатива. Угол наклона α образуется при пересечении продолжения прямолинейного участка характеристической кривой с осью абсцисс (в точке инерции i). Коэффициент контрастности характеризует условия проявления. Проявление негативов, полученных при космической съемке, производится с одновременным проявлением сенситограмм, побывавших в космосе и контрольных сенситограмм, хранившихся в стационарных условиях. Коэффициент контрастности пленок изменяется в значительных пределах и может быть от 0,6 до 2,5.

Фотографическая широта является одной из основных сенситометрических характеристик фотографического материала. Она определяет возможность правильного воспроизведения интервала яркости объектов при изменяющихся условиях экспонирования фотоматериала.

Фотографическая широта определяется как интервал экспозиций, ограниченный точками начала и конца прямолинейного участка характеристической кривой (см. рис. 52),

$$L = \lg H_2 - \lg H_1 = \lg \frac{H_2}{H_1}. \quad (241)$$

Чем больше фотографическая широта фотографического материала, тем больший интервал яркостей объектов можно воспроизвести в области прямолинейного участка характеристической кривой.

Широта фотографических материалов определяет связь между коэффициентом контрастности γ и интервалом оптических плотностей ΔD

$$L = \Delta D/\gamma.$$

В случае если фотографическая широта меньше, чем интервал яркостей, часть объектов местности будет изображена в области криволинейного участка характеристической кривой. Если

фотографическая широта меньше интервала яркости, то выдержка может изменяться в определенных пределах без ущерба для качества изображения в отношении передачи различных яркостей. Широту выдержек A в арифметическом выражении найдем непосредственно из соотношения

$$A = \frac{H_2}{H_1} \cdot \frac{B_{\min}}{B_{\max}} \quad (242)$$

Эта величина показывает, как может колебаться выдержка при съемке объектов с определенным интервалом яркостей на фотопленке с данной фотографической широтой или величина A показывает допустимые изменения выдержки.

Необходимо подчеркнуть, что при аэрокосмических съемках расчеты выдержек при съемке объектов с большим интервалом яркости необходимо производить при условии, что весь интервал яркостей будет находиться в области пропорциональной передачи характеристической кривой.

Полученные сенситометрические характеристики D_0 , S_D , γ , L_Φ определяют выбор фотографического материала с учетом интервала яркостей и условий фотографирования, условий экспонирования и химико-фотографической обработки. В табл. 6 приведены требования по точности величин S_D , γ , D_0 .

Т а б л и ц а 6

Величины	Абсолютное значение	Округленное до
Светочувствительность S_D	Ниже 10	0,5
	От 10 до 20	1,0
	» 21 » 50	2,0
	» 52 » 100	5,0
	» 105 » 200	10,0
	» 210 » 500	20,0
	» 520 » 1000	50,0
	» 1050 » 2000	100,0
» 2100 » 5000	200,0	
Коэффициент контрастности γ	Ниже 0,8	0,02
	От 0,8 до 1,5	0,05
Оптическая плотность вуали D_0	Выше 1,5	0,10
	Ниже 0,2	0,01
	Выше 0,2	0,02

Одной из характеристик, определяющих резкость фотографического изображения, является зернистость эмульсионного слоя. Различают микрзернистость, которая определяется при увеличениях порядка $1000\times$, и макрзернистость, которая опре-

деляется при небольших увеличениях, порядка $10\times$. По негативам определяют макрозернистость, когда наблюдаются не микрозерна эмульсии, а макрозерна, которые создают неоднородность почернения равномерно экспонированного и одинаково проявленного участка пленки. Макрозернистость или зернистость определяют визуально или фотометрическим методом (гранулярность). Визуальная зернистость оценивается коэффициентом G и определяется кратностью увеличения $n\times$, при которой визуально заметна зернистая структура изображения:

$$G = 100/n\times, \quad (243)$$

Измерение микрозернистости с помощью регистрирующего микрофотометра дает более точную оценку зернистости. По измерениям получают кривую изменения оптической плотности почернения в пределах равномерно экспонированного участка фотоизображения. Для оценки зернистости определяют среднее квадратическое отклонение оптической плотности микроучастка почернения от среднего значения оптической плотности в пределах всего участка фотоизображения. Следует отметить, что цветные фотоизображения имеют в 2,5—3 раза меньшую зернистость, чем черно-белые негативные фотоизображения.

Для определения макрозернистости (фотографических шумов) почернений и цветных полей фотографическим проекционным методом в диапазоне значений фактора зернистости от 2,4 до 67 служит автоматический проекционный гранулометр ПП-48.

Представляя собой существенное усовершенствование проекционного гранулометра УКП-5, этот прибор напольного типа является в своей основе горизонтально расположенным прецизионным увеличителем полностью автоматического типа. Прибор снабжен объективом типа «Микропланар» с фокусным расстоянием 24 мм и числовой апертурой 0,11, лекальным устройством для автоматической фокусировки при 16 масштабах увеличения (1,5; 1,85; 2,3; 2,95; 3,7; 4,6; 5,8; 7,2; 9,0; 11,3; 14; 17,5; 22; 27,5; 34; 42,5), набором серых светофильтров для поддержания неизменной освещенности в фокальной плоскости дисковым электрическим затвором и прерывисто перемещающейся перпендикулярно к оптической оси кассетой, в которой заключен фотографический материал — детектор зернистости (негативная пленка типа «Фото-32»). Трехпрограммная система автоматика позволяет в результате одного нажатия кнопки проэкспонировать на материал-детекторе гранулограмму с тем или иным числом полей (масштабов увеличения) при выдержке 5 или 10 с. Имеются также фотоэлектрическое экспонометрическое устройство и управляемый вручную серый клин, служащие для установки правильной экспозиции согласно оптической плотности изучаемого почернения или цветного поля и уровню светочувствительности фотографического материал-детектора, и набор

светофильтров (синий, зеленый, красный), используемый для определения макрозернистости цветных полей.

При проведении сенситометрических испытаний определяют также резольвометрические характеристики, показывающие способность фотоматериала раздельно воспроизводить мелкие, близко расположенные детали объектов фотографирования. Разрешающая способность определяется максимальным числом раздельно передаваемых фотослоем параллельных штрихов, приходящихся на 1 мм оптического изображения и имеющих равную ширину с промежутками между ними. Для испытаний применяют прибор резольвометр с набором миры с несколькими группами параллельных штрихов различной частоты. Разрешающая способность изменяется при экспонировании фотоматериала с разными выдержками. По резольвометрическим кривым (резольвограммам) строят характеристическую кривую, график функции, характеризующий изменение разрешающей способности R фотоматериала от экспозиции H .

Резольвометрическая широта L_R равна разности логарифмов относительных значений, соответствующих точкам на кривой разрешения с $R_{пр}=0,8 R_{max}$, $L_R=(\lg H_2 - \lg H_1)$, $R=0,8 R_{max}$ (см. рис. 52).

Для различных оптических плотностей изображения разрешающая способность различна.

Если разрешающая способность при $D=1$ достигает максимального значения, то при $D=0,5$ или $D=1,5$ мы получим меньшую разрешающую способность. Пользуясь этой кривой, можно определить, в каком интервале оптических плотностей будет получаться разрешающая способность, удовлетворяющая требованиям съемки. Принято при расчетах брать $R_{опт}=0,8 R_{max}$.

Зависимость разрешающей способности от контраста тест-объекта для черно-белых пленок определяется эмпирической формулой

$$R_{K_t} = R_{K=1} \sqrt{\frac{K_t}{2 - K_t}}, \quad (244)$$

где R_{K_t} — разрешающая способность при контрасте миры K_t ; $R_{K=1}$ — разрешающая способность при контрасте миры $K=1$.

Резольвометрическая широта определяет интервал яркости, в пределах которого детали объектов фотографирования будут воспроизводиться с разрешением не хуже 0,8.

Имеется также эмпирическая формула, определяющая зависимость разрешающей способности от яркости тест-объекта:

$$R_{K_t} / R_{K=1} = 1 - 10^{-\alpha \lg \rho} = 1 - \rho^{-\alpha}, \quad (245)$$

где ρ — отношение яркостей штрихов миры; α — постоянная (близка к 1,0).

Если $\alpha=1$, то отношение $R_{K_l}/R_{K=1}$ будет линейно зависеть от $\frac{1}{\rho}$.

Изображая графически изменение разрешающей способности от экспозиции и контраста, можно получить объем информации как для отдельных звеньев, так и для всей съемочной системы в целом.

На величину разрешающей способности влияют также условия проявления, зернистость эмульсионного слоя и т. д.

Предельная (наименьшая) разность почернений, при которой объекты еще различаются, определяется формулами

$$\left. \begin{aligned} \Delta D &= \Delta D_0 \cdot M(\nu) = g \cdot \Delta \lg H_0 M(\nu) \\ \Delta D &= \Delta D_0 \cdot M(\nu) = g \cdot \Delta \lg H_0 M(\nu) = g \cdot G \cdot 2 \nu \end{aligned} \right\}, \quad (246)$$

где ΔD — разность оптических плотностей; $M(\nu)$ — функция передачи модуляции; g — градиент характеристической кривой; H — экспозиция; G — гранулярность; ν — пространственная частота.

Если учесть все факторы, влияющие на разрешающую способность космической съемочной системы, то получим многоступенчатый процесс изменения информации об объекте, т. е. цепь системы будет сведена к оценке качества фотографического изображения по критерию разрешающей способности.

Разрешающая способность фотосъемочной системы R_c определяется, таким образом, способностью отдельных ее звеньев воспроизводить малоразмерные и малоконтрастные смежные объекты. Зная расчетную разрешающую способность звеньев, можно определить предполагаемое качество фотографического изображения.

§ 46. СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ЦВЕТНЫХ ПЛЕНОК

Сенситометрические испытания цветных пленок должны проводиться в условиях, максимально соответствующих производственной съемке. Для изменения количества освещения светочувствительного слоя в соответствии со строгой закономерностью служит цветной сенситометр. Источник света сенситометра должен быть строго эталонирован, сила света и спектральная характеристика излучения известны, цветовая температура лампы накаливания 2850 ± 20 К. Лампа накаливания экранируется светофильтром дневного искусственного света, создающего излучение с цветовой температурой 6500 К. Оптическая схема цветного сенситометра ЦС-2 представлена на рис. 53. Свет от лампы накаливания 1, пройдя через конденсор 2, щель 3 и светофильтр дневного света 4, поступает на зеркало 5. Отразившись от зеркала, световой поток фокусиру-

ется объективом 6 на светочувствительный слой. Калибрующая плотность сенситограммы 7 и цветные светофильтры 8 изменяют интенсивность и спектральный состав света. С помощью оптического клина 10 различным участкам испытываемого материала

сообщается закономерно изменяющееся количество освещения. Оптический клин имеет 30 полей, изменение плотности от поля к полю постоянно и равно 0,15. Щель 9 во время экспонирования передвигается с постоянной скоростью и освещает последовательно все участки светочувствительного слоя 11, который плотно прижат к оптическому клину. Изменение ширины экспонирующей щели позволяет производить сенситометрические испытания

цветных аэропленок с выдержками $\frac{1}{20}$; $\frac{1}{50}$; $\frac{1}{90}$ секунды. Цветные трехслойные пленки на прозрачной основе экспонируют, вводя последовательно в световой поток синий, зеленый и красный светофильтры, спектрзональные двухслойные пленки экспонируют за зеленым и красным светофильтрами, трехслойные спектрзональные — за синим, зеленым и красным светофильтрами.

После проведения фотохимической обработки цветных фотопленок получают сенситограммы, экспонированные за цветными светофильтрами. Для каждого эмульсионного слоя необходимо определить величину оптической плотности, образованную пропорционально плотности оптического клина и времени экспонирования.

Измерение оптической плотности D каждого эмульсионного слоя цветной аэропленки производят на приборах — денситометрах, блок-схема которого показана на рис. 54.

Принцип измерения основан на сравнении плотности сенситограммы с калиброванной плотностью компенсационного нейтрального фильтра. На основании полученных отсчетов на сен-

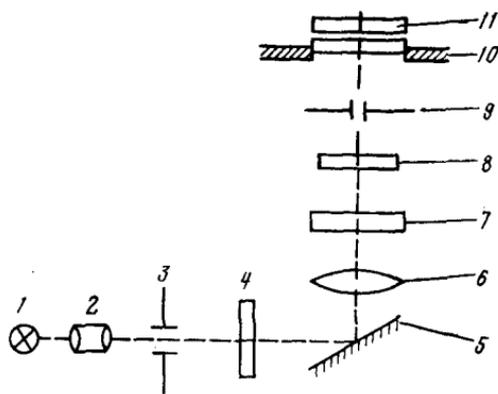


Рис. 53.

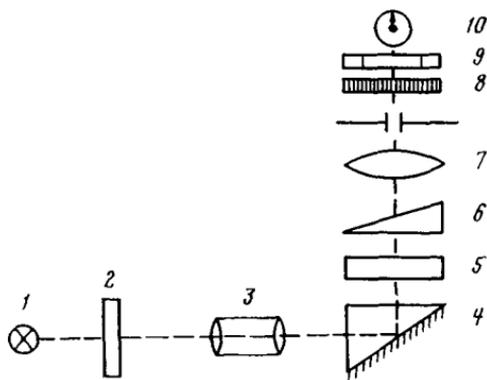


Рис. 54.

ситометрическом бланке строят характеристическую кривую для каждого эмульсионного слоя. Измерение цветных сенситограмм производят за узкозональными фильтрами синим, зеленым и красным.

Оптическая плотность инфраслоя спектрозональной пленки измеряется за красным светофильтром, панхроматического слоя — за зеленым. Световой поток от источника света 1, пройдя теплофильтр 2 и конденсор 3, изменяет свой спектральный состав из-за введения в поле зрения прибора цветного узкозонального светофильтра 5.

Для уменьшения габаритов прибора применена призма 4. Пройдя через эталонированный клин 6, световой поток поступает на фокусирующую линзу 7. После прохождения измеряемой плотности сенситограммы 8 световой поток изменяет свою интенсивность и поступает на фотоэлемент 9. По шкале микроамперметра 10 производят отсчет и переводят его в величину копировальной плотности.

Для измерения оптических плотностей цветных и черно-белых пленок применяют также универсальный денситометр ПД-ФЭУ. Денситометр является фотоэлектрическим прибором, перевод показаний микроамперметра в единицы плотности производят по градуировочным таблицам.

Сенситометрические показатели цветных фотоматериалов те же, что и для черно-белых: светочувствительность слоя, коэффициент контрастности, оптическая плотность вуали. Все эти величины определяют для каждого светочувствительного слоя отдельно, и для каждого слоя строится своя характеристическая кривая. Так как получают несколько значений сенситометрических характеристик, то в технических условиях на пленку указывают еще два критерия, определяющих фотографическое качество цветной пленки, — баланс по светочувствительности $B_{\text{ч}}$ и баланс по контрастности $B_{\text{к}}$. Баланс по светочувствительности определяется как отношение максимальной светочувствительности слоя к минимальной

$$B_{\text{ч}} = S_{\text{max}}^{\text{слой}} / S_{\text{min}}^{\text{слой}} \leq 2,5. \quad (247)$$

Баланс по коэффициенту контрастности определяют как разность между максимальным и минимальным значениями γ различных слоев

$$B_{\text{к}} = \gamma_{\text{max}}^{\text{слой}} - \gamma_{\text{min}}^{\text{слой}} \leq 0,6. \quad (248)$$

Идеальной цветной пленкой будет такая, у которой все кривые будут настолько сбалансированы, что при построении они совпадут, сольются в одну характеристическую кривую.

Недопустимое расхождение по светочувствительности слоев и коэффициентам контрастности может возникнуть из-за неправильного хранения пленки (как правило, инфрахроматический

слой теряет свою чувствительность быстрее, чем панхроматический), из-за применения светофильтра, не соответствующего требованиям съемки на данном типе пленки, из-за неправильного экспонирования, а также из-за неправильной химико-фотографической обработки пленки.

§ 47. СВЕДЕНИЯ О ЗАРУБЕЖНЫХ СИСТЕМАХ СЕНСИТОМЕТРИИ

Все известные сенситометрические системы основаны на общих принципах и различаются между собой по конструкции сенситометрической аппаратуры, а также методике проведения испытаний.

В ГДР и ФРГ принята сенситометрическая система ДИН, в которой критерием светочувствительности является оптическая плотность, превышающая плотность вуали на 0,1 ($D_{кр} = 0,1 + D_0$).

Светочувствительность в системе ДИН выражается в логарифмических единицах и соответствует уравнению

$$S = 10 \lg \frac{I}{H_{D_{кр}=0,1+D_0}}. \quad (249)$$

Значение светочувствительности выражается дробным числом со знаменателем 10, но при маркировке фотоматериалов знаменатель опускается и на упаковке материала пишется, например, 20 ДИН.

При изменении числа ДИН на единицу выдержка при съемке должна быть соответственно увеличена или уменьшена в 1,26 раза.

При определении светочувствительности по системе АСА (США) предусматривается получение семейства характеристических кривых. При этом одновременно используются два критерия светочувствительности: $D_{гр} = 0,1 + D_0$ и $D_{кр} = 0,9 + D_0$. На каждой кривой находят плоскость, соответствующую первому критерию светочувствительности, и из точки, отмечающей ее, опускают перпендикуляр на ось логарифмов экспозиций. От полученной при пересечении с осью логарифмов экспозиций точки откладывают отрезок, равный 1,3 масштаба этой оси, и восстанавливают перпендикуляр, пересекающий характеристическую кривую. От точки откладывают вверх по перпендикуляру отрезок, равный плотности ($D_{гр} = 0,9 + D_0$), и из пересекемого перпендикуляром семейства выбирают характеристическую кривую, наиболее близко расположенную к вершине E . По этой характеристической кривой определяют значение светочувствительности.

Затем полученную величину светочувствительности округляют до ближайшего числа геометрической прогрессии со знаменателем 1,26 (4, 6, 8, 10, 12, 16, 20 и т. д.).

Светочувствительность в системе АСА может быть также выражена и логарифмическим числом по формуле

$$S = \log_2 0,35 S_x = 3,32 \lg 0,3 S_x. \quad (250)$$

В связи с различием критериев светочувствительности и условий испытания фотоматериалов не существует точных способов перевода чисел светочувствительности из одной системы в другую.

§ 48. ДЕФОРМАЦИЯ ПЛЕНОК И МЕТОДЫ ЕЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Измерительные свойства космического снимка в значительной степени зависят от геометрической точности построения фотографического изображения.

В реальных условиях космической съемки происходит искажение внутренней и внешней связей проектирующих лучей из-за различных явлений: деформации пленки и ее невыравнивания в плоскость в момент экспозиции, дисторсии объектива, внутренней фотограмметрической рефракции, деформации иллюминатора, атмосферной рефракции.

Метрическая нестабильность пленки обусловлена многими факторами, суммарное влияние которых вызывает искажение геометрических характеристик объекта и координатных меток, расположенных в фокальной плоскости аппарата. Деформация негативов трудно поддается учету и существенно влияет на точность стереофотограмметрической обработки. В настоящее время новейшие фотограмметрические приборы имеют точность измерения порядка 1 мкм. Однако деформация фотографических материалов намного превосходит эту величину и не позволяет при измерениях полностью использовать высокую точность стереофотограмметрических приборов.

Для измерения негативов с точностью 1 мкм необходимо, чтобы усадка пленки после обработки не превышала 0,001 %. На самом же деле она составляет от 0,1 до 0,4 % и более.

Размеры фотоматериалов после обработки меняются в пространственной системе координат по трем осям. Для фотограмметрических целей наиболее важное значение имеет учет плоскостной деформации.

Различают следующие виды плоскостной деформации:

равномерная (продольная и поперечная деформация одинаковы и не препятствуют фотограмметрическим работам, так как легко учитываются);

остаточная (разность между продольной и поперечной деформациями);

неравномерная (в пределах одного снимка деформация непостоянна даже в отдельном направлении).

Деформация пленки после процесса обработки главным образом зависит от химического состава и микроструктуры подложки.

Триацетатные подложки, применяемые для цветных аэропленок, поглощают менее 1 % воды, лавсановая основа для аэропленок практически совсем не набухает.

Лавсановые пленки зарекомендовали себя как наименее поддающиеся деформации после процесса химико-фотографической обработки.

Но деформация цветных аэропленок складывается не только из деформации основы: деформируется еще и желатиновый эмульсионный слой. Деформация эмульсионных слоев имеет меньшую величину, так как толщина их в 8—10 раз меньше толщины подложки. Эмульсионный слой, деформируясь при высыхании, еще более стягивает основу.

Положительное влияние на снижение деформации оказывает введение пластификаторов в эмульсионный слой аэропленок. Наиболее доступным пластификатором является глицерин. После промывки пленку опускают в ванну, содержащую 6-процентный раствор глицерина. Глицерин остается после высушивания в эмульсионном слое, который в меньшей степени стягивает подложку, уменьшает скручиваемость аэропленки. Вместо глицерина можно применять для пластификации 2-процентный раствор мочевины. При наличии этих пластификаторов отрицательная деформация (усадка) переходит иногда в положительную, абсолютное значение ее снижается.

Особенно важно, что при этом происходит сближение величин продольной и поперечной деформаций и остаточное значение деформации становится малым. Это значит, что деформация становится равномерной и ее можно легко учитывать при фотограмметрических работах.

Для определения деформации впечатывают измерительную решетку и сравнивают расстояния между тремя парами точек в продольном и поперечном направлениях на сетке-этalone и негативе.

В настоящее время деформации фотопленок, используемых в картографических целях, исследуются на фабриках по единой методике. Согласно этой методике, деформации пленок определяются путем сравнения размеров эталона с размерами его копии, полученной контактным способом на образце исследуемой фотопленки.

Для характеристики фотопленки вычисляются:

коэффициенты продольной, поперечной и неравномерной систематической деформации,

коэффициенты продольной и поперечной случайных деформаций.

Коэффициенты деформации определяются при относительной влажности воздуха 65 % и температуре +20 °С.

Для учета деформации в съемочных камерах с пневматическим выравниванием предусматривают эталонированные координатные метки, равномерно расположенные по периметру кадра, с помощью которых возможно определить искажение и ввести поправку в координаты точек объектов космического снимка.

Следует отметить, что в космических съемочных камерах применяют механический способ выравнивания пленки — прижим к стеклу. Это дает возможность определить метрическую нестабильность пленки по сетке крестов, нанесенной с высокой точностью на выравнивающее стекло.

Глава VIII

ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

§ 49. РЕШЕНИЕ ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ПРИ КОСМИЧЕСКОЙ ФОТОСЪЕМКЕ

Основная задача космической съемки — получение негативов с высокими измерительными и информационными свойствами — может быть решена при условии максимального учета факторов, влияющих на экспозицию. При отступлениях от оптимальных значений экспозиций происходит ухудшение качества негативов, что ведет к потере мелких и малоконтрастных деталей изображения и снижению резольвометрических характеристик негативов.

Помимо экспонометрической широты пленки L_R величина допустимого отклонения в экспозиции определяется условиями фотохимической обработки и специальными требованиями, предъявляемыми к качеству космических снимков.

На величину и спектральный состав излучения, воздействующего на фотографический слой при экспонировании, влияют различные факторы, от правильности учета которых зависит точность решения экспонометрической задачи.

При определении экспозиции несколько фактов имеют решающее значение. Эти факторы можно назвать переменными. К ним относят изменение освещенности и яркостных характеристик объекта. Освещенность ландшафта зависит от высоты Солнца, наличия облачности и дымки и изменяется в широких пределах.

Спектральные коэффициенты яркости также имеют большой диапазон, величины их непостоянны.

Влияние ошибок экспонирования в ряде случаев можно ослабить в процессе фотохимической обработки, но это касается в основном, черно-белых пленок, требует применения различных рецептур проявителей и не обеспечивает стабильности результатов. Возможности цветных фотографических процессов несравненно меньше не только из-за малой фотографической широты цветных пленок, но и вследствие разбаланса слоев при отступлениях от оптимального для данной пленки режима обработки.

Экспонетрические методы при выполнении космической съемки можно разделить на три основные категории:

- расчетный метод;
- полуавтоматический метод;
- автоматический метод.

Учет экспонетрических факторов, влияющих на качество фотографического изображения, определяет формула

$$t_3 = \frac{4 K \cdot K_{\Phi_1} \cdot n_0^2}{S \cdot E \cdot K_{\omega} \tau_{a\omega} \left[r_{об} + \bar{r}_n \sigma_k + (1 + \sigma_k) \frac{\sigma'_a}{K_{\Phi_2}} \right]}, \quad (251)$$

где t_3 — эффективная выдержка затвора (с); S — общая светочувствительность фотографического слоя ($\text{лк}^{-1} \cdot \text{с}$); E — освещенность ландшафта (лк); K_{ω} — коэффициент уменьшения освещенности по полю кадра из-за угла поля зрения 2ω ; $\tau_{a\omega}$ — приведенный коэффициент пропускания атмосферы при угле поля зрения аппарата 2ω ; $r_{об}$ — коэффициент яркости объекта, для которого определяется экспозиция; \bar{r}_n — интегральные коэффициенты яркости для снимка; σ_k — коэффициент рассеяния света съёмочной системой; σ'_a — коэффициент задымленности атмосферы для данного фотографического слоя; K_{Φ_2} — вторая кратность светофильтра с учетом спектрального излучения дымки и объекта; K_{Φ_1} — первая кратность светофильтра с учетом спектральной чувствительности пленки; K — коэффициент, зависящий от выбора единицы светочувствительности; n_0 — знаменатель относительного отверстия объектива.

В формуле отражены основные и второстепенные факторы, влияющие на точность решения экспонетрической задачи.

На практике расчет экспозиции по формуле (251) может быть осуществлен только при условии определения многих переменных составляющих. В случае неавтоматического регулирования экспозиции для ускорения расчетов могут быть составлены экспонетрические номограммы, в основу которых положена зависимость

$$t_{3\Phi} = \frac{4 K \cdot K_{\Phi} \cdot n_0^2}{S \cdot E \cdot \bar{r} \cdot K_{\omega} \cdot \tau_a \cdot K_c}, \quad t_{\Phi} = t_{3\Phi} \cdot \eta, \quad (252)$$

где $t_{эф}$ — время работы затвора; $t_{ф}$ — фактическая выдержка; η — коэффициент полезного действия затвора; \bar{r} — средний коэффициент яркости ландшафта; K_c — коэффициент светорассеяния системы.

§ 50. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСПОНИРОВАНИЯ

При полуавтоматическом методе выдержку определяют электронным экспонометром и устанавливают значение t на шкале экспозиции.

В соответствии с освещенностью местности на нагрузке фотоэлемента появляется напряжение, пропорциональное количеству световой энергии в пределах угла поля зрения объектива светоприемника (СП). Напряжение является исходным для решения экспонометрических зависимостей. Усилитель УПТ-1 с помощью набора переключаемых сопротивлений (П1) обрабатывает поступающее со светоприемника напряжение за счет регулируемой обратной связи в зависимости от заданного технологическим заданием относительного отверстия используемого фотоаппарата.

Усиленное напряжение поступает затем на вход второго усилителя УПТ-2 и с помощью переключателя П2 аналогичным образом обрабатывается в соответствии с заданной светочувствительностью пленки. В результате на выходе УПТ-2 получается напряжение, пропорциональное определяемой выдержке.

Индикатором выдержки служит стрелочный прибор, шкала которого соответствующим образом проградуирована. Для расширения динамического диапазона электронного экспонометра напряжение с выхода УПТ-2 поступает на стрелочный указатель через функциональный преобразователь (ФП), собранный по диодной схеме. Дрейф усилителей регулируется с помощью выведенного на лицевую панель прибора сопротивления R_T .

Оптическая схема светоприемника состоит из широкоугольного объектива, конденсатора и фотоэлемента ФЭУ-2. Для выравнивания спектральной чувствительности фотоэлемента используется светофильтр ЖС-12.

Конструктивно электронный экспонометр состоит из двух отдельных блоков: светоприемника СП и блока индикатора БИ. Светоприемник может крепиться или в специальном люке, или непосредственно рядом с КСК.

Автоматические экспонометры позволяют определять и выдерживать экспозицию по среднему значению освещенности и регулировать процесс экспонирования с помощью затвора или диафрагмы (АРЭ — автомат регулирования экспозиции, АДО —

автоматически диафрагмирующееся отверстие). На рис. 55 приведена блок-схема АРЭ.

Принцип работы АРЭ основан на измерении яркости ландшафта в пределах 1:10. Для измерения средней яркости в светоприемном устройстве использован измерительный мост с кадмиевым сопротивлением ΦC_1 . При увеличении яркости в диагонали моста появляется сигнал, который преобразуется в переменный ток, усиливается и подается на управляющую обмотку

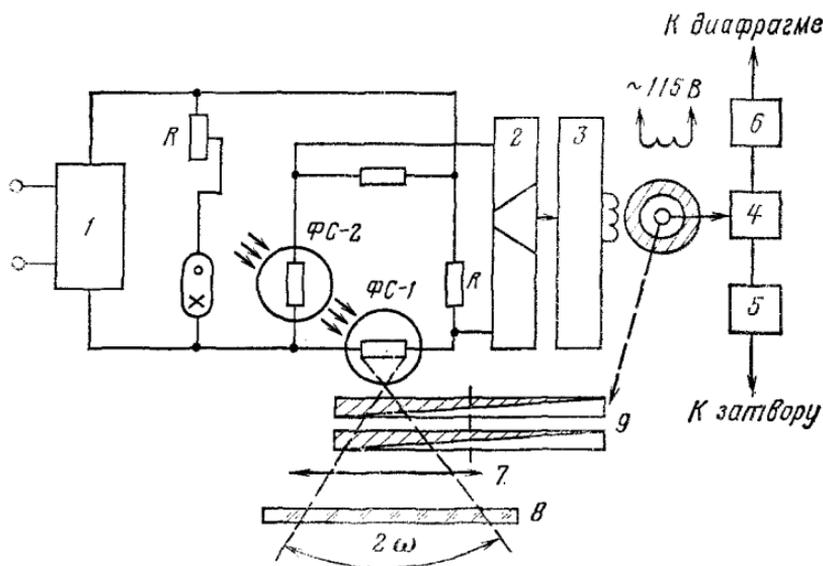


Рис. 55.

1 — стабилизатор напряжения; 2 — усилитель; 3 — преобразователь напряжения; 4 — распределительное устройство; 5 — электромеханизм изменения выдержки; 6 — электро-механизм изменения диафрагм; 7 — объектив; 8 — светофильтр; 9 — компенсационный светофильтр, содержащий оптический клин переменной плотности; $\Phi C-1$ — кадмиевое фотосопротивление; $\Phi C-2$ — кадмиевое фотосопротивление для настройки измерительного моста

двухфазного двигателя переменного тока. Двигатель вращается до тех пор, пока не будет уравновешен световой поток, поступающий на фотосопротивление, и не будет сбалансирован мост.

Применение электронного экспонометра или автомата регулирования экспозиции предусматривает экспонирование космических негативов по средней яркости.

§ 51. ИЗМЕНЕНИЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ

Технологический процесс определения экспозиции характеризуется несколькими параметрами, которые при полете КЛА резко изменяются. Система автоматического регулирования экс-

позиции должна учитывать возникающие возмущения, преобразовывать их в измеряемую величину и передавать на исполнительные органы — затвор или диафрагму.

Регулируемый параметр t (величина выдержки) определяется факторами постоянными для данного полета i_s (светочувствительность), i_k (камера), $i_{кф}$ (фильтр) и переменными j_E (освещенность), j_f (яркость), j_a (атмосфера).

Отклонение постоянных факторов от их номинального значения при автоматическом регулировании экспозиции не учитывается и полностью входит в ошибку m_d , где m_d — лабораторная ошибка определения светочувствительности пленки, коэффициента светопропускания оптической системы.

Величина светочувствительности пленки, определенная до полета космического корабля, по стандартному режиму проявления, может значительно измениться, что повлечет отклонение от величины заданной экспозиции. Введение поправки в величину t может быть произведено только с некоторыми допущениями, на основании всесторонних исследований данного типа пленки, из-за изменения светочувствительности инфракрасных пленок, из-за старения пленки, изменения условий хранения и фотохимической обработки, точности сенситометрического метода.

Изменение факторов j_E , j_f , j_a регистрируется с помощью оптического датчика и в момент пролета КЛА над фотографируемой территорией.

Изменение прямой освещенности $E_{пр}$ происходит из-за изменения высоты Солнца над горизонтом; изменение освещенности рассеянным светом E_p определяется метеорологическими факторами — наличием того или иного типа облачных образований, характером дымки и т. д.

При регулировании экспозиции по средней яркости влияние E_p будет значительным, в связи с чем изменится величина выдержки.

Установлено, что на значительной части космических снимков изображены облачные образования, покрывающие большую территорию.

При метеорологических исследованиях оптимальное экспонирование космических снимков «по облакам» вполне оправдано и желательно, но при этом объекты земной поверхности будут экспонированы с недодержкой и плохо проработаны. Интервал яркости при экспонировании космических снимков со значительными облаками очень большой $u_{сн} = V_{об.л}/V_{земн. об.}$. Объекты земной поверхности с $u_{об} = V_{max}/V_{min}$ будут размещены при этом в нижней части характеристической кривой и будут иметь очень незначительный интервал яркости u .

Таким образом, регулирование экспозиции с учетом средней яркости приведет к ошибкам из-за неправильного учета величины суммарной освещенности.

§ 52. МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭКСПОЗИЦИИ ПО МИНИМАЛЬНОЙ ЯРКОСТИ

Метод регулирования экспозиции по минимальной или заданной яркости имеет большую точность и позволяет выделять те или иные заданные объекты (леса, водные бассейны, степи и др.). При скорости КЛА на околоземной орбите анализ поступающей поверхности, выбор, запоминание заданной яркости должны производиться в очень короткое время.

Анализатор прибора, предназначенный для автоматизации процесса экспонирования снимков, должен осуществлять последовательный или параллельный анализ. Построчное сканирование при помощи одного датчика при последовательном просмотре местности требует некоторого времени, которое значительно сокращается при включении в схему АРЭ нескольких датчиков, анализирующих весь фотографируемый участок одновременно. Практическая реализация последовательного анализа с одним датчиком проще, в результате чего метод получил распространение в конструктивных решениях автоматических приборов для целей навигации и управления фотосъемочной аппаратурой. Рассмотрим особенности применения последовательности анализа в оптическом датчике схемы АРЭ.

§ 53. ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА АРЭ

При определении величины экспозиции по минимальной яркости V_{\min} необходимо применять узкоугольный объектив с расположенным в его фокальной плоскости фотоэлементом.

Наиболее важный параметр оптического датчика — его диаграмма направленности 2ω , в пределах которой возможно измерение V_{\min} , угол визирования $\delta\varphi$ и период сканирования T . Сканирование обеспечивает просмотр площади фотографируемого участка по поперечным относительно линии пути строкам.

При выборе конструктивных параметров оптического датчика необходимо учитывать в основном два фактора — угол визирования вперед φ и величину раствора 2ω (угол поля зрения оптической системы сканирования). Угол визирования φ определяется необходимостью анализа фотографируемой местности до момента экспонирования. При этом, очевидно, величина φ не должна быть меньше угла поля зрения используемой КСК. С другой стороны, в схеме АРЭ должно быть предусмотрено устройство выделения и запоминания минимального сигнала, поступающего с оптического датчика в течение времени перемещения носителя на расстояние, соответствующее в масштабе фотографирования величине кадра снимка.

Величина раствора 2ω оптического датчика определяет средний размер деталей или участков фотографируемой местности в масштабе фотоизображения.

Размеры деталей ландшафта распределяются таким образом, что максимальное их число ограничивается разрешающей способностью оптической системы съемочной камеры и падает примерно по логарифмическому закону с увеличением размеров деталей. Однако ориентироваться на размеры минимальных деталей, соизмеримых с разрешающей способностью системы КСК, нельзя, так как в этом случае придется оперировать с яркостью элементов скапирования на уровне вуали. Более оптимальным является выбор размеров деталей по их средней квадратической величине, исходя из интервала корреляции корреляционной функции для типичных ситуаций ландшафта.

Подобные корреляционные функции в статистическом смысле являются наиболее оптимальной вероятностной характеристикой фотометрической и пространственной структуры фотоизображения применительно к отдельным однородным участкам, которые можно рассматривать как стационарное случайное поле распределения элементарных яркостей по длине кадра. Корреляционная функция стационарного фотоизображения определяет меру связи как между яркостными, так и между пространственными характеристиками исследуемых случайных полей, так как показывает степень убывания этой связи. Корреляционная функция вычисляется по формуле

$$K(r) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^{\infty} \Delta D(x) \Delta D(x+r) dx, \quad (253)$$

где ΔD характеризует отклонение плотностей деталей объекта от среднего значения, L определяет длину реализации, а r — величину смещения двух идентичных точек регистрограммы. Каждая точка функции $K(r)$ есть усредненное произведение плотностей двух участков фотоизображения ландшафта, отстоящих друг от друга на величину r .

При вычислении $K(r)$ необходимо иметь в виду следующие обстоятельства:

длина реализации L ограничена, и поэтому мы можем получить только одну оценку $K(r)$;

при $r \leq 0,05$ $K(r)$ принимает значение дисперсии плотности негатива, т. е. $K(0) = \sigma_D^2$.

при $K(r) = 0$ величина $L = \rho$ соответствует смещению, при котором значения плотностей объекта становятся практически независимыми, и в этом случае мы вправе считать величину ρ средним статистическим радиусом неоднородностей изображения с интервалом корреляции, который в статистическом смысле характеризует средний размер деталей ландшафта.

Поскольку условия определения корреляционной функции связаны с ограниченной длиной реализации L , функция $K(r)$ может и не иметь нулевых точек. Кроме того, сама достоверность значений $K(r)$, как это следует из теории статистических выводов, резко падает при $r > 0,1L$. Поэтому практически необходимо ограничить величины интервала корреляции, исходя из равенства

$$K(\rho) \leq (0,05 + 0,1) K(0).$$

Многочисленные экспериментальные исследования по определению корреляционной функции для характерных типичных ситуаций ландшафта показали, что $K(r)$ путем усреднения в

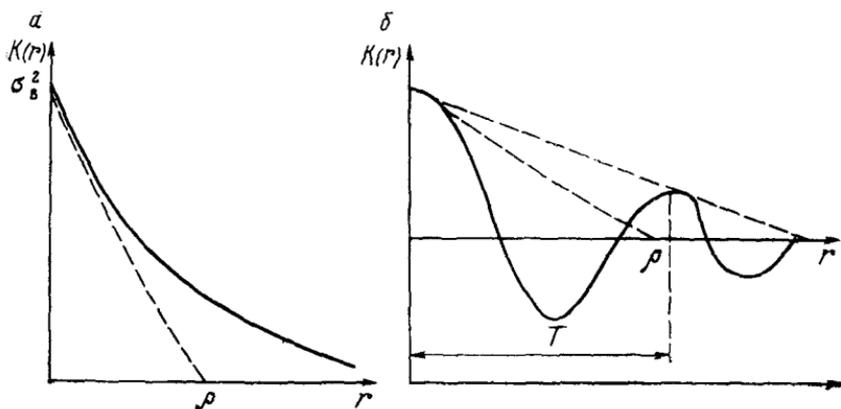


Рис. 56.

множеству оценок может иметь одну из следующих трех зависимостей:

$$K(r) = \sigma_B^2 \cdot e^{-\alpha r} \quad (254)$$

для равнинной малококонтрастной бедной ориентации однородной ситуации,

$$K(r) = \sigma_B^2 \cdot e^{-\alpha^2 r^2} \quad (255)$$

для контрастных, всхолмленных и горных районов,

$$K(r) = \sigma_B^2 \cdot \cos \beta r e^{-\alpha r} \quad (256)$$

для ландшафта, имеющего явно периодическую структуру (пахота, инженерные сооружения и т. д.).

В приведенных формулах $\alpha = 1/\rho$, причем ρ определяется как отрезок на оси r , отсекаемой касательной к функции $K(r)$ в точке $K(0)$ (рис. 56, а).

Аналогично определяется величина ρ для $K(r)$, имеющей вид колебательного процесса (рис. 56, б).

Величина σ_B^2 характеризует дисперсию по яркости для исследуемого ландшафта, а $W = \frac{Lr}{T}$ — периодичность его про-

странственной структуры.

Ориентируясь на приведенные зависимости, можно с достаточной степенью достоверности определить статистическую величину среднего размера объектов $2\rho m$ ландшафта, на которую необходимо ориентироваться при выборе угла зрения $2\delta\varphi$ оптического датчика схемы АРЭ.

Контрастное фотоизображение с большой дисперсией, с широким интервалом плотностей ΔD имеет большую величину ρ . Отсюда логически вытекает, что система АРЭ на принципе минимального контраста полностью оправдывается только при больших величинах σ_D^2 и ΔD . При выборе датчика такой системы необходимо ориентироваться на угол зрения, определяемый зависимостью

$$\delta\varphi = \rho_{\text{ср}}/f \approx 2,5/f. \quad (257)$$

При выносе оптического датчика вперед на угол φ величина f в равенстве должна определяться по формуле

$$f_{\varphi} = f'/\cos\varphi \quad (258)$$

и, следовательно,

$$\delta\varphi = \rho \cos^2\varphi/f'. \quad (259)$$

Выбранная величина $2\delta\varphi$ определяет скорость построчного сканирования, которая должна обеспечить непрерывность анализа фотографируемой местности по направлению полета. Ширина сканирования полосы пропорциональна высоте полета H и величине $2\delta\varphi$. Поэтому для обеспечения непрерывности анализа скорость сканирования необходимо регулировать прямо пропорционально скорости полета W и обратно пропорционально произведению $H \cdot 2\delta\varphi$, т. е. скорость сканирования будет равна

$$n = W/2 H \delta\varphi. \quad (260)$$

Как следует из полученного равенства, скорость сканирования в системах АРЭ, работающих на принципе минимального контраста, необходимо регулировать пропорционально отношению W/H . Учитывая, что современные носители оборудованы измерителями отношения W/H , реализация схемы сканирования АРЭ, вытекающая из равенства (260), не вызывает принципиальных затруднений. Кроме того, величину можно задавать в виде постоянной константы, но меньше, чем это следует из равенства

$$n_{\text{max}} = W_{\text{max}}/2 H_{\text{min}} \delta\varphi,$$

где W_{max} и H_{min} — соответственно максимальная скорость полета и минимальная высота фотографирования. Значение n_{max}

задает минимально допустимую полосу пропускания F_{\min} системы анализа и выбора B_{\min} схемы АРЭ. Величина F_{\min} определяет число элементов сканирования, подлежащих анализу в единицу времени. Полосу пропускания системы анализа можно определить, если задан угол поля зрения 2φ оптической системы КСК:

$$F_{\min} = \frac{\varphi}{\delta\varphi} n_{\max}. \quad (2)$$

Величина F_{\min} должна быть согласована с постоянной времени T_{ϕ} используемого в оптическом датчике схемы АРЭ фотоэлемента. При этом должно выполняться условие $T_{\phi} < 1/F_{\max}$. Если значение $1/F_{\max}$ приближается к T_{ϕ} или меньше этого значения требование поэлементного сканирования не может быть удовлетворено полностью.

При использовании схемы сканирования АРЭ в контакте с широкоугольными космическими съёмочными камерами необходимо использовать оптические датчики с величинами углов зрения порядка одного градуса, что приводит к необходимости повышенной угловой стабилизации этих датчиков, повышает требования к частотным характеристикам электрических элементов датчика и вызывает ряд других неудобств.

§ 54. УЧЕТ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЭКСПОНОМЕТРИЧЕСКИХ РАСЧЕТАХ

При решении экспонетрической задачи значительные ошибки могут возникнуть из-за несоответствия спектральных зон фотографирования и чувствительности фотоэлектрического датчика экспонетра.

Изменение спектральной интенсивности излучения Солнца на границе земной атмосферы достигает 8—15%. Изменение спектрального состава, достигающего земной поверхности, из-за воздействия различных естественных факторов более значительно.

Спектральная освещенность E_{λ} зависит от спектрального коэффициента пропускания атмосферы $\tau_{a\lambda}$:

$$E_{\lambda} = E_{a\lambda} \cdot \lambda_{a\lambda}, \quad (262)$$

где $E_{a\lambda}$ — спектральная освещенность у границы земной атмосферы.

Спектральный состав отраженного излучения изменяется в широких пределах и достигает наибольшей величины при переходе от видимой зоны к инфракрасной.

Спектральный коэффициент яркости \bar{r}_{λ} зависит от состояния поверхности объектов, угла падения лучей, угла визирования и азимута наблюдений.

Значительное влияние на интенсивность и спектральный состав потока излучения в направлении объектива оказывает

воздушная дымка. С учетом спектральной яркости дымки $B_{д\lambda}$ и спектрального коэффициента пропускания промежуточной атмосферы τ_{\max} (слоя атмосферы между объективом и земной поверхностью) спектральную яркость потока B можно записать

$$\bar{B}_{\lambda} = E_{a\lambda} \tau_{a\lambda} \frac{\bar{r}_{\lambda}}{\pi} \tau_{па\lambda} + B_{д\lambda}. \quad (263)$$

Принимая во внимание спектральный коэффициент пропускания светофильтра K и оптической системы КСК $K_{\beta\lambda}$, монохроматическую облученность фотослоя I'_{λ} можно определить по формуле

$$I'_{\lambda} = \frac{1}{4} \pi \left(E_{a\lambda} \tau_{a\lambda} \frac{r_{\lambda}}{\pi} \tau_{па\lambda} + B_{д\lambda} \right) K_{\lambda} K_{a\lambda} \frac{1}{n_0} \cos^2 \omega, \quad (264)$$

где n_0 — знаменатель относительного отверстия; ω — половина угла поля зрения КСК.

Полный фотоактиничный поток определяют по формуле

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_n} I_{\lambda} S_{\lambda} d\lambda, \quad (265)$$

где S_{λ} — спектральная чувствительность пленки; λ_1 и λ_n — границы спектральной зоны фотографирования.

Априорное определение полного фотоактиничного потока и актиничной экспозиции

$$H_A = A \cdot t, \quad (266)$$

где t — время экспозиции, затруднительно, поскольку необходимо учитывать пять зависимых от длины волны переменных величин. Поэтому при использовании фотоэлектрического метода не будет соблюдаться однозначность соответствия между фотоактиничным потоком и показанием экспонометра, если спектральная зона фотографирования не соответствует спектральной зоне чувствительности фотоприемника. Осуществление корреляции в виде поправочного коэффициента в показании экспонометра возможно лишь для определенных объектов большой протяженности с известными спектральными характеристиками. Наиболее достоверный способ учета спектральных характеристик информационного канала заключается в применении фотоприемного устройства со спектральной чувствительностью, подобной спектральной чувствительности пленки. Это необходимо, например, для космической фотосъемки в ультрафиолетовых, инфракрасных лучах, при съемке на спектральные материалы. Степень подобия спектральных характеристик фотоприемника и пленки должна быть тем выше, чем больше градиенты зависимых от длины волны величин в зоне фотографирования.

Оптимальными приемниками излучения для целей экспонометрии являются кремниевые фотоприемники с $p-n$ переходом, поскольку они обладают чувствительностью в ближней ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной зонах излучения в диапазоне от 0,3 до 1,2 мкм, т. е. чувствительны во всем применяемом для космической фотосъемки диапазоне излучения, стабильны и надежны в работе, обладают малой инерционностью, отсутствием явления утомляемости.

Таким образом, при создании автоматических регулирующих систем необходимо строго учитывать спектральные характеристики информационного канала и приемника экспонометрического устройства. Системы автоматического регулирования экспозиции, работающие по минимальной, средней или максимальной яркости, должны обладать малой инерционностью и определять экспозицию с некоторым опережением из-за больших скоростей носителя космической съемочной аппаратуры и большой площади захвата.

Глава IX

ФОТОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

§ 55. ПРОЦЕСС ПРОЯВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Информационная емкость космических снимков во многом зависит от двух процессов — экспонирования и проявления материалов съемки. Методика фотохимической обработки космических негативов должна предусматривать получение оптимальных характеристик, определяющих качество фотографического изображения. С достаточной точностью процессы проявления могут характеризовать количественные методы оценки фотографического качества. К количественным методам оценки качества фотографического изображения можно отнести: сенситорезольвометрические показатели; способ оценки по порочным кривым; функция передачи модуляции (ФПМ) съемочной системы; информационный критерий по энтропии; корреляционный метод.

Оценка качества по указанным критериям позволяет выбрать наиболее рациональную схему технологического негативного процесса.

Процесс фотохимической обработки космических негативов должен обеспечивать:

максимальную информационную емкость фотографического изображения;

заданные сенсорезольвометрические показатели;
 стабильность сенситометрических показателей для однородных ландшафтных зон;
 проработку деталей в свете и тених;
 равномерность проявления по всему негативу;
 длительную сохранность космических съёмочных материалов;
 наименьшую деформацию;
 целесообразную оперативность обработки.

Процесс проявления — сложная гетерогенная реакция, которая зависит от скорости и продолжительности проявления, концентрации проявляющего вещества, влияния входящих в растворы компонентов. Скорость проявления может характеризоваться уравнением, определяющим зависимость выхода оптической плотности D от времени проявления t :

$$dD/dt = K(D_{\infty} - D), \quad (267)$$

где D — оптическая плотность проявленного изображения; D_{∞} — предельная оптическая плотность, когда все эмульсионные зерна, получившие освещение, проявлены; K — константа проявления.

После преобразований формула примет вид

$$D = D_{\infty} (1 - e^{-Kt}). \quad (268)$$

На основании исследований было подтверждено что изменение плотности со временем подчиняется уравнению (268).

Одним из критериев, определяющих процесс проявления, является коэффициент контрастности пленки γ . Известно, что между оптической плотностью D и γ существует прямая пропорциональная зависимость, если плотности лежат на прямолинейном участке характеристической кривой,

$$\gamma = \gamma_{\infty} (1 - e^{-Kt}). \quad (269)$$

Формулы (268) и (269) дают основные соотношения между скоростью проявления, оптической плотностью, коэффициентом контрастности и продолжительностью проявления.

Проявители по составу делят на медленно работающие (малоконтрастные мелкозернистые проявители), нормальные (средней контрастности) и быстрые (контрастные). Проявление начинается с поверхности и с течением времени распространяется в глубину. От состава проявителя в значительной степени зависит распределение проявленных кристаллов в эмульсионном слое. Изменение коэффициента контрастности γ приводит к изменению резольвометрической широты, изменению информативности негатива. В зависимости от величины γ происходит изменение отношения контраста фотографического изображения объекта на негативе $K_{п.з}$ к контрасту этого объекта на

местности K_m . Контраст фотографического изображения объекта $K_{пл}$ определяется зависимостью

$$K_{пл} = 1 - \left(\frac{H_{\max}}{H_{\min}} \right)^\gamma, \quad (270)$$

где H_{\max} , H_{\min} — максимальная и минимальная экспозиции для объектов.

С некоторыми приближениями можно считать, что

$$K_{пл} = 1 - \left(\frac{B_{\max}}{B_{\min}} \right)^\gamma. \quad (271)$$

Контраст объекта на местности

$$K_m = 1 - \frac{B_{\max}}{B_{\min}}. \quad (272)$$

Следовательно, при $\gamma=1$ контраст $K_{пл}=K_m$, при $\gamma>1$ контраст фотографического изображения объекта на пленке будет больше контраста объекта на местности. Но увеличение γ приведет к снижению резольвметрической широты L_R . Для проявления черно-белых материалов космической съемки применяют разнообразные негативные проявители. При химическом проявлении серебро, составляющее изображение, получается за счет восстановления проявителем экспонированного галоидного серебра эмульсионного слоя. Главные составные части проявителя определяют его свойства, скорость проявления, энергетику проявления и др. В состав проявителя входят: проявляющее вещество, необходимое для процесса проявления; ускоряющее вещество, от свойств которого зависит скорость проявления; сохраняющее вещество, препятствующее окислению проявителя в процессе обработки; противовуалирующее вещество; разные добавки.

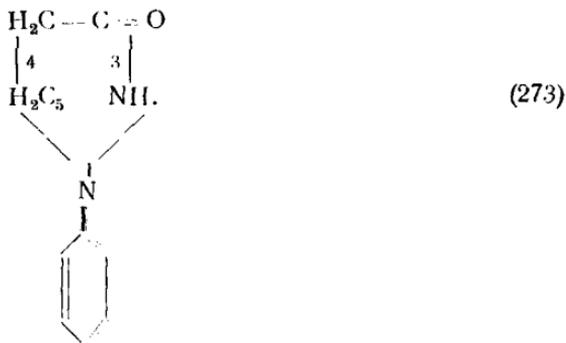
Проявляющие вещества подразделяют на органические и неорганические. В практике проявления материалов аэрокосмических съемок пользуются органическими проявляющими веществами, которые обладают способностями в водном растворе проявлять скрытое изображение. Широкое применение получили некоторые производные бензола.

В молекуле бензола активная группа должна находиться или в орто-положении, или в пара-положении.

Примерами проявляющих веществ с двумя активными группами служат гидрохинон, метол, глицин, парааминофенол, парафенилендиамин, с тремя активными группами — амидол, пирогаллол.

За последние годы синтезировано большое количество проявляющих веществ, но широкое применение нашел лишь 1-фенил-3-пиразолидон или фенидон и его производные, как высокоэффективные заместители метолгидрохиноновых проявителей.

Название «фенидон» получено из начальных и конечных букв химического названия соединения



Следует сказать, что проявители с одним фенидоном имеют небольшую проявляющую способность и сильно вуализуют. Поэтому применяют сочетание двух проявляющих веществ: гидрохинона и фенидона. В процессе проявления фенидонгидрохиноновым проявителем фенидон участвует в реакции восстановления серебра и окисляется. Продукт окисления фенидона регенерируется гидрохиноном, находящимся в проявителе. При этом сам гидрохинон также окисляется и создает сульфат гидрохинона. Можно считать, что фенидон является как бы катализатором проявления и содержание его в растворе не уменьшается. Фенидон активизирует проявление и повышает уровень светочувствительности проявляемого материала, уменьшает депрессирующее действие на процесс проявления бромидов. Способность повышать скорость проявления в сочетании с другим проявляющим веществом, так называемая суперрадикативность вещества, фенидонгидрохиноновых проявителей сильно зависит от содержания в них сульфита, при его отсутствии суперрадикативность исчезает при $\text{pH}=8,70$. Ускоряющее вещество способствует более быстрому протеканию реакции, что зависит от его концентрации в проявителе и свойств самого проявляющего вещества. Для этого применяют едкие и углекислые щелочи (едкое кали KOH , едкий натр NaOH , углекислый натрий Na_2CO_3 , углекислый калий K_2CO_3 , буру $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \times 10\text{H}_2\text{O}$).

Щелочь, при ее введении в состав проявителя должна поддерживать постоянную концентрацию ионов $(\text{OH})^-$. Этим будет обеспечена достаточная концентрация активных ионов гидрохинона, т. е. постоянная скорость проявления.

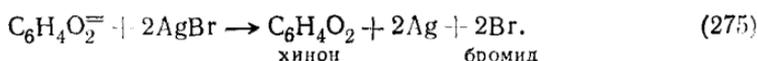
Известно, что степень кислотности или щелочности раствора характеризует концентрация водородных ионов pH . Для нейтральных растворов $\text{pH}=7$, для кислых $\text{pH}<7$, для щелочных $\text{pH}>7$. С увеличением pH возрастает скорость проявления данным проявителем. Скорость проявления не зависит от природы щелочи, а только от величины pH .

Сохраняющие вещества вводят в проявитель для предохранения проявляющего вещества от окисления кислородом воздуха. Его количество зависит от концентрации проявляющего вещества и суперодитивных свойств проявителя.

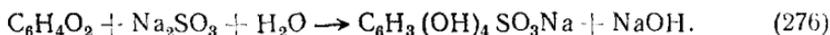
Проявители, в которых нет или недостаточно сохраняющего вещества, быстро окисляются, темнеют и теряют свою проявляющую способность. Для этих целей применяют сульфит натрия, иногда бисульфит натрия. Роль щелочи и сульфита в процессе проявления можно рассмотреть на примере проявления гидрохиноновым проявителем. При составлении проявителя происходит образование активного иона гидрохинона



При восстановлении галоидного серебра происходит реакция

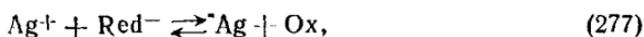


Образовавшийся хинон будет связан сульфитом натрия, находящимся в растворе,



Сульфит, связывая хинон, играет роль сохраняющего вещества. Кроме того, он участвует в восстановлении галоидного серебра.

Но роль сульфита в процессе проявления более сложна. Согласно электрохимической теории проявления сульфит играет важную роль как вещество, поддерживающее определенную концентрацию окисленной формы проявляющего вещества при проявлении:



где Ag^+ — галоидное серебро; Red^- — проявляющее вещество; Ag — металлическое серебро; Ox — окислительная форма проявляющего вещества.

В различных проявителях содержание сульфита доходит от десятых грамма до нескольких десятков граммов. В мелкозернистые проявители вводят большое количество сульфита, так как он растворяет микрокристаллы галогенидов серебра, из-за чего получается более мелкозернистое изображение.

В качестве противовуалирующего вещества применяют бромистый калий и бензотриазол. Действие бромистого калия основано на том, что он изменяет растворимость галоидного серебра. Противовуалирующие вещества изменяют скорость проявления, контрастность и светочувствительность фотографических материалов.

Бензотриазол — органическое вещество, обладает повышен-

ной противосульфидной способностью, что требует строгого учета его применения, так как излишнее его количество может привести к значительному уменьшению светочувствительности эмульсионного слоя.

В проявитель добавляют также различные компоненты, определяющие его специфические свойства: дубящие вещества, смачиватели, умягчители воды, десенсибилизаторы, растворители галоидного серебра.

Дубящие вещества вводят в состав проявителя для увеличения температурной устойчивости и механической прочности эмульсионного слоя. При фотохимической обработке негативов в дубящих проявителях уменьшается набухание эмульсионного слоя. Наиболее часто дубящие вещества, например формалин, вводят в состав проявителя, но возможно также фиксирование в дубящих фиксажах или применение дубящей ванны перед проявлением. Для этой цели применяют также хромовокалиевые и алюмокалиевые квасцы.

Введение в раствор смачивателей — поверхностно-активных веществ создает условие равномерного проявления фильмов, что особенно следует учитывать при фотохимической обработке тонкослойных материалов. В качестве смачивателей применяют полиокс-100.

Для понижения светочувствительности эмульсионного слоя к определенной зоне спектра при визуальном контроле процесса проявления с использованием лабораторного освещения применяют десенсибилизаторы: пинакринтол желтый, зеленый, ауранций, деноксан. Для этого вводят дополнительную ванну перед проявлением или вводят десенсибилизатор в раствор проявителя.

Для фотохимической обработки аэрокосмических материалов съемки применяют различные рецептуры проявителей, обеспечивающие оптимальные результаты. Можно классифицировать проявители по материалам, для которых они предназначены: для проявления негативной пленки — негативные, для позитивной — позитивные, проявители для фотобумаг и т. д. Классифицируют проявители по скорости проявления: медленно работающие, нормальные, быстрые. Можно также выделить специфические особенности проявляющих растворов: мелкозернистые, выравнивающие, двухрастворные, тропические, дубящие и т. д. В справочниках опубликовано большое количество рецептов проявителей, причем разработка новых рецептов не уменьшается, так как разрабатываются новые проявляющие вещества, исследуется влияние различных компонентов и добавок на процесс проявления. Но следует отметить, что подавляющее число новых рецептов с содержанием различных проявляющих веществ разрабатывается в основном эмпирическим методом, при условии решения отдельных конкретных задач. Это объясняется тем, что пока еще нет такой общей теории

проявления, которая была бы в состоянии объяснить многие вопросы практики проявления сложностью процесса проявления и разными теориями о механизме протекающих реакций.

Наиболее разработанной и полной является сейчас электрохимическая теория проявления, которая дополнена в последнее время исследованиями каталитического действия на процесс получения веществ, обладающих электронной проводимостью. Механизм проявления должен объяснять основную особенность более активного проявления экспонированного галогенного серебра сравнительно с неэкспонированным, т. е. избирательность проявителя. Степень избирательного действия проявителя u определяется скоростью проявления вуали v_B и скоростью появления изображения v_H

$$u = v_H/v_B. \quad (278)$$

Кроме того, проявитель характеризует также постоянство полученных заданных сенситометрических характеристик, скорость проявления, индукционный период — время от момента погружения эмульсионного слоя в проявитель до появления следов изображения. В фотографической практике существует определение проявителей малоконтрастных, нормальных и контрастных. Но это деление неточно характеризует свойства проявителей, так как один и тот же контраст может быть получен разными проявителями за различное время. Поэтому основной характеристикой проявителя считают время проявления (быстрые, медленные) и качество полученного изображения (мелкозернистые и т. д.).

Существует мнение, что мелкозернистые проявители позволяют увеличить L_D и получить при этом высокую разрешающую способность R^{-1} мм. По исследованиям мелкозернистые проявители не дают увеличения R^{-1} мм, а, напротив, могут снижать ее. Для достижения необходимой γ проявление ведется длительное время, светочувствительность низкая, даже при очень длительном проявлении. В конце проявления начинают расти плотности из-за образования вуали. Но в начале проявления разрешающая способность R^{-1} мм возрастает с возрастанием времени проявления до некоторого значения, а затем увеличение вуали начинает снижать R^{-1} мм.

Изменения разрешающей способности обусловлены как процессом построения фотографического изображения на эмульсионном слое пленки, так и процессом фотохимической обработки. На пленку действует точечный световой сигнал, в фотографическом изображении получается пятно конечных размеров. Искажения обусловлены оптической и химической диффузиями.

Явление химической диффузии приводит к изменению распределения оптических плотностей на различно экспонированных участках негатива.

Пространственно-частотная характеристика пленки для стадии фотохимического процесса может быть найдена экспериментально:

$$T_{\text{пр}}(N_x) = 1 + CN^2 + BN^4, \quad (279)$$

где $T_{\text{пр}}$ — одномерная нормированная передаточная характеристика пленки при влиянии химической диффузии; N — пространственная частота, мм^{-1} ; C , B — коэффициенты, полученные экспериментально.

При обработке материалов космической съемки следует обратить особенно большое внимание на строгое выполнение требований фотохимической обработки и особенно тщательно производить перемешивание растворов и ослабить эффекты смежных мест. Это явление зависит от близкого расположения отдельных частей фотографического изображения объектов и связано с процессом проявления. Воспроизведение мелких объектов ухудшается из-за того, что истощенный проявитель от участков пленки, получивших большую экспозицию, диффундирует к слабо экспонированным участкам, а концентрированный проявитель — в противоположном направлении. Встречная диффузия свежего проявителя из малоэкспонированных мест,

Т а б л и ц а 7

Компоненты	Тип проявителя									
	УП-2	УП-3	УП-1	АСП-3 м	АСП-20	АСП-1	Н-1	ФГМ-1	ФГВ-1	УП-4
Количество вещества г/на 1 л раствора										
Фенидон		0,5						0,8	1,0	
Метол	5,0		5,0	5,0	5,0	2,0	8,0	3,0		5,0
Гидрохинон	6,0	12,0	3,0	6,0	6,0	10,0		25,0	25,0	6,0
Углекислый натрий	31,0	60,0	16,0	31,0	31,0	40,0	6,0			31,0
Сульфит натрия б/в	40,0	50,0	80,0	50,0	50,0	52,0	130,0	50,0	50,0	50,0
Калий бромистый	4,0	2,0	3,5	2,0	2,0	2,5				4,0
Бензотриазол		0,5		0,1	0,1			1,0	2,0	0,2
Едкий натрий СТ-47								22,0	20,0	
Пиросульфит натрия			2,0					0,05	0,03	
Алюмокалиевые квасцы					1,0			16,0	20,0	
Полиокс 100		1,0		1,0	0,5			1,0		1,0
Смачиватель СВ-1017	0,5									
Умягчитель воды М-23										2,0
Метилфенидон										0,7

так же как и уход части бромистого калия из пограничных частей изображения с большой плотностью, вызовет в них усиление проявления и поэтому увеличение плотности. Эффект смежных мест вызывает усиление средних пространственных частот изображения. Интенсивность действия этого эффекта существенно зависит от состава проявителя и особенностей обработки пленки.

В табл. 7 приведена рецептура основных проявляющих растворов.

Двухрастворный процесс предусматривает применение мелкозернистых и контрастных проявителей. При проявлении в мелкозернистом проявителе в начальный период происходит нарастание разрешающей способности. Действие химической диффузии также меньше у этих проявителей. Для того чтобы получить необходимый резольвометрический интервал, проявление продолжают в более энергичном проявителе. Это дает возможность учесть особенности ландшафта Земли и Луны и получить оптимальное качество космических снимков. При фотохимической обработке материалов космической съемки Луны с АМС «Зонд-8» был применен метод двухрастворного проявления. Лунная поверхность — сочетание резко выраженных яркостных совокупностей — малоконтрастных объектов космической съемки Земли — пустыню, и особо контрастных, напоминающих горную заснеженную местность.

При съемке пустынной местности в земных условиях применяют контрастные материалы и проявляют до больших значений γ для получения достаточных приращений оптической плотности

$$\Delta D = \Delta \lg (H_2 - H_1) \gamma; \quad \Delta D = \Delta \lg H \cdot \gamma. \quad (280)$$

Съемку горных районов выполняют на малоконтрастные материалы, проявляют до γ не более 1.

Рекомендованный метод фотохимической обработки позволил в начальный период проявления мелкозернистым проявителем получить оптимальную величину разрешающей способности, обеспечить проработку слабо экспонированных объектов и несколько затормозить процесс проявления ярко освещенных объектов. Медленно работающий проявитель позволял оценить правильность экспонирования данного кадра и определить длительность процесса проявления в каждой ванне с помощью прибора ЭОП. Проявление во втором, более энергичном проявителе обеспечивало увеличение γ и светочувствительности S_d , при этом не происходило большого нарастания оптических плотностей.

Двухрастворное проявление увеличивает L_R и улучшает условия дешифрирования черно-белых космических негативов.

Пленки, полученные при выполнении космических экспериментов, проявляют через некоторое время после экспонирова-

ния. При продолжительном хранении экспонированного слоя может происходить регрессия скрытого изображения — существенное его ослабление. Особенно сильно уменьшаются малые плотности.

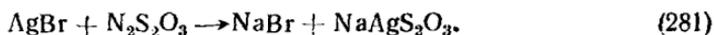
Чтобы ослабить это влияние, также необходимо применить более энергичное проявление. Правильность выбранной методики фотохимической обработки материалов космической съемки Луны и Земли подтверждена высокими измерительными и изобразительными свойствами снимков.

Фиксирование фотопленок, полученных при космической съемке, выполняют после процесса проявления и промывки. К растворам для фиксирования предъявляют требования, обеспечивающие полное растворение галоидного серебра, оставшегося в эмульсионном слое после проявления, быстроту протекающей реакции, сохранение полученных значений оптической плотности.

Процесс фиксирования производится раствором, содержащим тиосульфат натрия $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ и разные добавки.

Различают фиксажи простые, кислые, дубящие, быстрые. Применение для фиксирования простых фиксажей, содержащих только тиосульфат натрия, нецелесообразно. Процесс проявления в эмульсионном слое при перенесении его в фиксаж не прекращается. В случае применения кислых фиксажей этого не происходит, так как проявляющее вещество превращается в легко растворимые соли. Дубящие фиксажи содержат кислые соли и дубящие вещества для дубления эмульсионного слоя при обработке в условиях повышенной температуры. В быстрых фиксажах применяют для ускорения процесса фиксирования хлористый аммоний, который частично переходит в тиосульфат аммония. Тиосульфат аммония является прекрасным фиксирующим средством, в связи с чем процесс фиксирования сокращается. Скорость фиксирования обуславливается свойствами эмульсионного слоя, концентрацией тиосульфата, температурой раствора, влиянием других составляющих, вводимых в фиксаж, перемешиванием раствора, степенью истощения фиксажа и т. д.

Фиксирование протекает в две стадии:



В результате действия тиосульфата натрия на бромистое серебро образуются комплексные соли различного состава. При реакции эмульсионный слой делается прозрачным, но процесс фиксирования нельзя считать на этом законченным. Образовавшаяся соль NaAgS_2O_3 плохо растворяется в воде. При второй стадии фиксирования в результате действия тиосульфата натрия на образующуюся соль происходит образование комплексных солей более сложного состава, легко растворимых в воде. Для того чтобы удалить накопившиеся в растворе комплекс-

Компоненты	Тип фиксажа				
	БКФ-2	КДФ-2	БКФ-7	Кинап	Стабилизатор
	Количество веществ в граммах в 1 л раствора				
Гипосульфит б/в	165	192	220	234	—
Хлористый аммоний	50	—	10	—	—
Лимонная кислота	—	5	—	—	—
Пиросульфит натрия	17	—	2	—	—
Уксусная кислота	—	16	—	—	—
Алюмокалиевые квасцы	—	15	—	—	—
Борная кислота	—	8	—	—	—
Тиомочевина	—	—	—	—	32
Серная кислота	—	—	—	4,7 см ³	10
Сульфит натрия кристалл	—	—	—	22,5	—

ные серебряные соли и бромистый натрий, пленку промывают. Основные характеристики и типы фиксажей приведены в табл. 8.

Продолжительность промывки определяется условиями, от которых зависит остаточное количество тиосульфата натрия в эмульсионных слоях. Материалы космических съемок предназначены для длительного хранения, поэтому количество оставшегося тиосульфата натрия не должно превышать 0,015 мг/см².

§ 56. ПРОЯВЛЕНИЕ ЦВЕТНЫХ НЕГАТИВОВ

Зависимости, которые характеризуют проявление черно-белых негативов, не могут быть перенесены на процесс обработки материалов цветной съемки. Учитывая, что для обеспечения цветного баланса между отдельными слоями цветной пленки коэффициент контрастности может изменяться на незначительную величину, необходимо строго выдерживать заданный температурный режим и время проявления. Загрязнение растворов, их истощение также приводят к получению неудовлетворительного качества цветного изображения. Отдельные отрицательные результаты, полученные в некоторых организациях при выполнении съемок на цветных материалах, объясняются не качеством цветного изображения, а неточностью выполнения технологического процесса.

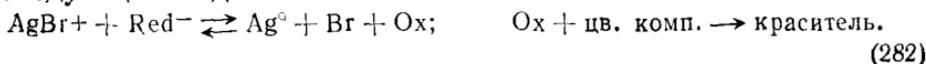
При анализе существующих режимов фотохимической обработки материалов космической фотосъемки необходимо выполнить основное условие — максимально разделить по цвету сверхмелкос изображение объектов земной или лунной поверхности.

На качество цветного негатива влияют многие факторы: точность выдерживания температурного и временного режима проявления, истощение и загрязнение растворов, тип прояви-

тельного прибора, действие различных компонентов растворов и т. д.

Основой фотохимической обработки цветного материала служит то, что серебро изображения, полученное фотографическим путем, заменяют на окрашенные вещества, плотности которых пропорциональны плотности металлического серебра.

Цветное проявление представляет собой процесс химического проявления скрытого фотографического изображения, когда образование изображения из восстановленного серебра сопровождается совместным образованием окрашенных продуктов — красителей. После удаления металлического серебра из фотографического слоя остается изображение из окрашенных продуктов. Реакцию цветного проявления можно записать в следующем виде:



Условия проявления определяют степень фотографической плотности и контрастности отдельных изображений из красителей. Фотохимическую обработку цветных негативов выполняют по следующему режиму: проявление, останавливающая ванна, фиксирование, отбеливание, промывка.

Кратко рассмотрим роль каждого процесса обработки цветного негатива и его влияние на качество.

Цветной проявитель состоит из следующих компонентов: проявляющее вещество, ускоряющее вещество, консервирующее вещество, противовуалирующее вещество, вода.

К проявляющим веществам предъявляют ряд общих требований:

проявляющее вещество должно быть достаточно энергичным;

не восстанавливать неэкспонированные кристаллы галоидного серебра и создавать, таким образом, вуали;

сохранять длительное время проявляющую активность;

быть растворимым в воде как в присутствии сульфита, так и щелочи;

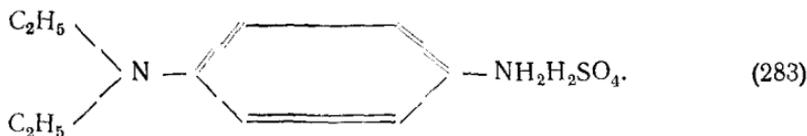
не изменять резко свои свойства при изменении температуры проявления.

В качестве проявляющего вещества применяют производные бензола.

1. *NN* — диэтил-*n*-фенилендиаминсульфат (в форме сернокислой и солянокислой соли).

2. *N*-этил-*N*-β-оксиэтил-*n*-фенилендиаминсульфат.

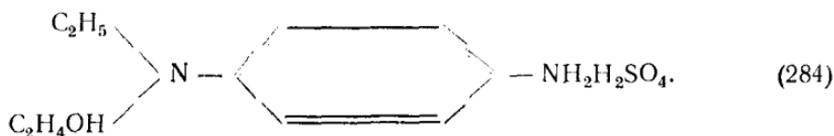
Диэтил-*n*-фенилендиаминсульфат



Диэтил-*n*-фенилендиаминсульфат является очень активным проявляющим веществом, работа с ним требует особой осторожности, так как он обладает значительным раздражающим действием на кожу рук и слизистой оболочки.

Для обработки цветных негативов диэтил-*n*-фенилендиаминсульфат из-за его токсичности применяют только при условии обработки в автоматических приборах или заменяют его *N*-этил-*N*-β-оксиэтил-*n*-фенилендиаминсульфатом.

N-этил-*N*-β-оксиэтил-*n*-фенилендиаминсульфат



Он обладает меньшей проявляющей активностью, чем диэтил-*n*-фенилендиаминсульфат, однако его большим преимуществом является значительно меньшее раздражающее действие на кожу. Он представляет мелкие кристаллы от серого до коричневого цвета, легко растворимые в воде. Щелочные водные растворы легко окисляются на воздухе.

В качестве ускоряющего вещества в цветном проявителе служит щелочь, которая создает и поддерживает в проявителе необходимую концентрацию водородных ионов рН-раствора. С ростом рН-раствора повышается концентрация активной формы проявляющего вещества. Проявляющее вещество *N*₁*N*-диэтил-*n*-фенилендиаминсульфат весьма слабо растворяется в воде и при прибавлении щелочи к его концентрированным растворам выделяется маслянистая жидкость, поэтому щелочь надо добавлять только к разбавленным растворам.

При изменении рН проявителя плотность образования красителя возрастает линейно с ростом рН.

Нарушение пропорциональности между плотностью цветного изображения и количеством проявленного серебра приводит к ухудшению изображения, поэтому применять при цветном проявлении проявителя с высоким или низким рН нежелательно. Необходимо поддерживать в процессе проявления необходимую величину рН для обеспечения качества цветных негативов.

В качестве консервирующего вещества в проявляющем растворе применяют сульфит натрия и гидроксилламин. Эти вещества служат для предотвращения быстрого окисления проявителей, сильно снижают скорость окисления проявителя кислородом воздуха.

Характер реакции совместного окисления проявляющего вещества и сульфита натрия зависит от относительной скорости окисления каждого из двух веществ. С истощением сульфита в растворе скорость окисления проявляющего вещества резко увеличивается.

Весьма существенным является то, что образующиеся при окислении соединения диэтил-*n*-фенилендиаминсульфокислоты при рН цветного проявителя проявляющей способностью не обладает.

Избыток сульфита натрия в проявителе может отрицательно сказаться при цветном проявлении негативов, поэтому его необходимо вводить в раствор в минимальных количествах. Роль сульфита сводится к замедлению процесса окисления. Если в проявляющий раствор ввести гидроксиламины, то он обеспечивает защиту проявляющего вещества от окисления кислородом воздуха.

Противовуалирующие вещества вводят в цветной проявитель для снижения степени ионизации бромистого серебра, вследствие чего тормозится проявление.

Наряду с бромистым калием для устранения вуали цветных негативных пленок применяют бензотриазол. Но концентрация его для цветных проявителей невелика из-за сильного снижения светочувствительности и не должна превышать 10 миллилитров на литр 3 %-ного раствора бензотриазола.

В цветном фотохимическом процессе, получившем название «ускоренный» и широко применяемом при обработке аэрофильмов, после проявления применяют останавливающую ванну. Назначение этого процесса — прекратить процесс проявления и превратить проявляющее вещество в легко растворимые соединения.

После проявления цветного изображения в эмульсионных слоях остается галоидное серебро, не подвергавшееся экспонированию.

В процессе фиксации нерастворимое галоидное серебро превращается в растворимые соединения, которые затем удаляются из слоя при промывке водой. К веществам, применяемым для фиксации цветного изображения, предъявляют несколько требований: раствор галоидного серебра должен разрушать или обесцвечивать цветные красители, образовавшиеся при фиксации соединения должны быть легко растворимы в воде, фиксирующие вещества не должны вызывать сильного набухания и размягчения желатины.

Фиксирующие растворы содержат тиосульфат, сульфит натрия, который препятствует окислению проявителя, оставшегося в эмульсионных слоях, и кислоту, чтобы нейтрализовать щелочь проявителя. Кислые фиксажи содержат растворитель галоидного серебра, вещества, препятствующие окрашиванию желатинового слоя и окислению остатков проявителя.

В процессе отбеливания серебряных изображений производят окисление металлического серебра в растворе красной кровяной соли или двуххромовокислого калия. Образовавшиеся при отбеливании железистосинеродистое или хлористое серебро растворяется из-за наличия в слоях пленки тиосульфата натрия.

Номер операции	Операция	Кюветное время обработки негативов, мин	Температура раствора T , °C
1	Цветное проявление	6—8	18÷25
2	Останавливающая ванна	2	18
3	Фиксирование	7—10	18÷20
4	Отбеливание	5	18÷20
5	Промывка	25—30	16÷18
Итого:		45—55	

Поэтому при «ускоренном» технологическом процессе после процесса фиксирования не введена промывка.

Последовательность операции и режим фотохимической обработки цветных негативов приведены в табл. 9.

Обработка цветных негативных пленок производится также по следующей схеме: проявление, допроявление, промывка, отбеливание, промывка, фиксирование, длительная промывка, сушка. Процесс получения цветного негатива по этому способу представлен в табл. 10.

Таблица 10

Номер операции	Операция	Кюветное время обработки, мин	Температура раствора T , °C
1	Цветное проявление	6—8	18
2	Допроявление	4—5	18
3	Промывка	15—20	18
4	Отбеливание	5	18
5	Промывка	5	18
6	Фиксирование	7—10	18
7	Промывка	20—25	16—18

Итого: 1 ч 02 мин — 1 ч 18 мин

Температуру проявляющих растворов необходимо выдерживать с точностью до 0,5 °C.

Тщательный анализ отдельных операций, состава проявителя, последовательности обработки позволяет применить процесс фотохимической обработки для проявления материалов космических съемок с некоторыми изменениями последовательности операций. После проявления вводится операция допроявления негативов. Стоп-ванна, резко прекращая процесс прояв-

ния, не обеспечивает полного выхода красителей во всех слоях пленки, что приводит к нарушению цветопередачи объектов, разбалансу по коэффициенту контрастности между слоями. При допроявлении негатива выход красителя в нижнем слое пленки будет также пропорционален экспозиции для этого слоя, что особенно важно при сверхмелкомасштабной космической съемке.

Промывка цветных негативов производится в проточной воде, не превышающей установленной режимом проявления температуры. Время промывки определяется рядом факторов: скорость смены промывной воды, состав фиксирующего раствора, температура воды, ее рН и ряд других факторов.

Время промывки увеличивается, если для фиксирования применяли дубящий фиксаж или истощенный раствор фиксажа.

§ 57. ОБРАБОТКА ЦВЕТНЫХ ОБРАЩАЕМЫХ ПЛЕНОК

Последовательность технологических операций и режим фотохимической обработки цветных обрабатываемых пленок должны соответствовать требованиям, указанным в табл. 11.

Таблица 11

Операция	Режимы обработки для фотопленок	
	время обработки, мин	температура растворов $T, ^\circ\text{C}$
Черно-белое проявление	8—12	$25 \pm 0,3$
Промывка	2	15 ± 3
Останавливающая ванна или дубяще-останавливающая ванна	2—3	20 ± 1
Промывка	5	15 ± 3
Засветка двумя лампами по 500 Вт на расстоянии 1 м от пленки	2—3	—
Цветное проявление	8—10	$25 \pm 0,3$
Промывка	20	15 ± 3
Отбеливание	5	20 ± 1
Промывка	5	15 ± 3
Фиксирование	5	20 ± 1
Промывка	15	15 ± 3

В процессе черно-белого проявления обрабатывающий раствор в течение первых 5—10 мин надо энергично перемешивать.

Пленку промывают в проточной воде.

Фотопленки после черно-белого проявления промывают, затем обрабатывают в останавливающем или дубяще-останавливающем растворе, после этого снова промывают и затем засвечивают.

При засветке производят экспонирование пленки, чтобы смог проникнуть в достаточной степени в нижние эмульсионные слои, скрытые серебряным противоореольным слоем, с одной стороны, и металлическим серебром изображения, с другой. При недостаточной засветке нижний эмульсионный слой, получив незначительные экспозиции, будет проявляться слабо, что вызовет слабое появление голубого красителя. Следовательно и позитивное изображение будет малонасыщенным с преобладанием красного оттенка.

Несколько бóльшая, чем полагается при норме, засветка не оказывает отрицательного влияния на качество цветного изображения. Вслед за засветкой следует цветное проявление. После цветного проявления пленку продолжительное время интенсивно промывают для полного удаления цветного проявляющего вещества. В противном случае при обработке пленки в отбеливающем растворе на изображении образуется интенсивная красная вуаль.

Отбеливание заключается в переводе серебра изображения фильтрового и противоореольного слоев в галогенид серебра. После отбеливания фотопленку промывают и фиксируют.

В растворе фиксажа галогидные соли серебра переводятся в хорошо растворимые соединения и полностью удаляются из фотослоев в фиксаже и при последующем промывании. Полученное в результате фотохимической обработки цветное изображение состоит только из красителей. Компенсация расхода раствора для черно-белого проявления и частичное восстановление его свойств достигается добавлением в рабочий раствор 80 см³ свежего проявителя, не содержащего бромистого калия после обработки одной малоформатной или катушечной пленки. Восстановление свойств раствора для цветного проявления достигается добавлением после обработки каждой пленки 40 см³ безбромидного проявителя.

§ 58. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЦВЕТНЫХ СНИМКОВ

Исследуя возможности применения цветных и спектральных пленок при съемке из космоса, необходимо определить влияние на разрешающую способность системы объектив — слой различных факторов и, в частности, изменения контраста объектов.

Способность фотографического материала воспроизводить мелкие детали местности определяется величиной разрешающей способности, при этом измерения производят по тест-объекту, контраст которого практически близок к единице. Однако контраст фотографируемых объектов достигает незначительной величины (0,2 ÷ 0,3). Поэтому, применение тест-объекта с контрастом, равным единице, не позволяет с требуемой для практики точностью судить об истинной способности фотоматериала воспроизводить мелкие и малоконтрастные детали местности.

Известно, что лучистый поток, поступающий на пленку, определяется выражением

$$F = \int_{\lambda=0}^{\lambda=\infty} S_{\lambda} d\lambda = \int_{\lambda_0}^{\lambda=\infty} E \bar{M}_{\lambda} T_{\lambda a} T_{\lambda c} d\lambda, \quad (285)$$

где F — лучистый поток; E — спектральная интенсивность источника света; \bar{M}_{λ} — спектральный коэффициент яркости объекта; $T_{\lambda a}$ — спектральная прозрачность атмосферы; $T_{\lambda c}$ — спектральная прозрачность светофильтра.

Действие этого потока на различные слои спектрально-цветных, цветных, изопанхроматических, паннифрахроматических пленок будет различным, в соответствии с этим будет различным и образование плотностей в слоях пленок, т. е. при одних

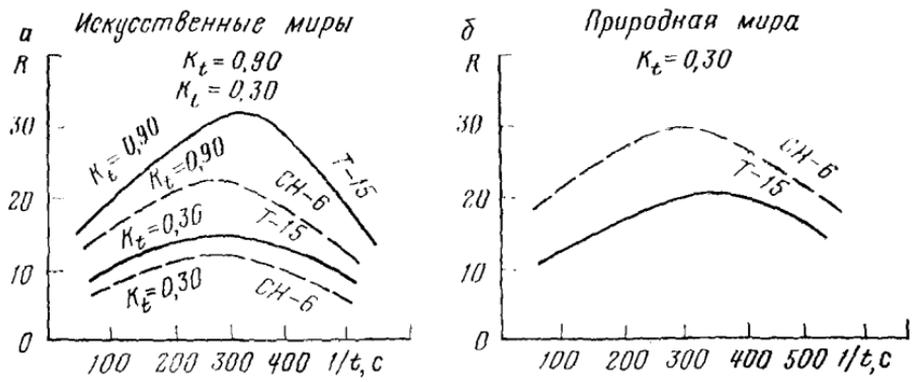


Рис. 57.

и тех же условиях фотографирования (КСК, высота съемки, условия освещения) контраст объекта будет передан различными фотослоями различно.

Если сфотографировать на цветную пленку миры одинакового контраста (например, $K_t = 0,3$), но изготовленные из материала с различными спектральными коэффициентами яркости, то величины разрешающей способности будут различны, т. е.

$$R_{\lambda_1}^{0,3} \neq R_{\lambda_2}^{0,3} \neq R_{\lambda_i}^{0,3}.$$

Для определения влияния контраста тест-объекта на разрешающую способность черно-белых, цветных и спектрально-цветных материалов была проведена фотосъемка измерительных тест-объектов, имеющих различные спектральные коэффициенты яркости r_{λ} . Миры были изготовлены из полотна (искусственные) и природных образований (травы—почва, трава—песок). Данные исследований приведены на графиках (рис. 57, а, б).

При изменении контраста природной миры должна быть снижена разрешающая способность всех трех пленок в соответствии с зависимостью, определяющей изменение R из-за изменения контраста:

$$R_{K_t} = R_{\max} \left(\frac{K_t}{2 - K_t} \right)^{0,36} \quad (2)$$

Самая высокая разрешающая способность, определенная в мире малого контраста, получена для пленки СН-6М, затем идет цветная и черно-белая.

Известно, что визуальное восприятие какого-либо объекта на черно-белом снимке является возможным, если различие в оптической плотности между изображением объекта и окружающим его фоном превышает порог контрастной чувствительности зрения.

В то же время объект будет изображен на снимке тогда когда $r_{\lambda_1}/r_{\lambda_2} \neq 1$, а при съемке с больших высот $r_{\lambda_1}/r_{\lambda_2} \neq 1,5$ (где $r_{\lambda_1}, r_{\lambda_2}$ — коэффициенты спектральной отражательной способности объектов). Если применять спектральнозональные пленки, которые имеют сенсibilизацию к видимой и инфракрасной областям спектра, где разность в коэффициентах спектральной отражательной способности достигает максимальной величины, то надежность обнаружения и распознавания объекта гораздо выше при рассматривании спектральнозонального фотозображения, чем черно-белого.

Сравнивая величины спектральнозональных коэффициентов яркости объектов, можно выявить наиболее благоприятные зоны фотографирования для дешифрирования различных объектов земной поверхности с учетом спектральной характеристики приемника лучистой энергии — пленки.

Следует также отметить, что на цветных и спектральнозональных негативах цвета объектов отличаются от цвета фона, так как слои пленки, чувствительные к разным областям спектра, имеют разные цветные компоненты, что повышает дешифрируемость снимков.

На черно-белом снимке из-за небольшого контраста объекта и фона, разность в плотностях их изображения будет незначительной и часто недостаточной для распознавания.

Помимо полноты и достоверности получения точных данных по цветным и спектральнозональным снимкам возможно сокращение сроков дешифрирования, так как на обнаружение и распознавание объектов дешифровщику требуется меньше времени.

Спектральнозональные пленки имеют то преимущество при выполнении космической съемки, что они в меньшей степени подвержены влиянию задымленности атмосферы.

Известно, что рассеяние света происходит обратно пропорционально четвертой степени длины волны λ , т. е. красные и ин-

Инфракрасные лучи рассеиваются в наименьшей степени. Но это относится к идеальному случаю состояния атмосферы. Так как в воздухе много пылевых частиц, тумана, то закон рассеяния не сохраняется. Исследования по определению прозрачности атмосферы в видимой и ближней инфракрасной областях спектра отмечают согласованный ход изменения прозрачности в обеих спектральных областях с изменением дальности видимости (в нашем случае — высоты фотографирования). За исключением туманов прозрачность в некоторых областях инфракрасной области всегда выше прозрачности в видимой области спектра.

Длина волны в м	400	500	600	700	800
Прозрачность в %	76	88	91	96	98

Таким образом, применение спектрально-чувствительных пленок, чувствительных к инфракрасным лучам, дает возможность получить более высокое качество негативов, так как контраст объектов из-за влияния дымки снижается в меньшей степени.

Проведенные исследования подтвердили высокую информативность цветных и спектрально-чувствительных пленок при съемке из космоса. При полете автоматической станции «Зонд-7» были получены уникальные цветные снимки поверхности Луны и Земли с больших расстояний. Несмотря на сверхмелкий масштаб изображения, снимки позволили разделить объекты, имеющие разные спектральные коэффициенты яркости.

Спектрально-чувствительные и цветные перспективные снимки, полученные при полете орбитальных пилотируемых станций «Салют-3» и «Салют-5», позволили выявить загрязнение океана промышленными водами, дешифровать подводный рельеф, изучить структуру облачных образований и т. д.

Разрешающую способность цветных и спектрально-чувствительных пленок необходимо определять по природным мирам, с учетом спектральных характеристик объекта и фона, что позволит более правильно установить оптимальные условия космической съемки.

§ 59. ПРОЯВОЧНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ НЕГАТИВНЫХ ФОТОМАТЕРИАЛОВ

К проявочным приборам для фотохимической обработки материалов космической съемки предъявляются определенные требования: равномерность проявления по всей длине и ширине фильма, отсутствие механических повреждений, возможность осуществления визуального или автоматического контроля процесса проявления, безопасность во время работы, отсутствие в приборе деталей из окисляющихся металлов, эксплуатационные удобства. По принципу действия приборы можно разделить на спиральные, перематывающего типа и проявительные

машины. Перематывающие приборы, в свою очередь, могут быть ручные и автоматические.

Для выбора оптимального режима фотохимической обработки материалов космической съемки необходимо учитывать требования к качеству негативов, полученных при проявлении на приборах разной конструкции, и условия экспонирования.

Проявочный прибор спирального типа представляет собой две большие спирали, укрепленные на одной оси. Высота бортиков спирали 4—5 мм; расстояние между основаниями ее приблизительно равно ширине пленки. Если ширина пленки 190 мм, то расстояние между основаниями спиралей 191 мм, а между краями спиралей 182—180 мм. Материалом для изготовления может служить нержавеющей сталь или винипласт. Пленка наматывается на спираль, получается большой барабан, скрепляемый резиновым поясом. Так как основания спиралей ажурные, а расстояние между витками больше 4 мм, после погружения барабана в проявочный бак пленка омывается проявителем и другими растворами. Чтобы к поверхности эмульсионного слоя не прилипли пузырьки воздуха, после погружения в бак спирали с пленкой ее вынимают из раствора и вторично опускают в него, чтобы стекающий раствор сбил пузырьки воздуха. При проявлении нужно энергично вращать спираль, так как при спокойном положении ее над плотными местами могут появиться полосы, образующиеся под действием продуктов реакции и проявления, опускающихся вниз и тормозящих проявление в нижележащих местах. При правильном вращении проявление происходит равномерно, и негативы по сенситметрической характеристике близки к негативам, получаемым при пробном проявлении в кювете. Проявление и другие операции на спирали протекают такое же время, как в кювете, т. е. не требуется удлинения процесса.

При проявлении в приборах спирального типа вследствие недостаточной циркуляции проявителя происходит неравномерное нарастание плотности в центре и на краях негатива, что приводит к изменению коэффициента контрастности по полю кадра.

К недостаткам фотохимической обработки на спиральных приборах следует отнести то, что спирали, изготовленные из винипласта, легко коробятся, что затрудняет зарядку фильмов и приводит к браку проявления, так как возникают «залипы» между соседними витками фильма, при размотке фильма возможны порывы негативов. Фотохимическую обработку ведут в открытых баках, что недопустимо с точки зрения охраны труда из-за токсичности растворов. Для активного перемешивания раствора спирали поднимают из бака, из-за чего возникает усиленное окисление проявляющего вещества и появляется «воздушная вуаль», контроль процесса проявления осу-

щество невозможно, длина проявляемой пленки должна быть не более 30 м и т. д.

Таким образом, при фотохимической обработке материалов космической съемки на проявочных приборах спирального типа не обеспечены основные требования: равномерность и надежность проявления всех кадров. Уникальность космических снимков не позволяет рисковать ни одним кадром, так как во время проведения эксперимента часто получают единственное изображение планеты, явления, объекта. Отмеченные недостатки не позволяют рекомендовать спиральные приборы для фотохимической обработки результатов космического фотографирования.

Проявочные приборы перематывающего типа нашли широкое применение при обработке черно-белых и цветных фильмов. Принцип автоматической обработки фильмов в малолитражных проявочных приборах имеет определенные преимущества: скорость обработки, портативность прибора, малый расход растворов, эксплуатационные удобства. Основным недостатком перематывающих приборов заключается в том, что пленка попеременно то погружается в проявитель, то туго наматывается на катушку и остается без доступа свежего проявителя значительное время. Это приводит к тому, что начало и конец фильма будут проявлены неравномерно. Изменение коэффициента контрастности при обработке черно-белых и цветных пленок на автоматическом малолитражном проявочном приборе достигает от краев фильма к середине $0,2 \div 0,3$. Форма характеристической кривой при переходе от кюветного проявления к проявлению на перематывающих приборах несколько изменяется.

Расхождения по коэффициенту контрастности в начале, середине и конце фильма можно объяснить тем, что пленка очень туго наматывается на катушку, проявитель как бы «выжимается» и между витками пленки остается недостаточное его

Т а б л и ц а 12

Средние технологические сроки негативной обработки

Операции негативной обработки	Время (мин), потребное для обработки аэропленки в проявочном приборе					
	РПП-10, 13			АМПЦ-10, 11, 13		
	10 м	20 м	30 м	30 м	40 м	60 м
Размачивание	3	4	6	3	4	6
Проявление	9	11	13	8	10	13
Промежуточная промывка	2	2	2	2	2	2
Фиксирование	5	8	12	3	7	13
Окончательная промывка	9	11	13	8	10	13
Полное время обработки	28	36	46	22	33	47

количество для проявления изображения. Чем больше витков намотано на катушку, тем меньше время она находится в соприкосновении со свежим проявителем и тем большее время она наматывается. Зависимость между длиной пленки и временем проявления связана со скоростью перемотки, составом проявителя и выбранными критериями степени проявления (табл. 12).

В малолитражных приборах типа АПП-85 перемотка фильма производится более плавно, с меньшим натяжением, чем в АМПП-11, между витками пленки остается почти достаточное количество проявителя. Сенситометрические показатели фильма несколько стабильнее.

Прибор АПП-85 служит для обработки пленки длиной до 60 м и шириной 19 см. В комплект прибора входят: перемоточный механизм, моторный блок, блок питания, баки для растворов. Прибор питается от переменного тока 127 и 220 В. Концы фильма закрепляют на катушке перемоточного блока пружинными скобами, что уменьшает брак концов фильма из-за «полосатости». Время перемотки полнометражного фильма — 2 минуты. Прибор может быть использован в режиме ручной перемотки пленки.

После намотки фильма на станину проявочного прибора впечатывается оптический клин.

При фотохимической обработке выдерживают следующую последовательность операций.

Перед проявлением фильм размачивают в чистой воде, температура которой должна быть 18—20 °С. Для этого станину проявительного прибора опускают свободной от пленки катушкой в бак с чистой водой так, чтобы жидкость не смачивала вторую катушку с намотанным фильмом, и перематывают пленку на катушку, опущенную в воду; операцию перемотки пленки повторяют 2—3 раза. После размотки фильма катушки помещают в бак с проявителем, на станину устанавливают электропривод, включают электродвигатель перемотки. Перемотка пленки с одной катушки на вторую и обратно производится автоматически.

По истечении половины расчетного времени проявления останавливают перемотку пленки и с помощью электронно-оптического преобразователя оценивают оптическую плотность негативов.

Нормальной плотностью негативов следует считать такую, при которой со стороны основы хорошо просматривается ситуация ландшафта.

После проявления фильм промывают в воде в течение 2—3 мин.

Фиксирование пленки производится в двух баках: в первом до осветления пленки 10—15 мин, во втором — окончательное фиксирование 7—10 мин. Окончательная промывка фильма производится в проточной воде в течение 30—40 мин.

После каждого проявления шестидесятиметрового фильма для восстановления начального объема и активности проявителя из бака следует отбавить 2 литра раствора и добавить 3 литра свежего проявителя, но без бромистого калия.

Анализ качества фильмов, обработанных на перематывающих приборах, показывает изменения оптической плотности по длине фильма. Известны случаи обрыва фильма во время его перематки, заправочные концы из-за неравномерности проявления имеют ярко выраженные полосы («зебрность»), воз-

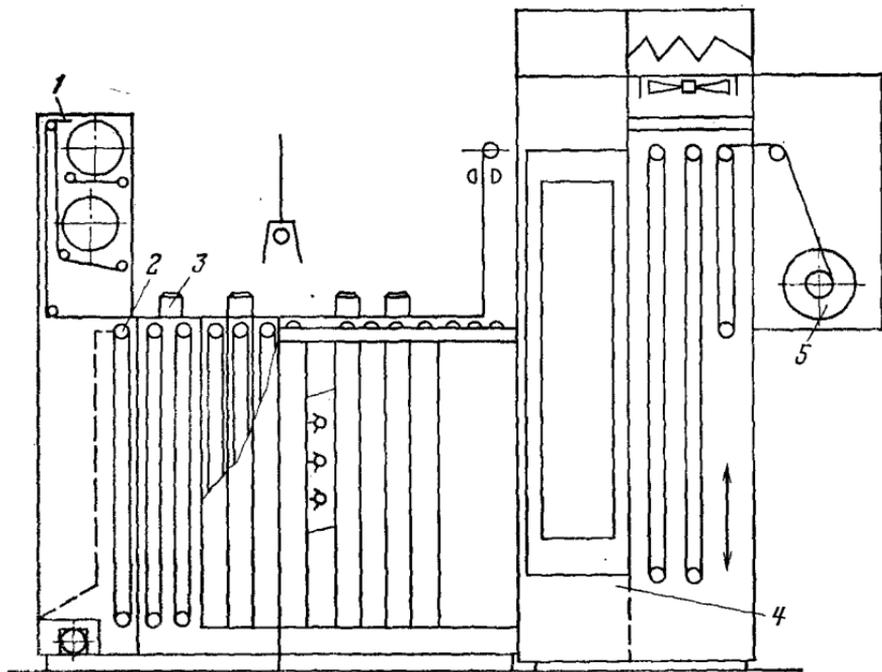


Рис. 58.

можны случаи механического повреждения пленки в момент переключения направления движения перематки. Эти недостатки не позволяют широко применить малолитражные проявочные приборы для фотохимической обработки материалов космической съемки.

Автоматические методы обработки фильмов на проявочных машинах позволяют получать оптимальное качество при условии точного экспонирования.

В проявочных машинах процесс фотохимической обработки фильмов полностью автоматизирован. На рис. 58 показана схема проявочной машины.

Все блоки машины объединены в одно устройство, которое предназначено для фотохимической обработки материалов

аэрокосмических съемок. В проявочной машине пленка последовательно проходит ряд баков, содержащих проявительный раствор, фиксаж, воду. Конец аэропленки, которая помещена в светонепроницаемый короб 1 проявочной машины, прикрепляют к концу заправочной ленты. Для того чтобы пленка прошла большой путь в каждой баке, ее располагают петлями с помощью направляющих валиков 2. Пленка проходит баки с проявителем и кислым фиксирующим раствором. Для поддержания постоянной температуры проявочные баки имеют подогрев с помощью электронагревателей. Чтобы обеспечить условия равномерного проявления, в проявочных баках установлены циркуляционные насосы, обеспечивающие хорошее перемешивание растворов. Над проявочными баками устанавливаются бачки-дозаторы 3 для поддержания постоянной концентрации проявляющих веществ. После фиксирования пленки поступают в баки для промывки. Устранение оставшейся влаги на пленке производится с помощью каплесудателя. Пройдя сушильный блок 4, пленка наматывается на катушку 5. Воздух в сушильном блоке очищается от пыли, затем подогревается в калориферах и поступает в блок сушки.

§ 60. БЫСТРЫЕ ПРОЦЕССЫ ОБРАБОТКИ ФОТОПЛЕНОК

Процессы быстрой обработки галогенидосеребряных светочувствительных материалов нашли применение при выполнении космических съемок при передаче изображений телевизионными средствами, при обработке методом контактирования пленки с материалами, пропитанными обрабатывающими растворами, при регистрации быстротекущих процессов и явлений природы, записи показаний приборов и т. д.

За последние годы разработаны принципиально новые быстрые процессы регистрации изображений, к которым относятся электрофотография, диффузионные и термографические процессы, магнитная, электростатическая, термопластическая и фотопластическая запись изображений и др.

Рассмотрим более подробно быстрые процессы галогенидосеребряных светочувствительных материалов, наиболее широко применяемых при проведении космических исследовательских и научно-производственных работ. При получении промежуточных изображений в фототелевизионных системах и передаче их на расстояния необходимо определить условия правильного воспроизведения и рассчитать результирующий коэффициент контрастности γ_n конечной продукции — позитива по формуле, куда входят коэффициенты контрастности промежуточных изображений:

$$\gamma_n = \gamma_{пн} \gamma_{т} \gamma_{пр} \gamma_{вт}$$

(287)

$\gamma_{\text{пн}}$ — первичный негатив; $\gamma_{\text{т}}$ — передаваемое телевизионное изображение; $\gamma_{\text{пр}}$ — принимаемое телевизионное изображение; $\gamma_{\text{вт}}$ — вторичный негатив с телевизионного изображения; $\gamma_{\text{п}}$ — позитивная копия.

В быстрых и сверхбыстрых процессах применяют как нормальную обработку светочувствительных материалов, погружая их в соответствующие растворы, так и путем нанесения на них обычных или вязких быстрообрабатываемых растворов. Качество полученного изображения и продолжительность обработки зависят от состава раствора, температуры, толщины слоя и его зернистости, типа проявляющего устройства и т. д.

В зависимости от рецептуры проявителей и условий проявления скорость проявления измеряется от десятков секунд до долей секунды. Для ускорения процесса проявления применяют быстродействующие проявители с едкими щелочами. Скорость проявления изменяется: за счет высокой концентрации проявляющего вещества и едкой щелочи; раствор проявителя может иметь нормальную pH, но применяют очень активное проявляющее вещество, типа амидол, пирогаллол и др.; температура раствора проявителя очень высокая, при этом происходит сильный гидролиз слабых кислот и сильных оснований, что приводит к повышению pH раствора. Для этого применяют фенидон-гидрохиноновые и метолгидрохиноновые проявители с предварительным дублированием фотопленки в растворе формалина. Если принять температурный коэффициент проявления равным 2, то при повышении температуры с 20 до 60 °C продолжительность проявления уменьшится примерно в 15 раз. При фиксировании в обычном фиксаже время осветления фотопленок при $T=20^\circ$ равно 2 мин, при повышении температуры раствора на 60 °C в этом же растворе пленка осветляется примерно за 10 с. Для более равномерного проявления тонкослойных пленок необходимо применять поверхностно-активные вещества-смачиватели. Например, СВ-133 — кислый диапениляторный эфир октаглицерина алкениляторной кислоты, который применяется в пропорции 10 мл 15 %-ного водного раствора на 1 л проявителя.

В быстрых процессах применяют быстроработающие фиксирующие растворы с тиосульфитом натрия или аммония и различными добавками. Высокие скорости фиксирования получают также в растворах роданида и кислых растворах тиомочевины, но при этом получается на пленке белый налет из нерастворимых солей, чтобы этого избежать, в воду добавляют тиосульфит натрия.

Существует способ ускоренной обработки, когда применяют процесс проявления, затем останавливающий кислый и стабилизирующий раствор. Йодистый калий образует при этом нерастворимое йодистое серебро, слабо чувствительное к свету. При обработке в стабилизирующих ваннах невосстановленная часть галогенида серебра превращается в бесцветные прозрач-

ные комплексные соли, которые не вымываются из эмульсионных слоев, являются достаточно стойкими к свету и влиянию влажности при хранении.

Состав проявителя при быстром проявлении: гидрохинон — 30 г; фенидон — 1,5 г; сульфит натрия — 100 г; едкий натрий — 25 г; бромистый калий — 3,5 г; бензотриазол — 1,0 г; вода — 1,0 л.

Предварительное дублирование производят в растворе, куда входят формалин, бромистый калий, вода.

Процесс одновременного проявления и фиксирования обладает простотой, малой зависимостью результатов проявления от температуры и перемешивания растворов, отсутствует пере- проявление.

В процессе одновременного проявления и фиксирования светочувствительных негативных пленок время уменьшается в два раза и более, но γ и форма характеристической кривой сохраняются. Разработанные фенидонгидрохиноновые проявители позволяют не терять светочувствительности. Проявляющие и фиксирующие растворы имеют следующую рецептуру: фенидонгидрохинон: гидрохинон 15 г, фенидон — 10 г; сульфит натрия — 50 г; едкий натрий — 18 г; алюмокалиевые квасцы — 18 г; тиосульфат натрия кристаллический — 110 г; вода — 1 л.

При космической съемке применяют также для быстрой обработки пленки специальные ленты, пропитанные обрабатывающими растворами, которые смотаны в рулоны и герметически упакованы. Ленты предназначены для обработки фотографических слоев путем их контактирования в роликовых устройствах. Обрабатывающие растворы в этих лентах пропитывают пористую ткань со средним диаметром волокон 0,5—1 мкм, которая склеена с непористой пластической основой. Продолжительность обработки рулонных пленок рассматриваемыми тканями, пропитанными проявляюще-фиксирующими растворами, составляет около 1 мин при 70 °С. При понижении температуры продолжительность обработки увеличивается, при этом она также зависит от сорта обрабатываемого материала. Продолжительность обработки тонкослойных материалов может составлять 10 с. Рассматриваемый процесс был описан еще в 1913 году, однако его техническое осуществление началось лишь в последнее время.

Этот способ прост и удобен для практического применения и не требует сложного оборудования, его схема показана на рис. 59. В этом устройстве контактирование пленки с лентой осуществляется прокатыванием их между рядами роликов. После определенного времени, необходимого для обработки данного фотографического материала, от него лента отделяется и сматывается на бобину. Рассматриваемый способ может использоваться как для покадровой, так и непрерывной обработки пленки. Продолжительность обработки зависит от сорта

пленки, рецептуры используемых растворов и температуры. Обработанная пленка после удаления с нее остатков реактивов может быть высушена обычным образом. Получаемое изображение может сохраняться без изменения в течение 30 дней. Характеристические кривые пленок, обработанных обычным образом в проявителе $D=76$ и способом контактирования, относительно мало различаются между собой. В случае обработки пленки ускоренным способом имеется несколько повышенная вуаль, несколько пониженная светочувствительность при примерно одинаковом коэффициенте контрастности.

Одним из вариантов рассматриваемого способа контактирования могут быть процессы, в которых используются вязкие обрабатывающие растворы (например, проявляюще-фиксирующие

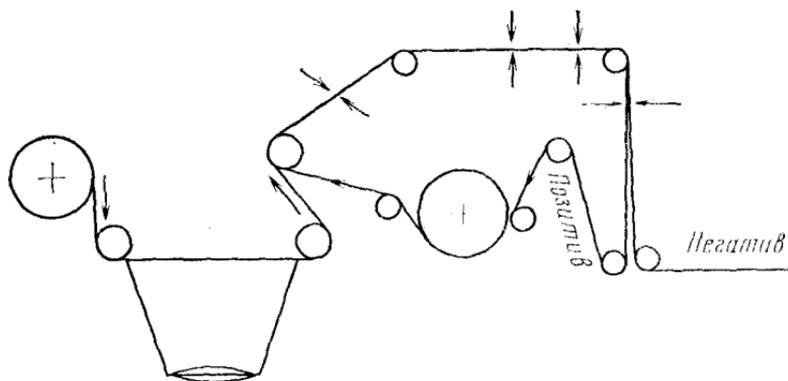


Рис. 59.

щие), которые предварительно наносятся на бесконечные ленты (ремни), контактируемые затем с обрабатываемой пленкой в течение времени, необходимого для ее обработки. После этого обработанная пленка покрывается защитной прозрачной лентой, и она готова для дальнейшей работы. Использованный же вязкий раствор (паста) удаляется с ленты, которая затем снова унобребляется для работы.

Известен также процесс обработки пленки, на которую с помощью щелевого устройства наносится высоковязкий проявляюще-фиксирующий раствор. После того как обработка пленки закончится, к ней прикатывается тонкая прозрачная лента (пластик), и полученное изображение готово для использования. Позднее прозрачная лента может быть удалена с пленки, которая затем может подвергаться промывке и сушке для последующего обычного хранения. При применении в рассматриваемом способе проявляюще-фиксирующего раствора с фенидоном продолжительность обработки пленки составляет при 32°C около 1 мин с достижением коэффициента контрастности, равного единице, и максимальной плотности — 2,5.

§ 61. ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПРОЯВЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

Методика фотохимической обработки космических негативов требует обеспечения надежного метода контроля процесса проявления, дающего возможность в случае необходимости прерывать, изменять установленный режим или полностью его автоматизировать.

При проведении космических съемок изменение характеристик, определяющих экспозицию, еще не изучено в достаточной степени, поэтому условия проявления играют весьма важную роль в получении негативов с оптимальной оптической плотностью. Когда прекращается процесс проявления, получившиеся оптические плотности уже не изменяются при последующих операциях обработки и, следовательно, можно считать, что экспозиция и проявление являются основными факторами, определяющими качество космического фотоснимка. Фотографическая разрешающая способность является функцией от величины оптической плотности D и от диапазона плотностей $\Delta D = D_{\max} - D_{\min}$.

Для контроля проявления фильмов применяют десенсибилизаторы — пинакринтол зеленый, ауранций, деноксан. При исследовании установлено, что десенсибилизация ведет к ухудшению качества фотографического изображения, так как снижает светочувствительность негатива, что особенно сказывается при съемке на малочувствительные, но имеющие большую разрешающую способность пленки. Введение дополнительной ванны перед проявлением также снижает качество негатива и производительность труда.

При фотохимической обработке цветных и спектрзональных материалов применять десенсибилизаторы нельзя, так как ослабление светочувствительности по слоям пленки неравномерно, негативы окрашиваются, что приводит к нарушению цветового баланса.

При разработке метода контроля процесса проявления материалов космических съемок необходимо выполнение следующих условий:

сенситорезольвометрические характеристики негативов не должны ухудшаться в процессе обработки;

метод должен обеспечивать объективную оценку измерения оптических плотностей;

процесс контроля проявления должен осуществляться или оператором-лаборантом, или автоматически.

Регулируемые параметры при фотохимической обработке: время проявления T (мин), температура проявления t , °С, насыщенность растворов Q . Варьируя условиями проявления, возможно обеспечить критерий оптимального уровня плотности

$D_{\text{опт}}$ с учетом изменяющихся при космической съемке условий экспонирования.

В настоящее время широкое распространение получили электронно-оптические приборы. Одним из них является широко применяемый в различных отраслях промышленности электронно-оптический преобразователь (ЭОП). Зная спектральную чувствительность пленки и применяя специальный светофильтр, пропускающий только лучи, к которым данная пленка нечувствительна, возможно, применив электронно-оптический преобразователь, увидеть изменение плотностей во время процесса проявления. На этом принципе осуществлен надежный непрерывный контроль проявления. В качестве невидимых

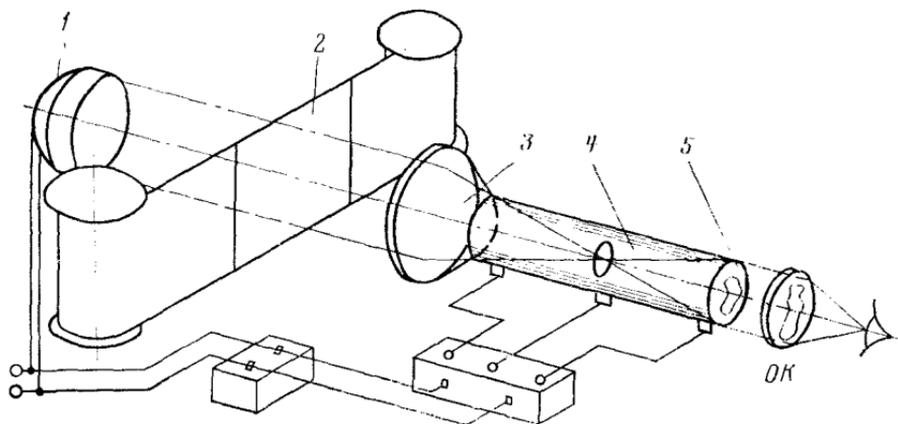


Рис. 60.

лучей могут быть использованы как ультрафиолетовые, так и инфракрасные.

Преобразовать ультрафиолетовое изображение в видимое — просто, так как кванты ультрафиолетовых лучей обладают количеством энергии достаточным, чтобы вызвать свечение флуоресцирующего экрана. Но лучи ближней ультрафиолетовой области будут засвечивать светочувствительный слой, а использовать дальнюю область ультрафиолетового излучения невозможно, так как нет экономичных источников.

На рис. 60 показано принципиальное осуществление метода контроля проявления, основанного на видении в инфракрасных лучах.

Негатив освещается осветителем 1, закрытым инфракрасным фильтром. Инфракрасный фильтр должен пропускать только те лучи, которые не создают засветки обрабатываемого фотографического материала со спектральной чувствительностью $\lambda_{\text{н}}$, т. е. $\lambda_{\text{н}} > \lambda_{\text{н}}$.

Инфракрасные лучи, осветив негатив 2, попадают в объектив 3, затем в электронно-оптический преобразователь, пройдя который они фиксируются на экране 5. На экране появляется, таким образом, видимое изображение, по которому возможно вести визуальный контроль за ходом процесса проявления.

При визуальном методе контроля с применением ЭОП установление времени проявления определяется по оптической плотности негатива и эталонированному денситометрическому клину. Интегральный денситометр позволяет производить измерение оптической плотности $D_{\text{инт}}$ по всему кадру негатива и с помощью системы управления прекращать процесс проявления. В задачу прибора не входит полное денситометрическое исследование, так как интегральная плотность может характеризовать процесс проявления с достаточной точностью; величина $D_{\text{инт}}$ может быть заранее задана по космическим негативам — эталонам для данного района съемки.

Управление процессом проявления при фотохимической обработке материалов космической съемки с орбитальной пилотируемой станции «Салют-3» позволило применить шесть различных режимов для получения оптимальной плотности негативов, снятых на одну и ту же пленку (работа экипажа в бортовом отсеке, характерные облачные образования, лесные массивы и др.).

Метод контроля процесса проявления материалов научных фотографических экспериментов, основанный на видении в инфракрасных лучах, осуществлен при обработке негативов с автоматических станций «Зонд-5», «Зонд-6», «Зонд-7», «Зонд-8», космического корабля «Союз-9», орбитальных станций «Салют-3» и «Салют-5», что позволило получить высокое качество изображения.

Глава X ПОЗИТИВНЫЙ ПРОЦЕСС

§ 62. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЗИТИВНОГО ПРОЦЕССА

С материалов космической съемки, полученных на негативных или позитивных слоях, могут быть отпечатаны дубль-негативы или позитивы, необходимые для проведения разнообразных камеральных работ. Процесс получения позитивных изображений состоит из двух стадий: фотопечати и фотохимической обработки экспонированных позитивных материалов.

В случае если производится печать с негативного материала, на позитиве получают изображение, на котором светлым и темным участкам объекта соответствуют также светлые и темные участки. В случае печати с позитивного материала получают прямое воспроизведение тонов, т. е. получают дубль-позитив. Процесс печати может быть выполнен на фотобумаге, позитивной пленке или диапозитивной пленке, контактным или проекционным способом. На фотографическом позитивном изображении необходимо точно передать яркости объекта съемки. Воспроизведение яркостей объекта на негативе характеризуется кривой, определяющей зависимость $\lg H$ и $D_{\text{нег}}$. Известно, что для прямолинейного участка характеристической кривой существует зависимость $\Delta D_{\text{нег}} = \Delta \lg B \gamma_{\text{нег}}$. Можно отметить, что процесс печати позитивов определяет взаимосвязь между оптической плотностью негатива $\Delta D_{\text{нег}}$ и приращением плотности позитива $\Delta D_{\text{поз}}$:

$$\Delta D_{\text{поз}} = \Delta D_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}}, \quad (288)$$

где $\gamma_{\text{поз}}$ — коэффициент контрастности позитивного материала.

Учитывая, что позитивный материал будет экспонироваться в зависимости от плотности негатива, и учитывая связь между экспозицией и оптической плотностью, можно записать

$$\Delta \lg H_{\text{п}} = - \Delta D_{\text{н}}. \quad (289)$$

Таким образом, при переходе от участка негатива с одной оптической плотностью к участку негатива с другой оптической плотностью приращение логарифма экспозиций позитива будет равно разности этих плотностей, взятых с обратным знаком.

Учитывая зависимость, которая указывает на то, что приращение оптических плотностей позитива зависит от разницы плотностей негатива и коэффициента контрастности позитивного материала, можно установить, что правильное воспроизведение тонов в негативно-позитивном процессе будет тогда, когда $\gamma_{\text{поз}} = 1$, а $\Delta D_{\text{п}} = \Delta D_{\text{н}}$. Если $\gamma_{\text{поз}} > 1$, деталь плотности в позитиве больше соответствующей детали плотности на негативе, а при $\gamma_{\text{поз}} < 1$ плотность позитива меньше соответствующей плотности негатива.

Следовательно,

$$\Delta D_{\text{нег}} = \Delta \lg B \gamma_{\text{нег}}, \quad (290)$$

$$\Delta D_{\text{поз}} = \Delta D_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}}. \quad (291)$$

После преобразования получим

$$\Delta D_{\text{поз}} = \Delta \lg B \gamma_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}}. \quad (292)$$

Эта зависимость показывает, что детали плотностей позитива отличаются от деталей яркостей объекта тем больше, чем больше $\gamma_{\text{нег}}$ и $\gamma_{\text{поз}}$. Результирующей гаммой называется произведение $\gamma_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}}$:

$$\gamma_{\text{рез}} = \gamma_{\text{нег}} \gamma_{\text{поз}}. \quad (293)$$

Правильное воспроизведение тонов будет при условии, что $\gamma_{рез} = 1$, т. е. деталь плотности позитива будет равна соответствующей яркости объекта местности. На графике рис. 61 приведена кривая воспроизведения, характеризующая зависимость между яркостями объекта и оптической плотностью позитива. В квадранте II построена характеристическая кривая негативного материала, на оси OX нанесены логарифмы яркостей объекта съемки $\lg B_0$ с интервалом яркости $\Delta \lg B_0$. На ней выбраны

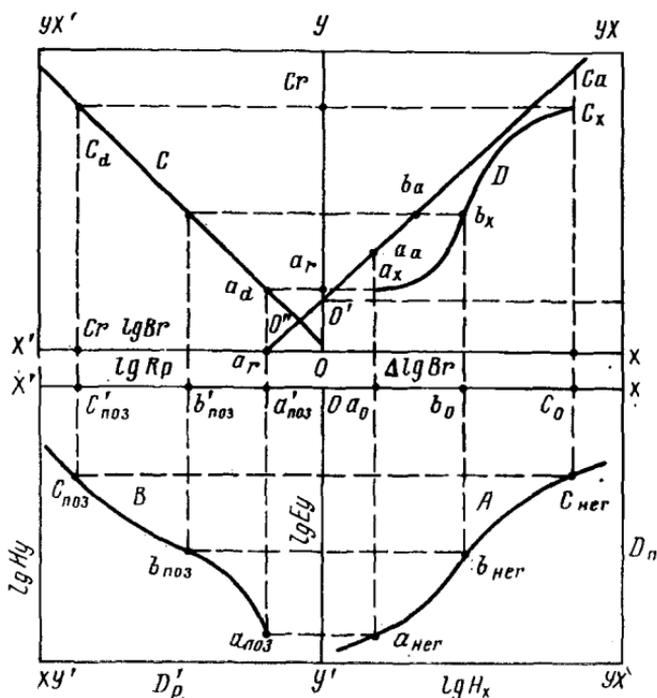


Рис. 61.

три значения яркости, указанные точками a_0, b_0, c_0 . По оси абсцисс отложены $\lg H_0$, по оси ординат — оптические плотности $D_{нег}$. Характеристическая кривая позитивного материала изображена в квадранте III, где по оси $X'X'Y$ нанесены экспозиции $\lg H_{п}$, действующие на позитивный материал при печати с негатива A . В квадранте IV проведена вспомогательная прямая C_0 . Через начало координат O под углом 45° на характеристическую кривую A (негативный материал) опустим перпендикуляры, соответствующие яркостям объекта a_1, b_0, c_0 , и получим точки пересечения с кривой $A, a_{нег}, b_{нег}, c_{нег}$. Из этих точек проведем горизонтальные линии до пересечения с характеристической кривой позитивного материала в точках $a_{поз}, b_{поз}, c_{поз}$. Перпендикуляры, восстановленные из этих точек, дадут в местах пере-

сечения с прямой S соответствующие точки a_c, b_c, c_c . Проведем из этих точек горизонтальные прямые, а из точек a_0, b_0, c_0 — перпендикуляры. Места их пересечения дадут точки a_x, b_x, c_x , по которым построим кривую воспроизведения, выражающую зависимость между яркостями объекта и плотностями в позитивном изображении. Если воспроизведение будет правильным, то кривая воспроизведения примет вид прямой, расположенной под углом 45° к осям.

Сущность процесса фотопечати можно рассмотреть также с сенситометрической точки зрения, т. е. рассмотреть условия получения высококачественного позитивного изображения. Основные сенситометрические характеристики позитивных материалов — коэффициент контрастности, фотографическая широта и светочувствительность. Следует отметить, что для позитивных материалов на прозрачной подложке методика сенситометрических испытаний соответствует методике, применяемой для испытания негативных пленок, а для фотобумаг эта методика несколько изменится.

При печати на фотобумагу используется весь полезный интервал экспозиции, т. е. вся характеристическая кривая, охватывающая область недодержек 1, прямолинейный участок 2 и область передержек 3 (рис. 62), от точки M до точки N , в которых еще возможно получить изображение в светах (точка M) и тенях (точка N).

В связи с этим точки M и N выбирают так, чтобы оптическая плотность почернений, соответствующая точке M , была равна $D_M = 0,02$, а $D_N = D_{\max} - 0,1$. Это обусловлено тем, что контрастная чувствительность глаза в тенях меньше, чем в светах. Таким образом, контрастность фотобумаги характеризуется средним градиентом $\delta = \operatorname{tg} \alpha$. Коэффициент контрастности фотобумаги определяется формулой

$$\gamma = \frac{D_2 - D_1}{\lg H_2 - \lg H_1}, \quad (294)$$

где H_1, H_2 — экспозиции, соответствующие точкам M и N характеристической кривой; D_1, D_2 — оптические плотности, соответствующие этим экспозициям.

Полезный интервал экспозиции L_δ определится разностью экспозиций, соответствующих концу и началу используемого диапазона почернений фотобумаги, т. е. проекцией используемого участка характеристической кривой на ось абсцисс. Полезный интервал плотности ΔD_δ — проекция этого участка характеристической кривой на ось ординат; $\Delta D_\delta = D_{\delta \max} - 0,1$.

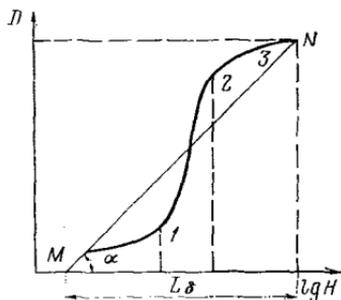


Рис. 62.

Найдем зависимость величины полезного интервала экспозиций

$$L_{\delta} = \Delta \lg H_{\delta} = \frac{D_{\max} - 0,1}{\rho} = \frac{\Delta D_{\delta}}{\rho}. \quad (27)$$

Светочувствительность фотобумаги определяют по формуле

$$S = \frac{100}{\sqrt{H_1 H_2}}. \quad (28)$$

Для измерения оптических плотностей в отраженном свете, получения индикатрис рассеяния и характеристик глянца черных, белых и цветных фотоотпечатков при разнообразных углах измерения служит прибор — отражательный гониоденситометр СР-22. Диапазон измеряемых значений плотности — от 0 до 2,1 при площади сечения измеряющего светового пучка 10 мм² и телесном угле воспринимаемого приемником отраженного светового пучка 10°.

Прибор построен по двухлучевой схеме и оснащен двумя одинаковыми фотоумножителями с широкой спектральной областью чувствительности. Измерительный серый клин управляется следящей системой, на реверсивный двигатель которой поступает усиленный разностный сигнал фотоумножителей, модулированный вибропреобразователем. Положение самоустанавливающегося клина (оптическая плотность на отражение) отсчитывается на экране, расположенном на передней стенке прибора.

Объект измерения любых размеров накладывается на большой горизонтальный рабочий стол с осветительным люком в центре и прижимается к нему откидным рычагом. Для измерения сенситограмм на бумаге имеется подвижная рамка-кассета форматом 30×120 мм с шагом 5 мм, расположенная на конце рычага. Выдвижной визир позволяет наблюдать за установкой подлежащего измерению участка объекта относительно светового пучка, выходящего из осветительного люка. Ось освещающего светового пучка наклонена к плоскости объекта на 45°. Угол измерения (положение оси пучка, воспринимаемого фотоумножителем) может составлять от +60 до -20° к нормали как в той же плоскости, так и в любой иной вертикальной плоскости, образующей угол от 0 до 90° с плоскостью освещающего пучка.

При измерении цветных объектов в пучок вводят синий, зеленый и красный узкополосные светофильтры.

Воспроизводимость измерений во всем интервале плотностей составляет 0,01.

Общие технические данные настольного отражательного гониоденситометра СР-22: питание — 220 В, 50 Гц, потребляемая мощность — 250 Вт (внутри прибора), габариты — 800×670×500 мм, масса — 100 кг.

§ 63. ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОЗИТИВНОГО ПРОЦЕССА

Важнейшей характеристикой фотографического материала является его назначение. По этому признаку можно подразделить материалы для печати на черно-белую фотобумагу, цветную и спектральнозональную фотобумагу, позитивную и обратимую пленки. Фотографические материалы для позитивного процесса можно также подразделить по виду подложки, формату, светочувствительности, коэффициенту контрастности, структуре поверхностного слоя. Фотографическая бумага (фотобумага) состоит из непрозрачной бумажной подложки с нанесенным на нее баритовым подслоем, светочувствительного слоя и защитного желатинового слоя. По составу галогенного серебра в светочувствительном слое различают бромосеребряные, хлоробромосеребряные, хлоросеребряные и йодохлоробромосеребряные фотобумаги. Бромосеребряные фотобумаги «Унибром» обладают наибольшей светочувствительностью ($S_8 = 5-15$), хлоробромосеребряные фотобумаги типа «Контабром» менее чувствительны (0,5—3), йодохлоробромосеребряные «Йодоконт» имеют наименьшую светочувствительность. Черно-белые фотобумаги имеют все степени контрастности, которую выражают следующими номерами: № 1 — мягкая, № 2—3 — нормальная, № 4—5 — контрастная, № 6 — особоконтрастная, № 7 — сверхконтрастная. Светочувствительность фотобумаги и ее контраст иногда определяют упрощенным способом по тест-объектам ГОИ. Он содержит три эталонных негатива различной контрастности: Н — нормальная, К — контрастная и ОК — особоконтрастная; ступенчатый оптический клин и два цветных светофильтра. Клин имеет 30 ступеней с константой 0,15. При испытании фотобумаги первое и последнее поле клина экспонируется с разностью в экспозиции в 1000 раз за счет разной плотности полей клина. Эталонные негативы отличаются друг от друга интервалом оптических плотностей. Цветные светофильтры позволяют произвести приближенную оценку светочувствительности бумаги. Фотобумаги выпускают с гладкой и структурной поверхностью. Бумаги с гладкой поверхностью делятся на глянцевые и особоглянцевые, структурные бумаги — матовые. Структурные бумаги подразделяют по типу поверхности на бархатистые, зернистые и тисненные. Бромосеребряные и хлоробромосеребряные фотобумаги предназначены для проекционной и контактной печати, хлоросеребряные и йодохлоробромосеребряные — для контактной печати. Выпускают фотобумагу в виде форматных листов и рулонов. При выполнении контактной печати с материалов аэрокосмических съемок (негативов) рекомендуют применять универсальные бромосеребряные бумаги белого цвета типа «Унибром», «Фотобром», «Новобром», которые обладают повышенной светочувствительностью и вуалеустойчи-

востью. Величина разрешающей способности для этих фотобумаг $R_8 = 15-17 \text{ мм}^{-1}$, а резольвометрическая широта равна: 0,5—1,0. Разрешающая способность и резольвометрическая широта повышаются по мере повышения степени дисперсности сернокислого бария, нанесенного на подложку. Такие показатели, как состав галогенного серебра, контрастность, гарантийный срок хранения, вид поверхности, толщина подложки, указываются на упаковке фотобумаги.

§ 64. ПРИБОРЫ ДЛЯ ПЕЧАТИ ПОЗИТИВНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

К приборам для контактной печати можно предъявить следующие требования:

максимально полная передача яркостных градаций с первичного изображения негатива на позитивный материал;

выравнивание позитивного материала в момент экспозиции; достаточный экспозиционный интервал, обеспечивающий печать на позитивные материалы разной светочувствительности;

возможность производить увеличение или уменьшение позитива относительно оригинала;

максимальная автоматизация работ.

При фотопечати требуется точное определение выдержки, так как ошибки, допущенные при экспонировании, практически не могут быть исправлены при фотохимической обработке позитивов, для чего в комплект прибора должен входить автоматический экспонометр, позволяющий найти выдержку, требующуюся при печати с того или иного негатива.

В настоящее время применяют приборы для печати позитивных материалов контактным методом, когда позитивное изображение получают того же масштаба, что и негатив, при проекционном методе получают увеличенное или уменьшенное позитивное изображение. Для печати с негативов, полученных многозональной камерой, применяют четырехобъективный проектор.

Широкое применение нашли электронные копировальные приборы для контактной и проекционной печати. Блок-схема такого прибора представлена на рис. 63. На экране трубки 1 образуется непрерывно перемещающееся световое пятно. Оно проектируется с помощью зеркал 8 и 8' на объектив 9, который строит элементарный участок негатива на позитивном материале 6. На фотокатод 5 попадает световой поток, прошедший через негатив 7 и позитив, и далее на фотоэлектронный множитель (ФЭУ). Фототок, возникший на ФЭУ, будет пропорционален световому потоку и, усиленный в блоке обратной связи 4 до величины, достаточной для управления потоком луча трубки, поступит в цепь трубки и будет регулировать яркость экспонирующего пятна трубки. Там, где световой поток пройдет через плотный участок негатива, яркость светового пятна

будет увеличиваться, при прохождении через светлые участки негатива луч как бы погаснет. Изменение яркости светового пятна приведет к изменению плотности позитивного изображения. Уменьшение яркости светового пятна на участках малой плотности и увеличение яркости пятна на участках большой плотности приведет к снижению интервала экспозиций, сообщаемых позитивному материалу. Это приведет к уменьшению общего контраста изображения, которое будет как бы выравненным. Можно регулировать систему, усиливая яркость пятна электронной трубкой, что позволит управлять контрастом, изменяя коэффициент маскирования. Интегрирующее устройство 3,

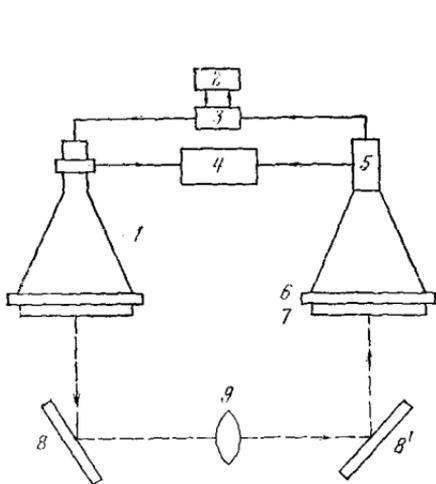


Рис. 63.

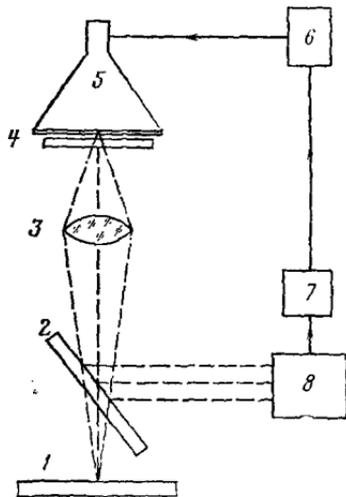


Рис. 64.

соединенное с блоком управления 2, позволяет производить автоматическое регулирование экспозиции. Свечение трубки прекратится как только суммарное количество световой энергии, упавшей на ФЭУ, сравняется с заданной экспозицией.

Электронные копировальные приборы для печати на рулонную бумагу имеют также электронно-лучевую трубку с модулирующей экспозиции по яркости. Развертка по кадру происходит благодаря непрерывному синхронному движению фильма и фотобумаги перпендикулярно к экспонирующей щели. Прибор обеспечивает печать в автоматическом режиме со скоростью 10—12 м/мин и разрешающей способностью 45 мм^{-1} . Для печати проекционным методом применяют электронные копировальные приборы, которые состоят из электронно-лучевой трубки 5, проекционного увеличителя и электронной системы (рис. 64). Световой поток в виде перемещающегося пятна, пройдя через негатив 4, поступает на проекционный объектив 3. На пути светового потока установлена светоделительная пластина 2, которая часть света пропускает к позитивному мате-

риалу 1, часть отражает на фотокатод 8 ФЭУ, обеспечивающий работу блока обратной связи 7 с усилителем 6. Изображение элементарного участка негатива строится объективом на позитивном материале 1. Модуляция светового пятна также производится по яркости. Оптимальные режимы печати на электронных копировальных приборах полностью зависят от величины коэффициента выравнивания контрастов негатива и позитива характеристик позитивного материала, полезного интервала экспозиций фотобумаги, формы и размеров сканирующего светового пятна, скорости сканирования и других характеристик процесса печати.

Для контактной печати применяют также полуавтоматические копировальные приборы, которые состоят из светонепроницаемого корпуса, прижимного устройства, осветительного устройства и экспонометра. Свет от нескольких ламп, установленных в нижней части прибора, проходит через негатив, расположенный на прозрачном стекле в верхней части прибора. К негативу (эмульсия к эмульсии) прижимают фотобумагу крышкой с воздушной подушкой. В зависимости от плотности негатива разные участки бумаги получают разные экспозиции. Для проекционной печати применяют проекционные системы с вертикальным или горизонтальным расположением увеличителя. В комплект увеличителя с вертикальным расположением оптической оси входят осветительная система, конденсор, проектирующая система, экран. Негатив располагается перед объективом в специальном держателе. Свет, пройдя через негатив, будет ослаблен пропорционально плотности негатива, и экспозиция для разных участков позитива будет различной.

Известны электронные копировальные приборы типа ЭКП (СССР), «Элкоп» (ГДР), ЕК-10 (ЧССР), Синтель (Англия) и др., полуавтоматические приборы — КП-8, КП-10 и др.; для проекционной печати — «Беларусь-5».

Современные электронные копировальные приборы обеспечивают печать с негативов, имеющих $D_{\max} \leq 2,5$, с коэффициентом выравнивания 2,0—2,5, диаметром сканирующего пятна в плоскости негатива от 2 до 8 мм или от 1 до 15 мм. ЭКП обеспечивают печать с разрешающей способностью отпечатка 85 мм^{-1} , что обусловливается меньшей величиной оптической плотности получаемой копии, применением направленного освещения, использованием прямолинейного участка характеристической кривой позитивного материала. Это дает возможность наблюдать в 2—3 раза больше подробностей, чем на обычном отпечатке.

Точность стереоскопического наведения измерительной марки на стереомодель, построенную по диапозитивам, полученным на ЭКП, выше в полтора-два раза, чем при измерениях по диапозитивам, полученным по обычным копиям на копировальных приборах других конструкций. Следует учитывать, что

продолжительность экспонирования одного кадра, определяющая эффективность работы на ЭКП, зависит от плотности негатива, скорости сканирования, диаметра сканирующего пятна и его яркости, чувствительности позитивного материала.

Для того чтобы печатать позитивы высокого качества с негативов, сильно отличающихся по контрасту, необходимо увеличить коэффициент выравнивания контраста до величины 4—5, что возможно при использовании в качестве источника освещения оптического квантового генератора. Для цветной печати применяют приборы, основанные на аддитивном процессе смешения цветов.

§ 65. ФОТОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МАТЕРИАЛОВ ПОЗИТИВНОЙ ПЕЧАТИ

Фотохимическая обработка состоит из процессов проявления, промежуточной промывки, фиксирования, окончательной промывки. Для фотобумаг применяют проявитель метолгидрохиноновый, фенидонгидрохиноновый, а также проявляюще-фиксирующий раствор. Время проявления составляет 2—3 мин для бромосеребряных бумаг и около 1 мин для хлоросеребряных и йодосеребряных бумаг. В качестве стандартного проявляющего раствора принят Государственным стандартом проявитель № 1 для фотобумаг и фотопластинок, который содержит следующее количество основных химических веществ (в молях):

Проявляющее вещество	0,05
Углекислая щелочь	0,2—0,3
Сульфит натрия безводный	0,2
Бромистый калий	0,002—0,04
Вода	до 1 л.

Глава XI

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМОЧНОЙ СИСТЕМЫ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯ

§ 66. СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРОХОЖДЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЧАСТОТ В СЪЕМОЧНОМ КАНАЛЕ

При построении математической модели съемочной системы необходимо учесть влияние условий съемки на качество получаемых материалов.

Разобьем фотографический процесс на совокупность звеньев, определяющих информативность системы в целом. Для этого

рассмотрим схему преобразования информации об объекте, т. е. входные параметры фотографической системы, их искажение и конечную цель космической съемки — фотографическое изображение объектов местности — выходные параметры. Фотографическую систему в целом можно считать линейной, так как из-за влияния атмосферы и других факторов (светорассеяние объектива камеры и иллюминатора) изменение коэффициента контраста объектов в фотографическом изображении будет небольшой величиной. Выходной сигнал об объекте заключен в небольшом интервале.

В соответствии с современной теорией статистической оптики процесс образования изображения, начиная с объекта и кончая приемником — фотопленкой, может быть рассмотрен при помощи пространственных передаточных функций, на которые разлагается изображение с помощью двумерного преобразования Фурье. Пространственные передаточные функции позволяют рассматривать влияние каждого звена системы как нормированную функцию передачи информации $T(N_x, N_y)$, независимо от основной системы передачи изображения, и оценить весь процесс в целом (N_x, N_y — пространственная частота).

Выходной сигнал системы — преобразованная звеньями информация об объекте — может быть представлен передаточной функцией всего тракта между земной поверхностью и полученным фотографическим изображением.

Рассмотрим схему прохождения пространственных частот:

1) земная или лунная поверхность с пространственным спектром $Q_{об}(N_x, N_y)$;

2) атмосфера с передаточной функцией $T_{атм}(N_x, N_y)$;

3) иллюминатор космического летательного аппарата $Cu(N_x, N_y)$;

4) оптические детали космической съемочной камеры (объектив, выравнивающее стекло, светофильтр) $T_{об}(N_x, N_y)$;

5) светорассеяние камеры $C_k(N_x, N_y)$;

6) оптическая диффузия пленки $T_{д.пл}(N_x, N_y)$;

7) химическая диффузия: пленки $T_{х.пл}(N_x, N_y)$ — фотохимическая обработка.

Энергетический спектр пространственных частот может быть представлен зависимостью

$$Q_{ф}(N_x) = [T_{атм}(N_x) T_{об}(N_x) T_{д.пл}(N_x) T_{х.пл}(N_x)]^2 C_u^2(N_x) Q_{об}(N_x), \quad (297)$$

где $Q_{ф}(N_x)$ — спектральное яркостное распределение фотографического изображения объектов (преобразованный энергетический спектр).

Формула (297) определяет энергетические соотношения при анализе информативности космических съемочных систем.

§ 67. ИНФОРМАЦИЯ ОБ ОБЪЕКТЕ СЪЕМКИ

Первое звено системы — информация об объекте — совокупность статистически связанных между собой случайных величин яркости.

Известны зависимости, характеризующие состояние объекта и определяющие уровень контраста изображения: яркость объекта B , контраст объекта K_0 , интервал яркости и деталь яркости Δ , коэффициент яркости \bar{r} .

$$B = E\bar{r}/\pi, \quad (298)$$

где E — освещенность объекта; B_0 — яркость абсолютно белой поверхности,

$$\bar{r} = B/B_0, \quad (299)$$

$$K = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \quad (300)$$

$$U = B_{\max}/B_{\min}. \quad (301)$$

При исследовании статистического распределения объектов по контрасту установлено, что наибольшее количество объектов земной поверхности имеет малый контраст ($K=0,2-0,3$).

§ 68. ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРЫ НА ИНФОРМАЦИЮ ОБ ОБЪЕКТЕ

Рассматривая второе звено общей схемы фотографического процесса — атмосферу, следует отметить, что ее влияние приводит к таким нежелательным явлениям, как ослабление контраста, уменьшение разрешающей способности и уменьшение отношения сигнала к шуму.

Известно, что при прохождении лучистого потока через атмосферу он будет рассеиваться и поглощаться составляющими атмосферы. Коэффициент рассеяния m_λ для различных длин волн зависит от параметров рассеивающих частиц A и определяется эмпирическим равенством:

$$m_\lambda = A \cdot \lambda^{-0,7}, \quad (302)$$

где λ — длина волны.

Наличие рассеяния приводит к появлению свечения задымленного слоя атмосферы — дымки. Яркость дымки на высоте H приближенно равна

$$B_d = B_{\Phi_1} (1 - e^{-0,13H}), \quad (303)$$

где B_{Φ_1} — яркость всей толщи дымки. Яркость дымки при наклонном наблюдении зависит также от угла визирования

$$B_d(\text{н. } \beta) = B_{\Phi_\beta} (1 - e^{-m}), \quad (304)$$

B_{Φ_β} — яркость толщи атмосферы в направлении угла визирования θ .

Для нахождения степени ослабления контраста надо знать коэффициент задымленности κ

$$\kappa = B_d/B_0\tau, \quad (305)$$

где B_0 — яркость горизонтальной абсолютно белой поверхности; τ — коэффициент пропускания толщи атмосферы m .

Снижение контраста объектов K_t тем больше, чем больше яркость дымки, т. е. чем больше рассеяние в атмосфере:

$$\begin{aligned} K_t &= \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max}}; \quad K'_t = \frac{B'_{\max} - B'_{\min}}{B'_{\max}} = \\ &= \frac{(B_{\max}\tau + B_d) - (B_{\min}\tau + B_d)}{B_{\max}\tau + B_d} = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} \left(1 + \frac{B_d}{\tau B_{\max}}\right)}; \\ K_t &< K'_t. \end{aligned} \quad (306)$$

Таким образом, ослабление контраста зависит от величины коэффициента задымленности и значения коэффициента яркости наблюдаемого объекта. Следует отметить, что коэффициент задымленности уменьшается при увеличении длины волны излучения, а коэффициент яркости увеличивается, т. е. при переходе от видимых к инфракрасным излучениям будет уменьшаться степень ослабления контраста в задымленной атмосфере.

Яркость воздушной дымки является одной из причин уменьшения разрешающей способности R изображения. Влияние дымки сводится к одинаковому снижению контраста на всех пространственных частотах:

$$\frac{K'_t}{K_t} = \frac{1}{1 + \frac{\kappa}{\tau r}} = C, \quad (307)$$

где K'_t — преобразованный контраст объектов; K_t — контраст объектов; κ — коэффициент задымленности; τ — коэффициент пропускания толщи атмосферы; r — коэффициент яркости объекта.

Передаточная функция, описывающая влияние турбулентности атмосферы $T_{\text{атм}}$ (т. е. изменение волнового фронта из-за влияния атмосферы), может быть представлена функцией Гаусса

$$T_{\text{атм}}(N_x N_y) = e^{-2\pi^2 r^2 f'^2 (N_x^2 + N_y^2)}, \quad (308)$$

где f' — фокусное расстояние оптической системы; r — численный множитель.

§ 69. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБЪЕКТИВА

Оптический блок космической камеры состоит из объектива, топонометрического устройства и оптических деталей (светофильтр, прижимное стекло).

Объектив КСК предназначен для построения оптического изображения объектов фотографируемой поверхности и определяется основными характеристиками: фокусным расстоянием, углом поля зрения, диаметром входного отверстия оптической системы, светосилой, светотехническими характеристиками (пропускание, рассеяние, падение освещенности от центра к краю), разрешающей способностью. Кроме того, качество оптического изображения в значительной мере определяет степень устранения разного рода аберраций.

Эти характеристики позволяют оценить качество оптической системы, но не полностью определяют весь процесс построения изображения в фокальной плоскости. Определение искажения выходного сигнала по исходному входному может быть выражено пространственно-частотной характеристикой оптической системы. Пространственно-частотную характеристику можно рассматривать как амплитудную пространственно-частотную характеристику (АПЧХ) и фазовую пространственно-частотную характеристику (ФПЧХ) сдвига ψ , создаваемого приемником, от пространственной частоты N_x, N_y :

$$T(N_x, N_y) = |T(N_x, N_y)| e^{-j\psi(N_x, N_y)}. \quad (309)$$

Определение пространственно-частотных характеристик позволяет судить о зависимости контраста объекта от пространственной частоты на входе и выходе системы. Известно, что контраст объекта определяется по формуле

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{E_1}{E_0}, \quad (310)$$

где E — облученность объекта.

Учитывая, что контраст объекта изменен из-за влияния атмосферы, обозначим его новое значение K_0' . После прохождения одного из звеньев общего процесса космической съемки — объектива контраст K_u в фокальной плоскости будет

$$K_u = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \frac{B_1}{B_0}. \quad (311)$$

Лучистость связана со своим спектром Φ_B преобразованием Фурье

$$B(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_B(N_x) e^{j2\pi N_x x} dN_x. \quad (312)$$

Облученность, используя преобразования Фурье, представим в следующем виде:

$$E(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_E(N_x) e^{j2\pi N_x x} dN_x. \quad (313)$$

Спектр лучистости изображения Φ_B равен спектру входной облученности, умноженному на ПЧХ приемника,

$$\Phi_B(N_x, N_y) = \Phi_E(N_x, N_y) T(N_x, N_y). \quad (314)$$

После преобразования получим

$$K_u(N_x) = \frac{E_1}{E_0} T(N_x) = K_0(N_x) T(N_x), \quad (315)$$

где

$$T(N_x) = \frac{K_u(N_x)}{K_0(N_x)}.$$

Нормированная ПЧХ представляет собой зависимость от пространственной частоты отношения контраста на выходе приемника к контрасту на его входе.

ПЧХ объектива зависит как от качества оптической системы, так и от ее энергетических характеристик. Она определяется передаточными характеристиками объектива — функцией рассеяния точки и функцией рассеяния линии. Распределение облученности в изображении точки или тонкой линии, создаваемой оптической системой, зависит от качества оптической системы, от ее энергетических характеристик. Она определяется дифракцией и абберациями объектива, длиной волны света, излучаемого объектом, изменяется по полю зрения оптической системы. Зная функции рассеяния точки, можно построить распределение облученности в изображении объекта, если известно распределение лучистости в плоскости объекта.

Между функцией рассеяния точки $g_0(x, y)$ и функцией рассеяния линии $g_L(x)$ существует связь

$$g_L(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_0(x, y) dy. \quad (316)$$

Переходная функция $p(h)$ — это распределение освещенности в изображении оптической системой резкого края объекта с лучистостью B_0 :

$$h_x = A \int_{-\infty}^{\infty} B_0 g_L(\eta) d\eta. \quad (317)$$

При некогерентном освещении функция рассеяния точки оптической системы равна

$$g_0(x, y) = |e(x, y)|^2 = e(x, y) e^*(x, y). \quad (318)$$

Применив теорему свертки и преобразовав произведения, получим соотношения для пространственно-частотной характеристики объектива

$$T(N_x N_y) = \frac{\iint_{-\infty}^{\infty} f(N_\beta N_\gamma) f^*(N_\beta - N_x)(N_\gamma - N_y) dN_\beta dN_\gamma}{\iint_{-\infty}^{\infty} |F(N_\beta, N_\gamma)|^2 dN_\beta dN_\gamma}, \quad (319)$$

где N — пространственная частота гармоники лучистости;

$$N_x = \frac{1}{x} \left[\frac{\text{пер}}{M} \right], \quad (320)$$

x — период гармоники.

Передачные частотные характеристики объектива определяют экспериментально, измеряя одномерную ПЧХ, характеризующую передачу контраста для одномерных гармонических сигналов.

§ 70. ИСКАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ОБ ОБЪЕКТЕ ПРИЕМНИКОМ ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ

Рассмотрим следующее звено съемочной системы, определяющее качество фотоснимков.

Изображение объектов $E(x, y)$, создаваемое объективом на поверхности пленки, несколько размывается в толще эмульсионного слоя и преобразуется в эффективную освещенность $E_n(x, y)$, форма которой отлична от $E(x, y)$. Это происходит потому, что световой поток рассеивается зернами эмульсии. Кроме того, воспроизведение мелких объектов, расположенных рядом с яркими участками ландшафта, ухудшается из-за химической диффузии, т. е. истощенный проявитель от участков пленки, получивших большую экспозицию, диффундирует к слабо экспонированным участкам, а концентрированный проявитель — в противоположном направлении.

Входной и выходной сигналы описываются соответственно двухмерными пространственно-частотными спектрами количества освещения $S_n(N_x, N_y)$ и коэффициентом пропускания пленки $S_\psi(N_x, N_y)$. Каждая составляющая пространственно-частотного спектра характеризуется пространственной частотой (N_x, N_y) , амплитудой H и фазой ψ . При передаче этих сигналов пленкой происходит ослабление их амплитуд. Фазово-частотная характеристика пленки вследствие осевой симметрии весовой функции равна нулю, и ПЧПФ содержит только амплитудно-частотную характеристику. Значение ПЧХ в точке с координатами x, y дает соотношение между амплитудами гармо-

нических пространственных выходного и входного сигналов, пространственная частота которых N_x, N_y .

Выходной сигнал вычисляется по формуле

$$S_{\tau_n}(N_x N_y) = S_n(N_x N_y) T'_{\text{пл}}(N_x N_y). \quad (321)$$

Передаточные характеристики $g(x, y)$ и $T_{\text{пл}}(N_x, N_y)$ связаны между собой преобразованием Фурье. Пространственно-частотная передаточная функция для негатива имеет вид

$$T_{\text{пл}}(N_x N_y) = \iint_{-\infty}^{\infty} g(x, y) e^{-j2\pi(N_x x + N_y y)} = \gamma_n T'_{\text{пл}}(N_x N_y). \quad (322)$$

Форма передаточной функции пленки зависит от величины и характера оптической и химической диффузий.

§ 71. УЧЕТ ТРАЕКТОРНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КЛА

Одним из основных преимуществ использования аппарата передаточных функций является возможность учета факторов движения носителя при суммарной оценке или анализе качества полученного фотографического изображения. К факторам движения относят следующие перемещения носителя или фотокамеры за время экспозиции: вибрация детерминированного характера, колебания случайного характера и сдвиг изображения за счет траекторного движения КЛА.

Вибрацию детерминированного характера в условиях космических съемок можно не принимать во внимание, так как съемка с КЛА производится при неработающих двигателях носителя.

Колебания случайного характера являются следствием влияния непредвиденных факторов на положение КЛА в момент экспозиции.

Таковыми факторами могут быть траекторные возмущения, работа различных приборов, в том числе затвора фотокамеры, и т. п. Можно считать подобные перемещения чисто случайными и являющимися следствием влияния множества факторов. В этом случае вероятность отклонения изображения при колебаниях случайного характера будет иметь нормальное распределение, т. е.

$$P(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}a} e^{-\frac{r^2}{2a^2}}, \quad (323)$$

где a — среднеквадратическое отклонение изображения.

Из приведенного равенства следует, что точечный источник из-за колебаний случайного характера будет изображаться с неравномерным распределением интенсивности.

Сдвиг изображения вследствие траекторных перемещений КЛА по направлению полета удовлетворительно описывается следующим условием:

$$L(x) = 1/a, \quad \left. \begin{array}{l} -1 \leq x \leq +1 \\ a < -1; \quad a > +1 \end{array} \right\} \quad (324)$$

Передаточная функция имеет большое прикладное значение в различных отраслях техники. Она описывается следующей зависимостью:

$$T(f) = \sin \pi af / \pi af. \quad (325)$$

§ 72. КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ФОТОИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ПОГРАНИЧНЫМ КРИВЫМ

Говоря о резкости фотоизображения, мы в большинстве случаев имеем в виду четкость разграничения смежных полей фотоизображения, которую воспринимает глаз дешифровщика.

На фотоснимке все линии имеют ширину и являются по существу не линиями, а полосами — штрихами, т. е. всегда имеется некоторая пограничная зона между двумя объектами. Вследствие природы фотоизображения пограничная зона имеет вид плавного перехода от большей плотности первого поля к меньшей, который называется зоной перехода. Если имеем два таких поля (элементарных участка местности фотоснимка) и измерим их при помощи микрофотометра поперек зоны плотности перехода, то получим кривую, которую называют пограничной кривой.

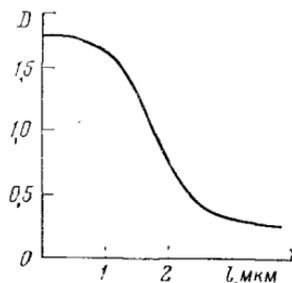


Рис. 65.

Форма пограничной кривой определяет резкость изображения границы между смежными полями.

Анализ пограничных кривых, построенных для зон перехода, между элементарными смежными полями фотоизображения показывает, что у резких границ кривая имеет крутой наклон прямолинейного участка и короткие плечо и пятку. По мере увеличения сдвига изображения кривая становится более полой, а пятка и плечо будут вытягиваться.

При микрофотометрировании главная задача — правильно выбрать объект на фотонегативе, для которого следует строить пограничные кривые с целью оценки качества фотоизображения. На основании многочисленных опытов установлено, что в качестве такого объекта следует брать объекты с резким переходом от светлого к темному (например, граница между освещенной солнцем и теневой частью крыши, а также между крышей и землей). При этом ширина объекта по направлению

движения записи микрофотограммы должна быть не менее чем 0,3 мм (во избежание влияния микроэффектов).

Кроме формы пограничной кривой на восприятие резкости будет влиять разность плотностей смежных деталей и абсолютное значение оптических плотностей этих деталей. При сравнении пограничных кривых это обстоятельство должно учитываться.

Пограничная кривая $D=f(x)$, характеризующая зону перехода в фотоизображении, может быть численно оценена несколькими способами, каждый из которых имеет свои особенности и специфику применения.

Возможно оценивать резкость фотоизображения величиной градиента прямолинейной части пограничной кривой (ее максимальным градиентом):

$$G_{\max} = \left(\frac{dD}{dx} \right)_{\max}. \quad (326)$$

Субъективная оценка резкости фотоизображения определяется величиной так называемой остроты — произведением среднего квадратического градиента G^2 пограничной кривой на интервал (разность) оптических плотностей, соответствующих началу и концу пограничной кривой (рис. 65).

$$A = (D_B - D_A) G^2 = \frac{D_B - D_A}{X_B - X_A} \int_A^B \left(\frac{dD}{dx} \right)^2 dx. \quad (327)$$

Для этой цели используют также другую величину:

$$\sigma = \frac{1}{D_B - D_A} \int_A^B \left(\frac{dD}{dx} \right)^2 dx. \quad (328)$$

Для оценки по (328) требуется вычислить интеграл $\int_A^B \left(\frac{dD}{dx} \right)^2 dx$,

что представляет довольно трудоемкую операцию. В настоящее время нет определенного мнения о сравнительных достоинствах того или иного критерия оценки. Резкость изображения оценивают, используя величину: $P = (D_B - D_A) G_{\max}$, т. е. произведение максимального градиента на интервал плотностей.

Эта последняя величина представляет собой совокупную характеристику крутизны пограничной кривой и контраста фотоизображения. Первый из множителей определяется характером светорассеяния в слое и распределением эмульсионных кристаллов по индивидуальной светочувствительности, а второй — соотношением действующих экспозиций и распределением кристаллов по светочувствительности в условиях слоя.

Опыты показали, что оценка «величины остроты A » является наиболее чувствительной. Оценка по (328) σ наименее чувствительна. Между этими крайними случаями находится оценка по максимальному градиенту.

§ 73. МЕТОД ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ МОДУЛЯЦИИ

Передачная функция модуляции (ПФМ) описывает свойства оптической системы как передатчика пространственных частот.

Установлено, что если в качестве тест-объекта взять линейную структуру с синусоидальным распределением яркостей в направлении, перпендикулярном к линиям, и изменяющейся по определенному закону пространственной частоты, то изображение этой структуры, даваемое фотографической системой, обладает таким же синусоидальным распределением, но с уменьшением величины контраста.

Контрасты тест-объекта K_N и изображения K'_N определяются формулами

$$K_N = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}}; \quad (329)$$

$$K'_N = \frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}}. \quad (330)$$

Связь между величинами контрастов, вычисляемых по этим формулам, устанавливается выражением

$$K_N = \frac{U - 1}{U + 1} = \frac{K}{2 - K}. \quad (331)$$

Коэффициент T_N , показывающий степень уменьшения контраста A_n в изображении при какой-либо частоте N по сравнению с исходным контрастом A_m , называется коэффициентом передачи контраста, т. е.

$$T_N = A_n/A_m = K'_N/K_N; \quad T_N < 1. \quad (332)$$

Суммирующий коэффициент T_N , определенный для различных пространственных частот в пределах от 0 до частоты N_n , называется передачной функцией модуляции фотографической системы. Таким образом, ПФМ есть функция $T(N)$, которая зависит от частоты N , но, кроме того, $T(N)$ зависит от угла поворота тест-объекта по отношению к меридиональной плоскости оптической системы, что определяется изменением апертуры.

ПФМ выражается в виде кривой. Частота соответствует пороговому контрасту $B_{\text{порог}}$, т. е. такому контрасту, который еще

может быть воспринят при данных условиях наблюдения. Такая частота называется граничной частотой, определяющей предел разрешения.

Как правило, ПФМ представляет собой монотонно убывающую по частоте функцию.

Физическими причинами, определяющими монотонный характер ПФМ для фотообъективов, являются дифракция света, остаточные аберрации и влияние фотографического слоя (рассеяние света в эмульсионном слое, степень разнообразия эмульсионных кристаллов по светочувствительности).

Преимущества ПФМ как критерия качества можно видеть из сравнения кривых на рис. 66.

Очевидно, фотографические системы, свойства которых описываются кривыми, несмотря на одинаковую граничную частоту

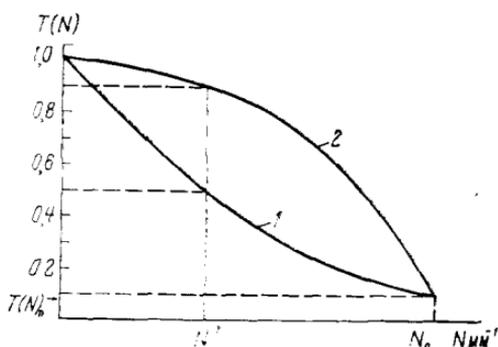


Рис. 66.

N_n , по-разному воспроизводят контрасты частот $N < N_n$. Например, система 1 воспроизводит частоту N' с контрастом 0,4, а система 2 передает ту же частоту с более высоким контрастом — 0,8, т. е. качество этой системы более высокое.

Достоинством ПФМ как критерия качества фотографической системы является простая связь ПФМ с другими факторами, оказывающими влияние на качество

аэрофотозображения. Эта связь имеет вид

$$T(N)_{\phi} = T(N)_0 T(N)_s T(N)_w T(N)_z \dots \quad (333)$$

где $T(N)_{\phi}$ — результирующая КЧХ фотографической системы; $T(N)_0$ — ПФМ объектива; $T(N)_s$ — ПФМ фотопленки; $T(N)_w$ — ПФМ, определяющая влияние сдвига изображения, обусловленное перемещением КСК при экспонировании; $T(N)_z$ — ПФМ, описывающая влияние воздушной дымки.

К недостаткам критерия можно отнести сложность определения графика $T(N)$. Кроме того, метод ПФМ пока еще не имеет эффективного показателя, который позволял бы одним числом оценить всю информацию о качестве фотозображения, которую несет в себе кривая, описывающая ПФМ.

В качестве такого числа некоторые исследователи склонны использовать площадь под кривой $T(N)$. Однако такой показатель пока еще не получил всестороннего признания.

ПФМ реального фотоснимка, не имеющего изображения специального тест-объекта, может быть получена расчетным пу-

нем; по результатам микрофотометрирования изображений некоторых объектов.

Расчетный способ дает приближенное, но вполне удовлетворительное для практики решение задачи. ПФМ негатива может быть определена микрофотометрированием, если на нем имеются изображения объектов, характеризующиеся резким изменением яркости — скачком яркости.

Для этого случая ПФМ негатива может быть представлена в виде экспотенциальной функции

$$T(N)_\phi = \exp \left[-\pi \left(\frac{N}{\phi_{н\max}} \right)^2 \right], \quad (334)$$

где N — пространственная частота; $\phi_{н\max}$ — максимальный градиент.

$$\phi_{н\max} \cong \frac{\left(\frac{dD}{dx} \right)_{\max}}{\delta D}, \quad (335)$$

где δD — фактический перепад оптических плотностей в изображении скачка яркости; Dd/dx — градиент пограничной кривой.

Как видно, в данном случае градиент $\phi_{н\max}$ может быть определен по проявляемому изображению скачка яркости даже тогда, когда не производится сенситометрический контроль проявления. Величина $\phi_{н\max}$ характеризует полосу размытости Δx в изображении скачка яркости.

Значение результирующей функции $T(N)_\phi$ позволяет с некоторым приближением определить размеры разрешенных на аэроснимке объектов для реальных условий фотосъемки. Так как $T(N)_\phi = K'N/KN$, то, приняв для объекта в виде П-образной решетки $K_{x,n} = 0,3-0,04$, получим

$$T(N)_\phi \approx 1,35K_{x,n}. \quad (336)$$

§ 74. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КАЧЕСТВА ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ВЕЛИЧИНЕ ПОСТОЯННОЙ ЗАКОНА ГАУССА

При исследовании фотографической системы по пограничным кривым, полученным в результате исследования фотоизображения, целесообразно иногда определять ПФМ системы по величине постоянной закона Гаусса.

Известно, что функция рассеяния линии связана с пограничной кривой уравнением

$$A(x) = dH(x)/dx, \quad (337)$$

где $H(x)$ — пограничная кривая, которая несет в себе всю информацию о свойствах фотографической системы.

Используя прямое преобразование Фурье по известной функции рассеяния линии, можно вычислить ПФМ и уравнение

$$W(jN) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(x) e^{-i2\pi N x} dx, \quad (338)$$

где N — пространственная частота; x — линейная координата плоскости.

Однако эта операция требует большого количества вычислений. Если же функцию рассеяния аппроксимировать аналитическим выражением, то процесс получения ПФМ значительно упрощается.

На основании многочисленных теоретических и экспериментальных предпосылок результирующая функция рассеяния фотографической системы с учетом факторов полета с достаточной точностью может быть описана законом Гаусса

$$A(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (339)$$

где σ — постоянная закона Гаусса.

Учитывая это, можно написать выражение для вычисления ПФМ

$$W(N) = e^{-2\pi\sigma^2 N^2}. \quad (340)$$

Полученное выражение показывает, что ПФМ в этом случае однозначно определяется одним параметром — постоянной закона Гаусса σ .

Значение σ можно определить графически, если известна функция рассеяния. Выражение для нормированной функции рассеяния имеет вид

$$A_H(x) = e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}. \quad (341)$$

При $x=0$ значение $A_H(x)$ равно

$$A_H(x)_{x=0} = e^{-\frac{1}{2}} = 0,605. \quad (342)$$

Постоянная σ имеет смысл при значении функции рассеяния на уровне 0,6 от максимума.

Практически удобнее определять значение σ по пограничной кривой. Величину параметра σ можно определить, приравняв значение функции рассеяния максимальному градиенту нормированной переходной функции, т. е.

$$\varphi_{H \max} = (dA_H/dx)_{\max} = 1/\sqrt{2\pi}\sigma, \quad (343)$$

откуда получаем

$$\sigma = 0,4/\varphi_{H \max}. \quad (344)$$

Параметр σ можно определять и другими способами. Проинтегрировав левую и правую части уравнения

$$A(x) = dH(x)/dx, \quad (345)$$

получим

$$H(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} dx. \quad (346)$$

При $\sigma=1$ это уравнение становится выражением нормальной функции. Задаваясь значениями $x_1 = -1$ и $x_2 = +1$, получаем $H(x_1) = 0,16$ и $H(x_2) = 0,84$. Таким образом, для определения значения σ необходимо на нормированной пограничной кривой отметить точки на уровне 0,16 и 0,84 и спроектировать их на ось x . Отрезок $x_2 - x_1$ по величине будет равен 2σ .

Для большей точности аппроксимации необходимо определять значение кривой обоими способами, а в формулу $W(N) = e^{-2\pi\sigma^2 N^2}$ подставлять среднее арифметическое значение полученных величин параметра σ .

При необходимости получения высокой точности определения ПФМ можно производить с использованием ЭВМ.

Помимо привлечения методов гармонического анализа для оценки качества изобразительных систем используют и методы, основанные на подсчете количества информации в исследуемом изображении с привлечением понятия энтропии. Информационный критерий относится к статистическим методам анализа и базируется на понятии меры информации как степени выявления неопределенности исследуемого процесса, представляемого в виде исходной реализации (например, микрофотометрической регистрограммы). Мера неопределенности в битах определяется по формуле $H(x) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$, где p_i — вероятность появления в реализации конкретного события (например, на участке негатива определенной плотности).

Используя понятие энтропии, можно сравнивать по количеству бит различные реализации и, если эти реализации привязать к натурным условиям их получения, то результат сравнения может быть мерой качества проведения эксперимента, а следовательно, и мерой пропускной способности информационного канала. Чем выше H , тем потенциально больше информации несет результат эксперимента. При переходе от потенциальной H_c к полезной информации I необходимо из вычисленной энтропии вычесть энтропию шумов $H_{ш}$, присутствующих в канале передачи полезного сигнала.

Применительно к фотографическому изображению шум есть результат зернистости фотоэмульсии. Формула полезной информации в этом случае имеет вид $I = H_c - H_{ш}$. При этом H_c

определяется по микрофотометрической регистрограмме исследуемого участка, а $H_{ш}$ — по регистрограмме сенситометрического клина с такими же условиями фотохимической обработки, как у исходного негатива.

Методика оценки качества изображения с привлечением понятия энтропии основана на сравнении количества информации, получаемой при фотографировании однородных объектов различными системами. Наилучшей фотографической системой по качеству признается система с наибольшей пропускной способностью. При сравнении с другими методами оценка качества изображения с привлечением понятия энтропии обладает большей чувствительностью к изменению параметров системы, т. е. обладает большим разрешением по качеству.

§ 75. ПЕРЕДАТОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОЗИТИВНОГО ПРОЦЕССА

При многоступенном процессе окончательное изображение формируется через одно или несколько промежуточных изображений, так называемых ступеней, следующих одна за другой. При наиболее распространенном двухступенном процессе первое изображение представляет собой негатив. Если известна характеристическая кривая каждого из процессов, то можно определить характеристическую кривую всего процесса простым построением (см. рис. 61).

Зная градиенты характеристической кривой отдельных процессов g_1 и g_2 , можно рассчитать градиент сквозного процесса. Имеются

$$g_1 = dS_1/d \lg H_1, \quad g_2 = dS_2/d \lg H_2, \quad (347)$$

из

$$d \lg H_2 = -dS_1$$

следует

$$g_{12} = dS_2/d \lg H_1 = -g_1 g_2. \quad (348)$$

При наличии n процессов, следующих один за другим,

$$g_{1n} = (-1)^{n-1} \prod_1^n g_i. \quad (349)$$

Если учитывается только линейная часть характеристической кривой, то можно использовать значения γ :

$$\gamma_{12} = -\gamma_1 \gamma_2. \quad (350)$$

Для воспроизведения, при котором коэффициент пропускания пропорционален экспозиции,

$$T = H \cdot \text{const}, \quad \Delta S = -\Delta \lg H$$

должны выполняться условия

$$\gamma_{12} = -1, \quad \gamma_1 \gamma_2 = 1.$$

Это соотношение может служить примером идеального воспроизведения. Однако на практике произведение $\gamma_1\gamma_2$ выбирается значительно больше единицы для компенсации потери контраста, обусловленной рассеянием света, и разницы в условиях наблюдения объекта и изображения. Кроме того, довольно часто возникает необходимость отклонений от идеального воспроизведения, если, например, требуется воспроизвести большой интервал яркостей объекта на фотографической бумаге с ограниченным интервалом плотностей. Для изображения, получаемого на фотобумаге, рассчитывается оптимальная характеристика воспроизведения, зависящая от изображаемого объекта.

Глава XII

ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

§ 76. КЛАССИФИКАЦИЯ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СИСТЕМ

Космической телевизионной съемкой называется процесс получения изображений поверхности Земли, Луны, планет Солнечной системы с летательных аппаратов с помощью оптических, электронных и радиотехнических средств. Методы космической телевизионной съемки можно подразделить по спектральному диапазону, по назначению материалов съемки, количеству информационных каналов, по приемнику световой энергии, способу передачи информации и т. д.

Каждый метод, в свою очередь, подразделяется по тем или иным признакам и в значительной степени определяется их значением.

Классификация телевизионных систем в зависимости от области их применения приведена на рис. 67.

Телевизионная съемка производится в диапазоне длин волн 300—1100 нм. Все большее применение находит косвенный метод ультрафиолетовой телевизионной съемки, использующий датчики, чувствительные к ультрафиолетовому излучению снимаемой поверхности, сканирование которой осуществляется телесным углом зрения оптико-механическим способом с летательного аппарата. Фототелевизионные изображения могут быть получены как черно-белые, так и цветные. Телевизионные системы, применяемые на космических летательных аппаратах, можно классифицировать в соответствии с кругом решаемых задач на:

системы для съемок поверхности Земли и метеорологического наблюдения облачного покрова, Луны, съемки поверхности планет Солнечной системы;

системы ретрансляции;

видеотелеметрические системы и космовидения для контроля состояния космонавтов и бортовой аппаратуры;

инспекция состояния других космических летательных аппаратов и слежение за их движением;

системы управления космическими аппаратами;

системы для астрономических наблюдений.

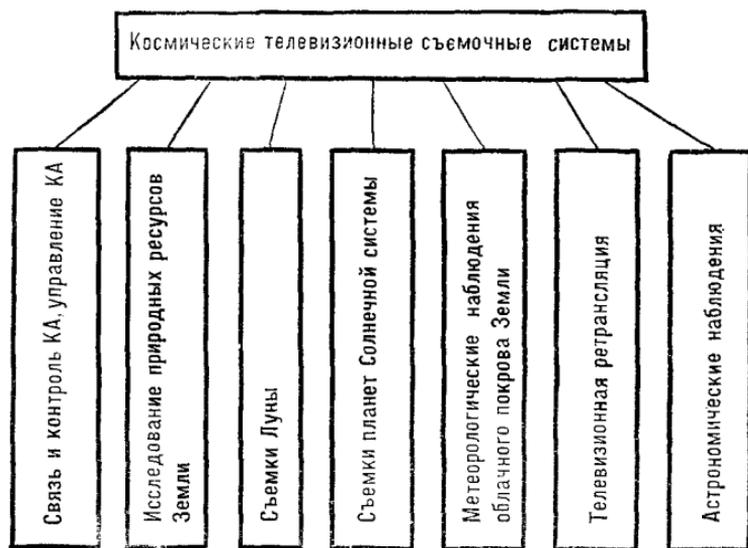


Рис. 67.

К телевизионным системам, предназначенным для выполнения съемки в целях исследования природных ресурсов, предъявляют ряд требований: съемочные материалы должны иметь высокую разрешающую способность; система должна обеспечивать передачу большого объема информации, содержащейся в одном кадре; широкий экспонетрический диапазон; малую массу камер; стойкость аппаратуры к перегрузкам и вибрациям; надежность работы в вакууме, при изменении температуры от -15 до $+70$ °С, при условиях повышенной влажности и при повышенной радиации.

Узкополосные системы передают видеосигналы диапазоном от 0,1 кГц до 0,1 мГц, широкополосные — от 0,1 мГц и более. Узкополосные системы применяют при исследовании Луны и планет Солнечной системы, когда возникает необходимость изучения спектра передаваемого сигнала из-за увеличения дальности радиолинии и ограничения мощности радиопередатчика.

При космической съемке Земли, когда необходимо получить изображение с высоким пространственным разрешением, также применяют узкополосные телевизионные системы. Для непосредственного телевизионного наблюдения значительных районов земной поверхности в реальном масштабе времени применяют широкополосные системы с расстояний до 10 тыс. км.

Телевизионные системы могут регистрировать и передавать объемное, плоскостное и линейное изображения объектов съемки. Телевизионные системы подразделяют по реализованным в них техническим признакам следующим образом:

по ширине спектра передаваемого изображения на узкополосные и широкополосные;

по типу информационных параметров лучистого потока, воспроизводимых на телевизионном изображении, на системы пространственного, спектрального и временного распределения лучистого потока;

по типу накопителя на системы с электрическим фильтром, с электронным пленочным накопителем и кадровым накопителем;

по структуре накопления системы с одноэлементным накопителем, кадровым накопителем;

по типу устройства развертки на системы механические, электронные, с разверткой в оптическом канале и в канале формирования видеосигнала;

по временным процессам на системы с одновременным накоплением и считыванием, системы с отдельными процессами накопления и считывания;

по типу линий связи на открытые с радиоприемом и замкнутые без радиоприема системы, цифровые и аналоговые системы.

В случае если происходит регистрация изображения, обеспечивающая получение информации о распределении яркости объектов в трехмерном пространстве $V(x, y, z)$, то такая система называется стереоскопической, если в двумерном $V(x, y)$, то передача плоскостная, если в одномерном $V(x)$, то линейная. На космических летательных аппаратах применяют телевизионные системы для передачи черно-белых и цветных плоскостных изображений. Стереоскопические системы более сложны, и для их практической реализации необходимо расширение полосы частот канала.

В телевизионных системах с электрическими фильтрами без накопления энергии преобразование световой энергии в электрическую происходит с помощью фотоэлемента, фотоэлектронного умножителя или диссектора. Полученный после преобразования видеосигнал усиливается видеоусилителем, причем его можно рассматривать как некоторый накопительный фильтр, что позволяет в течение интервала времени, определенного инерционностью фильтра, выполнять фильтрацию видеосигнала

от шума светоприемника. Роль электрического фильтра обычно выполняет предварительный видеоусилитель.

Преобразование света в видеосигнал осуществляется также с помощью передающей телевизионной трубки видикон, суперортикон, супериконоскоп. Накопление энергии осуществляется тонкой фотополупроводниковой пленкой (фотокатодом). На пленке происходит накопление так называемого «зарядного» изображения, которое впоследствии считывается электронным лучом. Систему с накопителем энергии в виде тонкой пленки называют системой с электронным пленочным накопителем.

Накопление световой энергии в телевизионных системах осуществляется применением фотопленки, на которую проектируется оптическое изображение местности, т. е. первоначально реализуется классический конвенциональный принцип прямого оптического проектирования на светочувствительный материал. После получения проявленного фотографического изображения происходит его преобразование в видеосигнал с помощью фотоэлектрического устройства считывания, в котором осуществлен принцип бегущего луча. Системы с накопителями световой энергии в виде фотопленки называют фототелевизионными.

Система с бегущим лучом получила применение на космических летательных аппаратах при исследовании дальнего и ближнего космоса. В системе применяется передающая телевизионная трубка, поэлементная развертка изображения производится электронным лучом. Специальный проекционный кинескоп в системе с бегущим лучом осуществляет формирование элементов и его развертку по передаваемому изображению. Телевизионные системы с передающей трубкой и поэлементной электронной разверткой изображения в оптическом канале называются электронными.

В телевизионных системах с одноэлементным накоплением процесс накопления световой энергии и ее преобразование в видеосигнал происходит только в одном элементе передаваемого изображения в каждый момент времени. Это системы «без накопления», но, с другой стороны, их все же можно отнести к накопительным системам, так как накопление (фильтрация) обязательно для выделения видеосигнала из шума. Их быстродействие зависит от постоянной времени фильтра предварительного видеоусилителя, которая может достигать большой величины.

Телевизионные системы с одноэлементным накопителем имеют механическую или электронную развертку. При механических развертках система будет медленнодействующей, так как развертка изображения в передающей, и приемной частях осуществляется с помощью инерционных механических устройств. Чтобы обеспечить формирование двухмерного изображения при любом виде развертывающего устройства, необходимо производить развертку передаваемого изображения

в двух направлениях, т. е. по кадру и строке. Если световая энергия накапливается только в течение развертки изображения по строке (однострочные системы), то для формирования телевизионного сигнала от всего изображения необходимо от-носительное перемещение камеры с однострочным накопителем и передаваемого изображения. Если формирование сигнала и процесс накопления происходят одновременно, то такая система позволяет вести непосредственную передачу изображения. Если применяют фототелевизионные системы, то процессы накопле-ния световой энергии на светочувствительном слое и считывание этого изображения разнесены во времени. Устройство запоми-нания в виде магнитных регистраторов сигналов используются как накопители информации, которая затем, во время сеансов ра-диосвязи, передается на наземные приемные устройства. Си-стема, имеющая для связи с космическим летательным аппара-том радиоприемную, называется открытой. Если передачи радио-сигналов при решении ряда технических задач на наземные станции не производится, то такая телевизионная система на-зывается замкнутой.

Для получения высококачественных телевизионных изобра-жений Земли, Луны, планет Солнечной системы применяют телевизионные камеры с разными техническими характери-стиками, работающими в разных зонах спектра. Получение изобра-жения объектов местности в виде телевизионных снимков свя-зано с комплексной реализацией таких сложных отдельных про-цессов, как образование оптического изображения снимаемого объекта, формирование видеосигнала из оптического изображе-ния, преобразование, передача и прием видеосигнала по радио-каналам, образование видимого изображения на экране кине-скопа и телевизионного снимка путем фотографирования экрана кинескопа. Для осуществления телевизионной съемки требуется совместное использование электронной оптики, радиоэлектро-ники, фотосъемки, фотографии. Для качественной обработки и привязки материалов телевизионной съемки необходимо знание законов фотограмметрии, геодезии, картографии.

§ 77. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ДРУГИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОЧНЫХ СИСТЕМ

Выбор параметров ТВ системы определяется условиями кос-мической съемки, т. е. высотой и скоростью полета КЛА, комп-лексом задач, решаемых по материалам съемки, свойствами среды, разделяющими объект и передающую часть ТВ системы. При создании ТВ систем основным требованием является то, чтобы выбранные и реализованные характеристики обеспечи-вали в конечном итоге построение телевизионного изображения, подобного оптическому изображению объекта местности. Основ-

ные характеристики телевизионных съемочных систем подразделяют на общие (технические) и специальные, причем это подразделение условно. Телевизионная система характеризуется разрешающей способностью системы, световой чувствительностью, световой характеристикой, числом передаваемых градаций яркости, свойствами входящих в систему элементов, особенно-стями построения системы.

К специальным характеристикам относят зону захвата на местности, масштаб изображения, время и дальность передачи телевизионных сигналов, дальность визирования объектов и др. В значительной степени специальные характеристики телевизионной системы зависят от параметров и условий полета КЛА. Действие внесенных помех приводит к искажению видеосигнала, что определяет качество воспроизводимого телевизионного изображения и существенно влияет на многие характеристики системы. При выполнении аэрокосмических съемок по телевизионным изображениям производят обнаружение и дешифрирование объектов местности, полученных при определенном уровне освещенности, контрасте объекта и фона, дальности передачи, определенном угле захвата. Способность телевизионной системы передавать и воспроизводить на приемной стороне с предельной или заданной различимостью изображение мелких деталей снимаемой поверхности называется разрешающей способностью. Она измеряется максимальным числом ν чередующихся тонких черных и белых линий равной ширины, укладываемых на отрезке, равном ширине квадрата раstra, и наблюдаемых на экране с заданной различимостью. Угловое разрешение определяется наименьшим углом φ_0 , под которым еще различимы две близко расположенные точки изображения. Разрешающей силой S телевизионной системы называется величина, обратная значению φ_0 . Между величинами ν и S существует следующая зависимость: $\nu = S \operatorname{tg} \alpha$, где α — половина угла зрения телевизионной системы. Следует отметить, что при определении разрешающей способности, отнесенной к снимаемой поверхности, пользуются также понятием разрешающей способности системы на местности, которое определяется как минимальное расстояние A_0 между двумя границами объекта, при котором они еще различаются раздельно. На величину A_0 влияет сферичность поверхности Земли, высота съемки и путевая скорость летательного аппарата, время экспозиции, светотехнические параметры: объектив фотосъемочной камеры и воспринимающей телевизионной трубки, полосы частот видеоусилителя и канала связи. Разрешающая способность зависит также от характеристик наземной приемной аппаратуры. Изменение размера разрешающего элемента из-за сферичности поверхности Земли определяется формулой

$$A_0 = H \sec^2 \alpha \frac{\sin (2\alpha/N_K)}{\cos (2\alpha/N_K) - \operatorname{tg} \alpha \sin (2\alpha/Z)}, \quad (351)$$

где A_0 — размер разрешаемого элемента; H — высота полета КЛА; α — половина угла зрения телевизионной камеры; Z — число строк; N_k — число элементов разложения изображения в кадре. Разрешающая способность на местности будет уменьшаться с увеличением угла α , т. е. на краях кадра она будет резко падать.

В связи с динамическими условиями съемки разрешающая способность будет уменьшаться из-за смещения изображения за время построения кадра и появления сдвига изображения, влияющего на его четкость. С учетом только линейного движения КЛА условие отсутствия сдвига (смаза) δ_v определится зависимостью

$$\delta_v = fvT_k/H \leq l_{фк}/2Z\alpha, \quad (352)$$

где v — путевая скорость носителя; $l_{фк}$ — расстояние на местности между ограничивающими угол зрения лучами; T_k — время экспонирования («засветки») кадра; $Z\alpha$ — активное число строк в кадре (число строк за время прямого хода кадровой развертки).

На разрешающую способность будут влиять также угловые колебательные движения относительно собственного центра массы со скоростью $\omega_{лв}$. Они возникают и при наличии системы стабилизации. Отсутствие смещения будет при условии

$$\omega_{лв} \leq \varphi_0/T_э. \quad (353)$$

Угловая скорость $\omega_{лв}$ содержит составляющие, которые зависят от поступательного перемещения КЛА и объекта ω и вращения вокруг центра массы $\omega_{вр}$. Разность скоростей КЛА v и объекта $v_{об}$, а также высота полета H определяют составляющую $\omega \approx (v - v_{об})/H$. Можно написать:

$$(v - v_{об})/H + \omega_{вр} \leq \varphi_0/T_э,$$

откуда определим время экспонирования

$$T_э \leq \frac{\varphi_0}{(v - v_{об})/H + \omega_{вр}}. \quad (354)$$

Если период времени $T_э$ значителен, то вводят компенсацию смещения изображения с помощью разворота телевизионной камеры в сторону, противоположную смещению. Если условия съемки идеальны, то наименьший угол $\varphi_{обн}$, под которым наблюдается объект, будет составлять $\varphi_{обн} \approx (3 \div 4)\varphi_{фк}$, так как объект на телевизионном изображении обнаруживается лишь при условии, когда его проекция на фотокатод перекрывает несколько строк (три-четыре), а в случае сложной формы объекта опознавание будет выполнено при условии

$$\varphi_{обн} \approx (5 \div 15)\varphi_{фк}.$$

Система даст хорошее разрешение при условии, что $\varphi = 2\alpha\Delta Z/Z_a$, где ΔZ — число строк, перекрываемых проекцией

наблюдаемого изображения на фоточувствительной поверхности передающей трубки, при условии обнаружения объекта; Z_a — активное число строк в кадре. При этом параметры разложения изображения должны быть согласованы с параметрами радиометрии и приемным устройством телевизионного изображения. Разрешающая способность A_0 реальной системы определится при условии, если будут известны число активных строк в кадре Z_a , линейный размер рабочей поверхности мишени передающей трубки $l_{фк}$, угол поля зрения оптической системы 2α , высота полета H и число строк ΔZ , перекрываемых проекцией изображения. Тогда:

$$A_0 = 2H\Delta Z (\operatorname{tg} \alpha) / Z_a. \quad (355)$$

Для того чтобы увеличить разрешающую способность, как это видно из формулы (355), необходимо уменьшить угол поля зрения системы, увеличить фокусное расстояние оптической системы камеры и увеличить число строк в растре Z_a . Но уменьшение угла поля зрения резко сократит зону захвата на местности, что крайне нежелательно. Поэтому на КЛА обычно применяют две телевизионные системы: широкоугольную (короткофокусную) и с малым углом поля зрения (длиннофокусную).

Чувствительность телевизионной системы определяется минимальной освещенностью, при которой система дает изображение заданного качества. Освещенность объектов при съемке изменяется в широких пределах и чувствительность системы оценивается величиной, обратной минимальной освещенности объекта $E_{об \min}$ наиболее яркого участка, при которой с необходимой резкостью воспроизводятся мелкие детали объекта. Если происходит уменьшение освещенности, то уменьшается и разрешающая способность системы, так как уменьшается отношение сигнал/шум на выходе системы. Для обеспечения качества изображения значение отношения сигнал/шум системы должно быть не меньше некоторого порогового значения $\psi_{пор}$ (часто принимают $\psi_{пор} = 41$ дб).

Требуемая освещенность, при которой возможна работа ТВ системы, рассчитывается по формуле

$$E_{фк} = 0,25 E_{мр} \tau_{атм} \tau_0 (D/f)^2, \quad (356)$$

где $E_{м}$ — освещенность местности; ρ — средний по площади коэффициент отражения местности; $\tau_{атм}$, τ_0 — коэффициенты пропускания атмосферы и объектива; D/f — относительное отверстие объектива.

Освещенность на местности можно пересчитать на освещенность, создаваемую на фотокатоде $E_{фк \min}$; для идеальных условий она определится формулой

$$E_{фк \min} = k Z^2 \psi_{пор}^2 / \epsilon S_{фк} T_k, \quad (357)$$

где k — коэффициент пропорциональности; ϵ — эффективность фотоэлектронного преобразователя; $\psi_{пор}$ — чувствительность

фотокатода (пороговая); $S_{\text{фк}}$ — рабочая площадь фотокатода трубки; $T_{\text{к}}$ — время передачи кадра.

Таким образом, требования по чувствительности телевизионной системы определяются разрешающей способностью, зависящей от значения $\Psi_{\text{пор}}$ и $T_{\text{к}}$ — времени экспонирования кадра, и числом передаваемых градаций яркости.

Световая характеристика телевизионной системы определяется зависимостью яркости участка телевизионного изображения в плоскости светочувствительного слоя передающей телевизионной трубки $B_{\text{из}}$ от яркости аналогичного участка передаваемого объекта $B_{\text{об}}$. Характеристика эта является нелинейной, так как световая характеристика первичного преобразователя (свет — сигнал), амплитудная характеристика усилительного тракта и световая характеристика вторичного преобразователя (сигнал — свет) оказываются нелинейными.

При наблюдении телевизионного изображения на экране видеоконтрольного устройства или при фотографировании телевизионных изображений световая характеристика имеет важное значение. Особенно важна эта характеристика, если с помощью телевизионной системы проводятся фотометрические измерения наблюдаемой поверхности. В этих случаях световую характеристику стремятся сделать линейной, чтобы обеспечить пропорциональную передачу полутонов изображения. Можно получить выражение световой характеристики, для этого нужно знать функции передачи первичного преобразователя $U_{\text{вх кс}} = f_1(B_{\text{об}})$, канала связи $U_{\text{вых кс}} = f_2(U_{\text{вх кс}})$ и вторичного преобразователя $B_{\text{из}} = f_3(U_{\text{вых кс}})$, где $U_{\text{вых кс}}$ — сигнал на выходе первичного преобразователя (на выходе канала связи); $U_{\text{вх кс}}$ — сигнал на входе канала связи. Указанные зависимости определены опытным путем:

$$u_{\text{вх кс}} = k_1 B_{\text{об}}^{\gamma_1}; \quad U_{\text{вых кс}} = k_2 U_{\text{вх кс}}^{\gamma_2}; \quad B_{\text{из}} = k_3 U_{\text{вых кс}}^{\gamma_3}, \quad (358)$$

где k_1, k_2, k_3 — коэффициенты пропорциональности; $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ — показатели степени, которые определяют форму кривой.

Решая систему уравнений, получим $B_{\text{из}} = k B_{\text{об}}^{\gamma}$, где $k = k_3 k_2^{\gamma_3} k_1^{\gamma_1 \gamma_3}$ — общий коэффициент пропорциональности си-

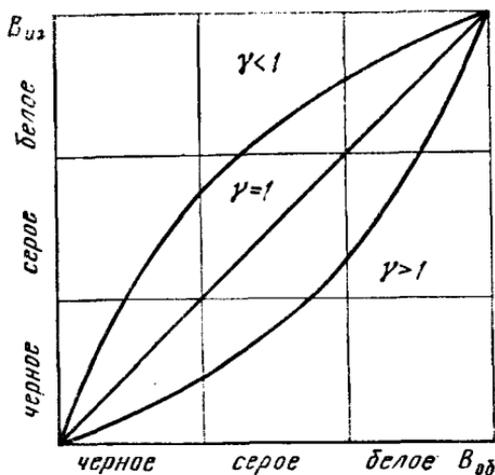


Рис. 68.

стемы; $\gamma = \gamma_1 \gamma_2 \gamma_3$ — коэффициент воспроизведения контраста изображения (гамма-коэффициент телевизионного канала).

Световые характеристики для трех значений гамма-коэффициентов представлены на рис. 68. При $\gamma = 1$ контраст и полутона изображений передаются без искажений. При $\gamma > 1$ передача изображений производится с повышенным контрастом, т. е. светлые полутона в изображении подчеркиваются. В случае когда $\gamma < 1$, передача изображения происходит с пониженным контрастом, т. е. темные тона в передаваемом изображении подчеркиваются. Наилучшие распознавания деталей на телевизионном изображении, как показывает опыт, происходят при $\gamma = 1 - 2$.

В некоторых случаях необходима коррекция световой характеристики, которая осуществляется введением соответствующей искусственной нелинейности в канал связи изменением коэффициента γ_2 . Нужно значение γ_2 при заданном значении γ определяется соотношением $\gamma_2 = \gamma / \gamma_1 \gamma_3$. Создание нелинейности в усилительном тракте можно варьировать в широких пределах, изменяя величину γ , используя различные схемные решения (гамма-корректоры).

§ 78. НЕКОТОРЫЕ СЪЕМОЧНЫЕ ТЕЛЕВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Выделение видеосигнала из общего потока полезных сигналов и шумов осуществляется фильтром, которым служит видеоусилитель. Видеоусилитель обладает определенной инерционностью по времени τ , в течение которой суммируется энергия шума и сигнала.

Рассмотрим телевизионную динамическую систему с пленочными накопителями на примере схемы, воспринимающей оптическое изображение (передающей) телевизионной трубки (рис. 69) типа видикон, где 1 — изучаемый объект, подлежащий телевизионной съемке; 2 — объектив для проектирования оптического изображения; 3 — защитная стеклянная пластина; 4 — сигнальная пластина; 5 — полупроводниковый пленочный накопитель; 6 — анод; 7 — электронный луч; 8 — электронный прожектор; 9 — термокатод; 10 — сопротивление нагрузки; $U_{сн}$ — напряжение сигнальной пластины; U_k — напряжение катода.

Во время экспозиции под действием оптического изображения $B(x, y)$, сфокусированного в плоскость пленочного накопителя, на поверхности накопительной пленки, обращенной к электронному лучу, образуется скрытое изображение в виде зарядов $Q(x, y, t)$, которое называют «зарядным». Контраст зарядного изображения определится отношением $\Delta Q/Q$, где ΔQ — величина перепада зарядов между деталями изображения.

Отметим, что более чувствительными и совершенными трубками являются супериконоскопы, супертиконы и секоны, в ко-

торых процессы накопления и считывания сочетаются с усилением потока электронов с помощью вторичной эмиссии или вторичной проводимости в секции накопления.

«Зарядное» изображение считывается с пленочного накопителя путем его развертки остро сфокусированным пучком электронов («жесткий» считывающий луч) или пучком медленных электронов («мягкий» считывающий луч).

Образование видеосигнала в телевизионных системах (фототелевизионных) происходит при считывании предварительно полученного фотографического изображения путем развертки сфокусированным световым пучком. Преимуществом фототелевизионной системы является возможность последовательного считывания фотоизображения, зафиксированного на фото-

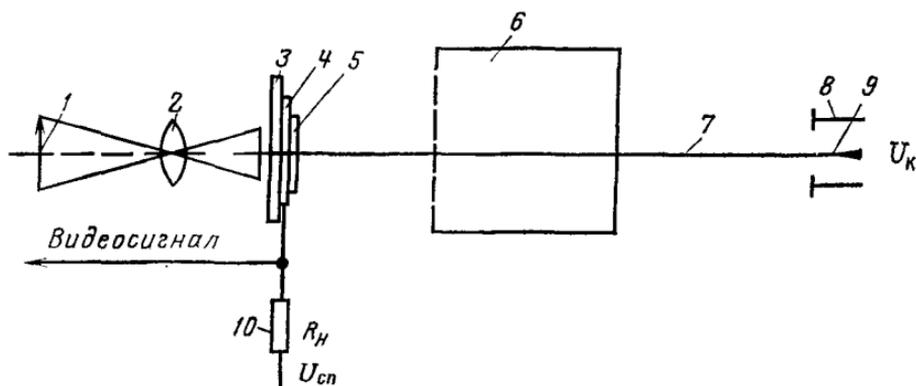


Рис. 69.

пленке, что позволяет увеличить четкость фототелевизионного изображения путем увеличения времени передачи.

Фототелевизионная система для кадровой телевизионной съемки содержит высокоточную малогабаритную фотосъемочную камеру для фоторегистрации оптического изображения на фотопленке в виде отдельных кадров, устройство автоматической обработки фотопленки по одностадийному процессу и устройство сканирования фотоизображения с целью формирования видеосигнала для последующей передачи фотоизображения наземным приемным устройствам.

Впервые фототелевизионная съемка была применена для съемки обратной стороны Луны с АМС «Луна-3» с расстояния $65,2 \div 65,8$ (тыс. км) от поверхности Луны.

Из других фототелевизионных систем, нашедших применение при космических фотосъемках, следует отметить серию АМС, которые выполняли фототелевизионную съемку поверхности Луны с орбит искусственных спутников Луны (ИСЛ). Телевизионная съемочная камера была снабжена двумя объективами с фокусным расстоянием 80 и 608 мм. Оптические оси

съемочных объективов параллельны, и оптически изображение снимаемой поверхности фиксировалось на фотопленке шириной 70 мм.

При съемке фототелевизионными камерами с АМС «Марс-2», «Марс-3» использовалась оптико-механическая развертка по строке и по кадру.

Оптико-механическое развертывающее устройство для считывания изображения в бортовых фототелевизионных устройствах АМС «Марс-2», «Марс-3» основано на автоколлимационном принципе. Его принципиальная оптическая схема показана на рис. 70, где: 1 — фотопленка, 2 — источник света, 3 — конденсор, 4 — основной объектив, 5 — автоколлимационное зеркало, 6 — диафрагма, 7 — собирательный объектив, 8 — ФЭУ, 9, 10, 11 — зеркала.

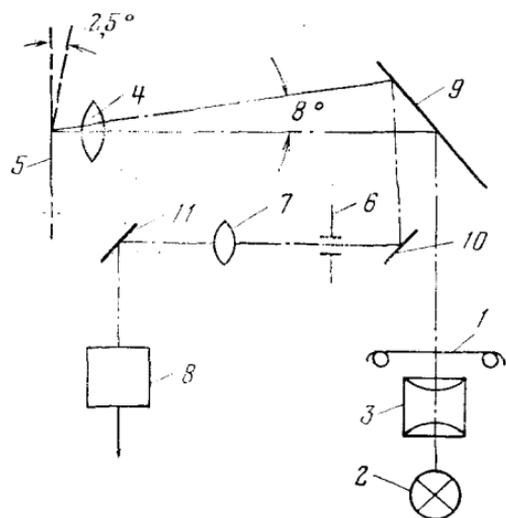


Рис. 70.

Фотонизображение данного участка фотопленки проектируется в плоскость диафрагмы 6, имеющей размеры 20 мкм и формирующей элемент развертки. Световой поток, прошедший через диафрагму 6, с помощью собирательного объектива 7 и зеркала 11 направляется на фотокатод ФЭУ. Поворотами зеркала 5 вокруг оси его вращения, вызывающего поступательное пере-

мещение фотонизображения относительно неподвижной диафрагмы 6, осуществляется строчная развертка. Строка размером $24 \times 0,02$ мм разлагается в 1200 телевизионных элементов. Кадровая развертка образуется за счет протяжки фотопленки.

Поступающая на наземные станции видеoinформация регистрируется различными способами. Фототелевизионные снимки лучшего качества получаются прямым фотографированием с экрана кинескопа на фотопленку. Хорошие результаты дает запись видеосигнала на магнитную пленку, что позволяет улучшить качество информации путем вторичной обработки видеосигнала на ЭВМ. Кроме того, индикация поступающей видеoinформации может осуществляться с помощью фототелеграфной аппаратуры.

Необходимо отметить, что основным достоинством кадровой бортовой фототелевизионной съемочной системы является возможность получения фототелевизионных снимков высокой четкости (более 10^6 элементов при небольших габаритах, массе и

энергоемкости). После автоматического проявления фотопленки осуществлялось считывание изображения и видеосигналы передавались на Землю. При считывании применялась быстройдействующая электронная развертка фотоизображения световым пятном по строке и по кадру. Интенсивность пятна регулировалась с помощью фотоумножителя. Формат мелкомасштабного кадра фотоизображения составлял 56×65 мм, а крупномасштабного 56×219 мм. Электронное сканирование производилось по дискретным участкам размером $2,5 \times 56$ мм за время 22 с. На сканирование 294-миллиметровой фотопленки для построения узкоугольного и широкоугольного фотоизображения требовалось 43 мин.

§ 79. КАДРОВАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СЪЕМКА С КОСМИЧЕСКИХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Оптическое изображение космического объекта фокусируется с помощью объектива телевизионной камеры на «экране» видикона, который выполнен из фотоэмиссионных или фотопроводящих материалов. Величина электрического заряда на элементарной площадке «экрана» пропорциональна интенсивности падающего света. Электрические заряды на «экране» сканируются обычным способом и преобразуются в видеосигналы и далее в радиосигналы с целью передачи по каналу связи.

Наземный телевизионный приемник преобразует радиосигналы в видеосигналы, которые модулируют интенсивность электронного луча в приемной электронно-лучевой трубке, который управляется синхронно во времени со сканирующим лучом передающего телевизионного элемента. Электронный луч, встречая люминофорный экран кинескопа, вызывает его свечение, интенсивность которого является функцией интенсивности электронного луча. В результате на экране кинескопа воспроизводится визуальное изображение космического объекта. Наконец, для фотографирования визуального изображения с целью получения телевизионного снимка применяется фотографическая камера.

Ширина строки на кадре зависит от формата кадра и числа строк сканирования. Если информацию вдоль одной строки разложения разбить на отдельные элементы, равные по размеру ширине строки, то получим количество отдельных видеозаписей, которые должны быть переданы на Землю. Кроме того, изображение каждого элемента должно соответствовать определенной градации плотностей.

Время передачи информации также сокращается, если изображение, полученное видиконом, предварительно записывается на магнитную ленту.

Среди кадровых телевизионных систем следует отметить телевизионные системы ИСЗ типа «Метеор» (начало действия —

1967 г.), эффективно функционирующих в течение длительного периода времени. Телевизионная аппаратура ИСЗ «Метеор» чувствительна к потоку радиации в видимом участке спектра. Назначение — съемка облачного покрова Земли и подстилающей поверхности вдоль трассы полета спутника двумя камерами. Одна камера снимает левую, а вторая — правую части полосы обзора по направлению движения спутника с небольшим перекрытием соседних кадров, причем общая ширина снимаемой поверхности составляет около 1000 км при размере элемента разрешения $1,25 \times 1,25$ км в надире и $2,0 \times 2,0$ км на краю. Формат кадра окончательно нетрансформированного телевизионного снимка 66×66 мм.

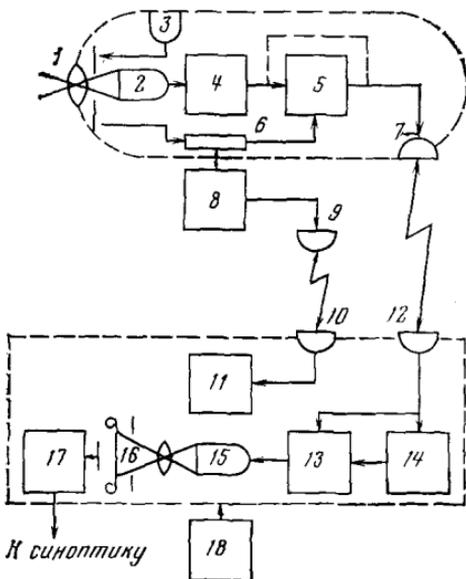


Рис. 71.

спутника; 6 — устройство регистрации моментов съемки и функционирования бортовой телевизионной аппаратуры; 7 — радиопередатчик; 8 — устройство управления и контроля работы бортовой аппаратуры; 9 — радиоприемник-радиопередатчик. Наземная аппаратура; 10 — радиоприемник и радиопередатчик; 11 — устройство контроля и программирования работы бортовой аппаратуры; 12 — радиоприемник; 13 — устройство усиления и преобразования телевизионного сигнала; 14 — устройство промежуточного запоминания информации; 15 — фотоэлектрический преобразователь; 16 — фоторегистрирующее устройство; 17 — устройство фотохимической обработки; 18 — устройство контроля и настройки наземной телевизионной аппаратуры.

Среди разнообразного съемочного оборудования, установленного на борту автоматической спутниковой системы ERTS-1 1972 г., «Лэндсат», для исследования природных ресурсов, также имелся комплект кадровых телевизионных камер. В комплекте имелись три камеры для съемки в трех спектральных

Принципиальная блок-схема телевизионной системы для кадровой телевизионной съемки с ИСЗ «Метеор» показана на рис. 71. Система состоит из бортовой и наземной аппаратуры. Бортовая аппаратура: 1 — оптическая головка; 2 — фотоэлектрический преобразователь, 3 — датчик высоты Солнца и ориентации спутника в пространстве; 4 — устройство усиления и преобразования телевизионного сигнала; 5 — устройство промежуточного запоминания информации на борту

× 1,25 км в надире и 2,0 × 2,0 км на краю. Формат кадра окончательно нетрансформированного телевизионного снимка 66 × 66 мм.

поддиапазонах: 0,475—0,575 мкм (сине-зеленая часть спектра), 0,580—0,680 мкм (красная часть спектра) и 0,690—0,830 мкм (ближняя часть ИК-излучения). Спектральный диапазон для каждой камеры определялся интерференционным фильтром в оптической системе объектива. Камеры включаются одновременно. Разрешение составляет 4125 активных линий сканирования. Диаметр мишени видикона (с обратным ходом луча) составляет 50 мм при полезной площади 25×25 мм. Камеры снабжены объективами с фокусным расстоянием 126 мм, светосилой 1:2,8 и углом поля зрения 15,9°. Кадр захватывает участок земной поверхности 185×185 км. Изображение записывается на видеоленту; предусмотрена также передача изображения телевизионных камер в реальном масштабе времени.

Телевизионные съемочные системы имеют высокое, среднее и малое разрешение. Система высокого разрешения обеспечивает распознавание деталей местности около 80 м, но имеет небольшую полосу захвата на местности — порядка 185 км («Лэндсат», США). Система среднего разрешения (МСЦ-С) обеспечивает распознавание на местности объектов порядка 140—250 м при съемке полосы 1400 км, система малого разрешения (МСЦ-М) при полосе захвата 2000 км обеспечивает разрешение на местности порядка 1 км. Основные технические данные телевизионных систем, установленных на ИСЗ, приведены в табл. 13.

Общая блок-схема телевизионной сканирующей съемочной аппаратуры представлена на рис. 72. Источники информации о поверхности Земли, представленные комплексом приборов: четырехканальное оптико-механическое сканирующее устройство малого разрешения МСУ-М — 1, 2; двухканальное оптико-механическое сканирующее устройство среднего разрешения МСУ-С — 3, 4; блок магнитной регистрации — 5, 6; хрониза-

Т а б л и ц а 13

ИСЗ	Тип системы	Спектральный диапазон, мкм
«Метеор», СССР	Бортовая телевизионная аппаратура «Метеор — Природа»	4 канала 0,5÷0,6 0,6÷0,7 0,7÷0,8 0,8÷1,2
«Метеор», СССР	Многоканальное сканирующее устройство МСЦ-М малого разрешения Многоканальное сканирующее устройство МСЦ-С среднего разрешения	2 канала 0,43÷0,75 0,77÷1,02
США	Телевизионная съемочная система с непосредственной передачей информации	
США	Многоканальная телевизионная съемочная камера	3 канала

торы — 7, 8; задающие генераторы — 9, 10; передающие устройства дециметрового диапазона — 11, 12; передающие устройства метрового диапазона — 13, 14; антенные переключатели — 15, 16; блок автоматики — 17; устройства отображения — 18, 19.

Оба типа сканирующих устройств построены по принципу однострочной механической развертки, которая производится поперек траектории движения спутника.

В МСУ-М строчная развертка осуществляется за счет качания зеркала, установленного на входе оптической системы.

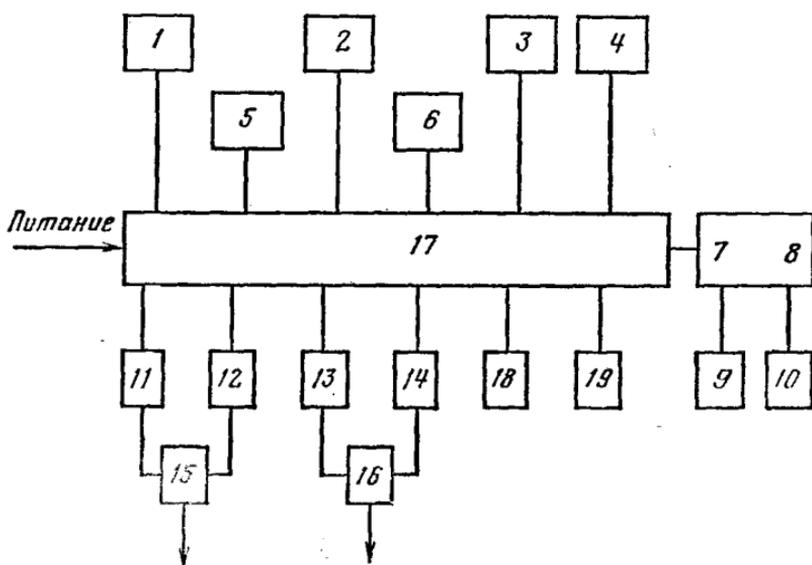


Рис. 72.

В МСУ-С строчная развертка формируется за счет вращения зеркальной пирамиды и происходит также с постоянной угловой скоростью.

Оптическая система МСУ состоит из объектива, линз, системы зеркал и диафрагм.

Основным элементом системы является объектив, в фокальной плоскости которого установлена диафрагма; объектив и диафрагма формируют мгновенное поле зрения сканеров с заданной степенью разрешения на местности. С помощью системы зеркало — объектив изображение местности строится на ФЭУ, причем в системе МСУ-С с помощью интерференционного зеркала поток излучения в видимом и инфракрасном диапазонах разделяется и регистрируется на разных ФЭУ. Для разделения излучений видимого диапазона в систему МСУ-М вводятся дополнительно оптические элементы: интерференционные фильтры и зеркало.

Излучение от поверхности Земли и других планет с помощью оптической системы формируется на ЭЛТ (видикон) и формируется на фотокатоде. Развертывающая система формирует электрические сигналы, которые усиливаются и преобразовываются на аналоговых устройствах в цифровую информацию.

Запоминающее устройство фиксирует эту информацию и хранит ее до сеанса связи.

Круг задач, разрешаемых с помощью телевизионных съемочных систем, за последние годы расширен в связи с большим вниманием, которое уделяется вопросам исследования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Специально созданы телевизионные комплексы экспериментальных спутников типа «Метеор» и «Метеор — Природа».

По телевизионным космическим снимкам решаются многие задачи в области метеорологии, картографии, геологии, изучения ресурсов Мирового океана. Первый экспериментальный спутник с этой аппаратурой был запущен в 1974 году, второй — в 1976 году. Многоканальное сканирующее устройство предназначено для получения телевизионных снимков поверхности Земли или других планет с большим захватом на местности, с малым, средним и высоким разрешением.

Глава XIII

СКАНИРУЮЩИЕ СИСТЕМЫ

§ 80. ПАНОРАМНАЯ СКАНЕРНАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ СЪЕМКА

Панорамная сканерная съемка может быть выполнена в мелких и крупных масштабах. Принципиальная опико-электронная схема бортового панорамного телевизионного сканирующего устройства для получения мелкомасштабных фотонизображений в различных диапазонах электромагнитного излучения приведена на рис. 73, где 1 — опико-механическое сканирующее устройство (качающееся зеркало или вращающаяся призма); 2 — плоское зеркало; 3 — вогнутое зеркало; 4 — световый преобразователь; 5 — видеоусилитель; 6 — точечный источник света; 7 — устройство, фокусирующее световое пятно от точечного источника света на фотопленку 8.

Излучение, испускаемое объектом, подлежащим съемке, фокусируется оптической системой 1—2—3 на световый преобразователь 4, который преобразует колебания поступающего излучения в электрические сигналы. Видеоусилитель 5 усиливает сигналы, которые впоследствии используются для мо-

дуляции тока, протекающего через точечный источник света 6. Непрерывно построчная запись может быть получена путем фокусирования модулированного по интенсивности точечного светового пятна на фотопленке 8.

Поскольку в результате указанного метода сканирования с борта самолета, искусственного спутника, космического корабля получают фотоизображения значительных участков земной поверхности в виде отдельных полос (панорам), то этот метод телевизионной съемки также называют панорамным.

Известен оптико-механический сканирующий комплекс «Фотосканер-4», предназначенный для многоканальной съемки объектов местности.

В самолетном варианте комплекс состоит из сканирующего устройства, содержащего сканирующее зеркало, объектив, диа-

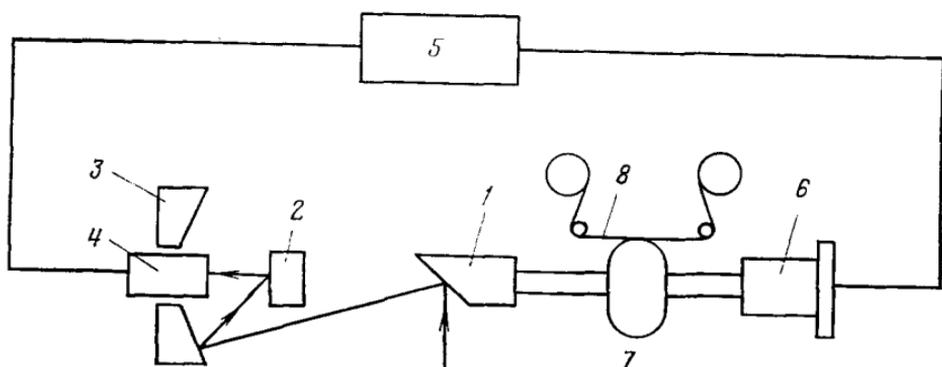


Рис. 73.

фрагму в фокальной плоскости объектива, светофильтры и светоприемники, устройство магнитной записи и системы управления. Система светофильтров разделяет световой поток, прошедший через диафрагмы, на три спектральных канала (0,3—0,4 мкм; 0,5—0,7 мкм; 0,8—1,1 мкм). «Фотосканер-4» имеет следующие параметры: угол сканирования $2\theta = 106^\circ$; мгновенный телесный угол зрения 2β , определяющий угловое разрешение, составляет $9,2'$; скорость сканирования 4 об/с; число элементов разрешения в строке до 1000. Комплекс обеспечивает передачу не менее 13 градаций полутонового клина, а также бортовую кодовую запись видеосигналов на трехканальный видеоманитфон. В наземных условиях три фотоизображения (в соответствии с поддиапазонами) получают на фототелеграфных аппаратах с оптимальным шагом подачи, определяющим поперечный размер строки на фотоизображении 0,2 и 0,4 мм.

Особенностью телевизионных сканирующих съемок является их многоканальность. Например, на борту автоматического спутника для исследований природных ресурсов Земли ERTS-1 («Лэндсат») устанавливалось четырехканальное сканирующее

устройство для получения фотонизображений в четырех спектральных поддиапазонах (0,5—0,6 мкм; 0,6—0,7 мкм; 0,7—0,8 мкм; 0,8—1,1 мкм).

Оптическая ось объектива (фокусное расстояние 228,6 мм) ориентируется перпендикулярно к снимаемой поверхности. Сущность сканирования показана на рис. 74, где 1—оптико-механическое сканирующее устройство, содержащее оптическую систему 2; 3—светочувствительные приемники (по шесть на каждый из указанных поддиапазонов); 4—качающееся зеркало. Сканирование в направлении, поперечном направлению полета, осуществляется с помощью качающегося зеркала 4 (15,2 колебания в 1 с) размером 23×33 см, ось которого расположена под углом

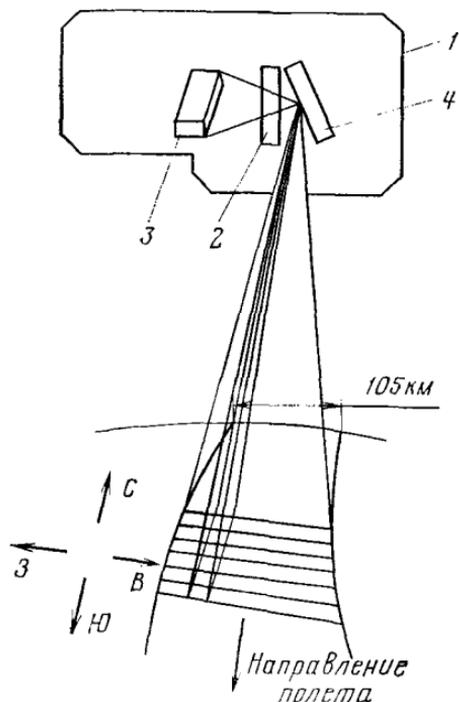


Рис. 74.

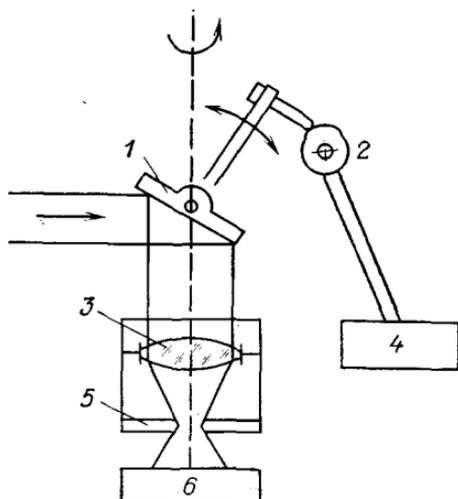


Рис. 75.

45° к снимаемой поверхности. Угол качания зеркала составляет +2,9°, что обеспечивает при заданной высоте орбиты просмотр полосы местности шириной 185 км. Каждое сводное изображение (условный кадр) состоит из 2340 сканирующих линий (сканируемых группами по 6 линий одновременно), получаемых примерно за 28,6 с, составляющих время записи. Время сканирования обратного хода зеркала составляет примерно 73,42 мс (на 6 линий сканирования). Размер условного кадра в продольном направлении определяется орбитальным движением спутника и составляет также 185 км. Изображения на борту преобразуются в цифровую форму, которые могут передаваться на Землю в реальном масштабе времени или в записи.

скую схему камеры входит также поворотное зеркало. Пучок лучей от поверхности планеты, проходя через цилиндрический иллюминатор 1, становится расходящимся в сагиттальном сечении. Расходящийся пучок падает на сканирующее зеркало 2 и, отразившись от него, попадает на компенсирующую цилиндрическую линзу 3, передний фокус которой совпадает с задним фокусом иллюминатора, представляющего собой цилиндрическую линзу. Параллельный пучок света далее отражается от поворотного зеркала 4 и проходит через объектив 5 ($f' = 28$ мм). В плоскости изображения установлена диафрагма 6, которая,

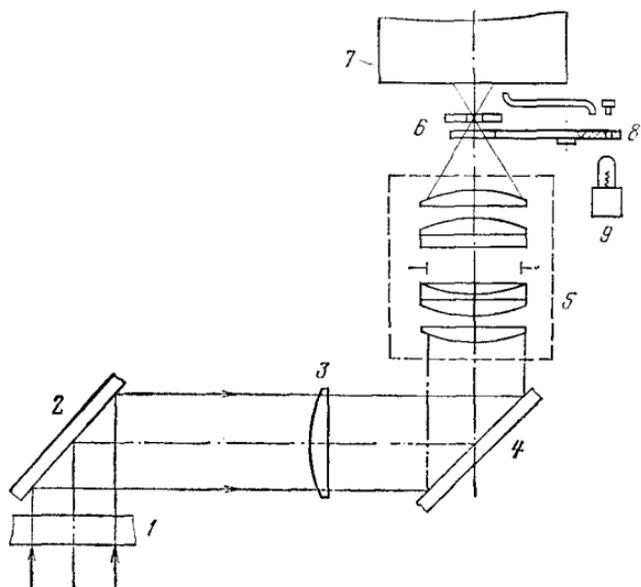


Рис. 76.

являясь развертывающим элементом, формирует апертурную характеристику прибора. Пройдя диафрагмы, пучок света попадает на светоприемник 7.

Во время обратного хода строчной развертки съемка не производится, так как световой поток перекрывается гребешком obtюратора 8, во время обратного хода происходит калибровка прибора и формирование электрического импульса начала прямого хода. С учетом конструктивных особенностей СА панорамная камера обеспечивает панорамный обзор в угле $180 \pm 4^\circ$. Сканирующее зеркало совершает колебательные движения, отклоняя пучки на угол $\pm 20^\circ$ по пилообразному закону с линейной угловой скоростью и обратным ходом, равным 10 % от периода строки.

Одновременно сканирующее зеркало поворачивается вокруг оси панорамирования. Для преобразования светового потока в электрический сигнал применен фотоэлектрический умножи-

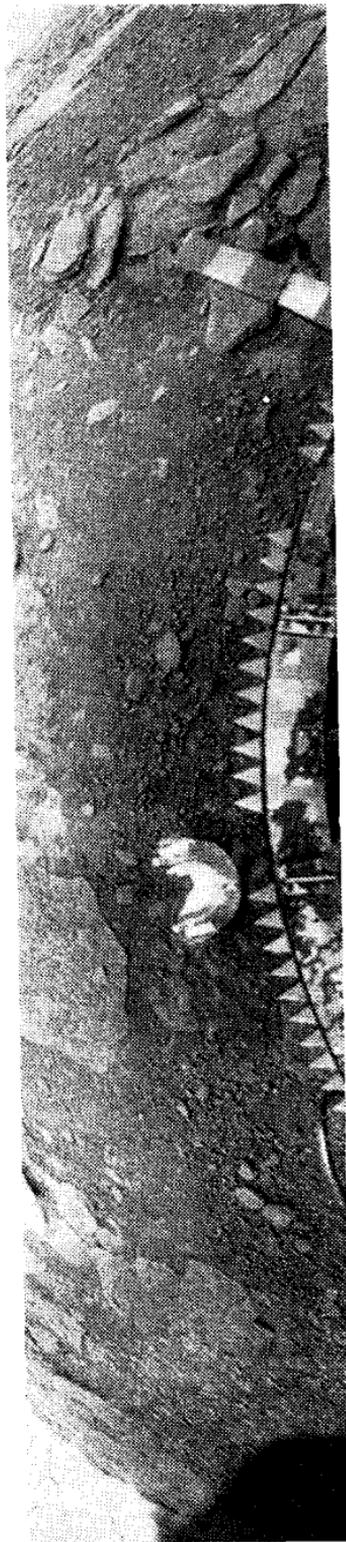


Рис. 77.

тель ФЭУ-114, по своей спектральной чувствительности соответствующий естественной освещенности на поверхности Венеры. Допустимая скорость передачи информации и номинальное время существования СА на поверхности (порядка 30 мин). Определим параметры разложения изображения в пределах угла панорамного обзора. Основные параметры камеры следующие:

число элементов в строке (без обратного хода) составляет 115;

число строк в панораме 547 ± 13 ;

время передачи панорамы 30 мин.

Камера может передавать плотности в диапазоне от 0 до 1,2. Диапазон рабочих освещенностей от 15 до 15 000 лк. Контрастная чувствительность системы определяется в значительной степени каналом передачи, в котором производится квантование выходного сигнала. Число уровней квантования составляет 64. Конструктивно камера состоит из двух частей: основного корпуса и перископического устройства, которое вынесено за пределы теплоизоляционных оболочек СА. В состав аппаратуры для съемки поверхности планеты входят устройства подсветки поверхности в виде параболических отражателей с лампой накаливания 9 в качестве источника света. Номинальное напряжение 27 В, потребляемая мощность галогенных ламп 100 Вт, световой поток 3400 лм, масса 600 г.

В связи с тем что уровень естественной освещенности оказался очень высоким, действие искусственного освещения на панорамных снимках выражено очень слабо. Образец панорамы поверхности Венеры, полученный с АМС «Венера-13», показан на рис. 77. При передаче телевизионного изображения передавалась также телеметрическая научная и объектовая информация. Панорамы были подвергнуты дополнительной цифровой обработке в наземных условиях, устранен мозаичный характер изображения, телеметрические врезки, отдельные сбои и шумы, улучшено общее визуальное качество панорам.

§ 82. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕЛЕВИЗИОННЫХ СНИМКОВ

Геометрические искажения изображения местности обусловлены рядом особенностей фототелевизионных и телевизионных систем из-за наличия электронных преобразователей, оптических систем, использования принципа построения изображения с помощью сканирующего устройства, искажениями сигнала в цепях: земная поверхность — приемник лучистой энергии; бортовой хранитель информации — наземный приемник видеoinформации. На измерительную точность телевизионных снимков влияют нарушения геометрических условий калибровки и установки съемочных камер на борту КЛА: оптическая дисторсия

объективов, «электронная дисторсия» телевизионной системы в целом.

Сканирующий процесс является одним из источников значительных геометрических искажений фототелевизионных и телевизионных изображений. «Идеальный» сканирующий процесс должен удовлетворять следующим условиям: скорость движения сканирующего луча вдоль каждой сканирующей строки должна быть постоянная; каждая строка в растре — прямая линия; строки сканирующего растра должны быть распределены равномерно; начало и конец строки должны совпадать с границами поля изображения; все строки должны иметь постоянный наклон к горизонтали; должна быть обеспечена высокая степень синхронизации двух сканирующих лучей — бортового и наземного.

Нарушение указанных условий приводит к следующим геометрическим искажениям: масштабные искажения, т. е. изменяется номинальный размер кадра каждого изображения; возникает косоугольность координатной системы (аффинные искажения); появляются нелинейные изменения масштаба в различных частях поля изображения; искажаются геометрические положения отдельных точек изображения.

Эффективным средством для учета этих искажений является система опорных координатных меток как интегральная часть первичного изображения, которая проходит соответственно через различные ступени телевизионных преобразований, передачи и приема.

Общее количество n отдельных строчных и столбцевых элементов квадратной матрицы опорных координатных меток, оптически совмещенных с фокальной плоскостью устройства формирования оптического изображения снимаемого объекта, может быть определено по формуле

$$n = 1 + \left[\frac{200\Delta L + LV_{\Phi}}{L(W_1^2 - V_0^2)^{1/2}} \right]^2, \quad (359)$$

где ΔL — максимальная нелинейность растра (размерность — число строк); L — размер стороны кадра (размерность — число строк); V_{Φ} — искажения системы, воспроизводящей телевизионный (фототелевизионный) снимок; W_1 — суммарные остаточные искажения телевизионной (фототелевизионной) системы; V_0 — искажения, вносимые объективом устройства формирования оптического изображения снимаемого объекта (размерность V_{Φ} , W_1 , V_0 — в % от стороны кадра).

Идеальная координатная метка должна быть такой, чтобы ее можно было различить и на светлом, и на темном участках телевизионного или фототелевизионного изображения. Это требование противоречиво и технический оптимум пока еще не определен. Геометрические формы координатных меток встреча-

ются различные, но наиболее оптимальными можно признать концентрические и в виде симметричных перекрестий.

В целях аналитического учета геометрических искажений в качестве математической модели выберем линейную группу проективных преобразований.

Представим группу проективных преобразований в аналитической записи, отнеся ее к пространству, считая плоскость частным случаем:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} X'_1 \\ X'_2 \\ X'_3 \\ X'_4 \end{bmatrix}, \quad (360)$$

где A — матрица проективного преобразования, определитель которой отличен от нуля.

В уравнениях (360) однородными координатами образа точки являются: $(X'_1 : X'_2 : X'_3 : X'_4)$, а $(X_1 : X_2 : X_3 : X_4)$ — однородными координатами прообраза точки.

Так как группа проективных преобразований плоскости является подгруппой проективных преобразований в пространстве, то можно осуществить переход от однородных координат точек к их обобщенным декартовым координатам. После преобразований получим уравнения проективных преобразований плоскости в координатах:

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{Ax' + By' + C}{Dx' + Ey' + 1} \\ y &= \frac{Fx + Gy + H}{Dx + Ey + 1} \end{aligned} \right\}. \quad (361)$$

Коэффициенты A, B, C, D, E, F, G, H уравнений (361) объединяет следующая матрица Π проективных преобразований плоскости, определитель Δ которой отличен от нуля:

$$\Pi = \begin{bmatrix} A & B & C \\ F & G & H \\ D & E & 1 \end{bmatrix}. \quad (362)$$

Характерной особенностью матрицы Π является то, что путем ее обращения

$$\Pi^{-1} = \begin{bmatrix} A' & B' & C' \\ F' & G' & H' \\ D' & E' & 1 \end{bmatrix} \quad (363)$$

можно получить

$$\left. \begin{aligned} x' &= \frac{A'x + B'y + C'}{D'x + E'y + 1} \\ y' &= \frac{F'x + G'y + H'}{D'x + E'y + 1} \end{aligned} \right\} \quad (364)$$

Обозначим через (x_i, y_i) координаты опорных меток на плоскопараллельной пластинке, расположенной в фокальной плоскости фотосъемочной камеры (фототелевизионная съемка) или в плоскости «экрана» воспринимающего телевизионного элемента, например, видикона (телевизионная съемка), а через (X'_i, Y'_i) — координаты изображений указанных опорных меток на кадровом телевизионном или кадровом фототелевизионном снимках.

Опорные координатные метки различных видов располагаются равномерно по полю изображения, являются его интегральной частью и проходят совместно с исходным практически не искаженным оптическим изображением снимаемого объекта все стадии электронных преобразований, свойственных фототелевизионным и телевизионным системам.

На основе уравнения (361) запишем условные уравнения проективных преобразований плоскости, пригодных для практического использования при выявлении и учете геометрических искажений указанных кадровых фотоизображений.

$$\left. \begin{aligned} A'x_i + B'y_i + C' - D'x'_ix_i - E'y'_iy_i + 0 + 0 + 0 &= x'_i \\ 0 + 0 + 0 + D'y'_ix_i + E'y'_iy_i - F'x_i - G'y_i - H' &= -y'_i \end{aligned} \right\} \quad (365)$$

В условных уравнениях восемь неизвестных коэффициентов проективных преобразований объединяет матрица Π^{-1} . Определить эти коэффициенты можно, зная координаты четырех опорных точек. Для выявления характера распределения геометрических искажений и построения номограммы искажений применим решение следующей системы уравнений поправок:

$$\left. \begin{aligned} v_{x_i} &= (A'x_i - B'y_i - C' - D'x'_ix_i - E'y'_iy_i) - x_i \\ v_{y_i} &= (D'y'_ix_i - E'y'_iy_i - F'x_i - G'y_i - H') - y_i \end{aligned} \right\} \quad (366)$$

Учет геометрических искажений кадровых фототелевизионных и телевизионных снимков целесообразно выполнять следующим образом. По координатам четырех точек, ограничивающих зону, в пределах которой искажения носят допустимо линейный характер, решают систему восьми линейных уравнений и определяют значения восьми неизвестных коэффициентов проективных преобразований $A', B', C', D', E', F', G', H'$. Далее обращают элементы матрицы Π , что приводит к получению значений коэффициентов A, B, C, D, E, F, G, H . По формулам (364) приводят измеренные координаты x', y' фототелевизион-

ных и телевизионных изображений к координатам исходных изображений в плоскости «экран видикона» или плоскопараллельной пластинки в фокальной плоскости. Последующая аналитическая фотограмметрическая обработка ведется в масштабе исправленного исходного изображения.

Перед установкой системы на борту КЛА производят ее калибровку, в результате чего определяют элементы внутреннего ориентирования съемочных камер и оптическую дисторсию объективов. Калибровка съемочных камер может быть выполнена на оптической скамье коллиматорного типа или по результатам обработки фотоснимков искусственных тест-объектов. Обработка результатов измерений выполняется аналитическим методом с использованием строгих математических зависимостей, в основе которых лежит известный фотограмметрический принцип коллинеарности.

Вычисления целесообразно выполнять на ЭВМ с использованием для оценки их точности способа наименьших квадратов. Ошибка определения фокусных расстояний фотосъемочных камер, координат главной точки и оптической дисторсии не должна превышать ± 10 мкм.

Наиболее эффективным средством для выявления и учета так называемой «электронной дисторсии» системы в целом является плоскопараллельная пластинка, устанавливаемая в фокальной плоскости съемочных камер и входящая в расчет их оптических параметров. Координатные метки, равномерно расположенные по всему полю плоскопараллельной пластинки, должны быть калиброваны с точностью не ниже $\pm 1-2$ мкм. Геометрическая форма координатных меток и их частота распределения выбираются из оптимальных условий, определяемых дешифровочными и измерительными качествами телефотоснимков.

Совместная компоновка двух съемочных камер или более на одной платформе требует выполнения условия пространственной параллельности их оптических осей с точностью не ниже ± 10 , что возможно выполнить, применяя высокоточные геодезические методы угломерных измерений.

Повышение измерительной точности телевизионных снимков может быть достигнуто путем использования изображений координатных меток, которые калиброваны и расположены на поверхности плоскопараллельной пластинки в фокальной плоскости съемочной камеры. На основе сравнения координатных меток снимка и эталонированных путем соответствующего математического моделирования «электронной дисторсии» в значительной степени можно уменьшить влияние случайных и систематических компонентов искажений. Указанное математическое моделирование возможно с применением соответствующих алгоритмов различных конформных линейных и билинейных, аффинных, проективных преобразований, а также по полиномам второго и высшего порядка.

§ 83. ИНФРАКРАСНАЯ СЪЕМКА

Инфракрасная аппаратура предназначена для съемки земной поверхности и облачных образований на неосвещенной и на дневной стороне Земли в ближней, средней и дальней инфракрасных зонах спектра. Получение изображения при съемке основано на приеме специальным чувствительным устройством излучений определенной длины волны путем построчного оптико-механического линейного или нелинейного сканирования снимаемой поверхности узким телесным углом зрения при поступательном перемещении самолета или КЛА в направлении, перпендикулярном к направлению сканирования. Инфракрасная аппаратура работает в «окнах прозрачности» инфракрасного участка спектра: $0,7 \div 2,5$ мкм (ближняя зона), $3,4 \div 4,2$ мкм (средняя зона) и $8,8 \div 13,2$ мкм (дальняя зона). Инфракрасная съемка в ближней зоне спектра ставит задачей получение материалов для картографических целей, многостороннего географического анализа поверхности, изучения влажности почвенных массивов, выявления некоторых классов формаций растительности. На космических инфракрасных снимках отчетливо вырисовывается береговая линия водных акваторий, гидрографическая сеть, по ним возможно производить оценку ледовой обстановки. Светлые участки на снимке будут соответствовать открытым водным пространствам, темные — зонам распространения льда. Разрешающая способность изображения при съемке в ближней зоне составляет для разных систем от десятков до сотен метров.

Инфракрасная съемка в среднем диапазоне позволяет регистрировать неоднородность излучательной способности природных образований. По материалам съемки изучают пространственно-временную характеристику теплового излучения Земли, определяют контакты пород различной теплоемкости, локальные тепловые неоднородности, определяют области молодого вулканизма, где наряду с определением перепада температур различных пород фиксируются скрытые участки повышенной вулканической активности, выявляют некоторые классы формаций растительности, производят поиск грунтовых вод и т. д. Разрешающая способность снимков при съемке в средней инфракрасной зоне спектра составляет от нескольких километров до десятков километров ($3 \div 50$ км).

Наибольшее изменение получил интервал длин волн дальней инфракрасной зоны, так как в этом окне прозрачности уходящая тепловая радиация наиболее близка к собственному тепловому излучению земной поверхности и облаков. Инфракрасная аппаратура, работающая в этом диапазоне, установлена на спутниках серии «Космос», «Метеор», «НОАА» и др. Тепловое излучение в этой области может быть измерено днем и ночью, так как в нем (диапазоне) сосредоточивается максимум

излучаемой Землей и атмосферой тепловой энергии и отраженная радиация днем заметно не сказывается на величине этой энергии. Аппаратура позволяет регистрировать также малые тепловые радиационные потоки при низких температурах, когда интенсивность излучения с понижением температуры быстро убывает. Материалы съемки в дальней инфракрасной зоне позволяют получить генерализованное изображение местности, на котором выделяют зональные и локальные тепловые неоднородности, распределение облачности. По материалам производят геологическое картирование, изучают вулканическую деятельность, составляют температурные карты. По тональным различиям при изучении мезоклимата выявляют явления воздействия ветра на поверхность. Хорошо просматриваются выходы грунтовых вод, направление стока более теплых речных

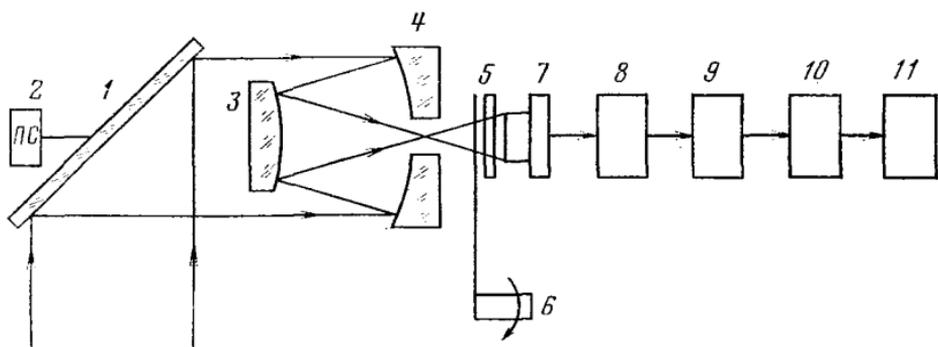


Рис. 78.

вод в море, местоположение и развитие очагов пожаров под дымовыми облаками. Первые космические инфракрасные снимки, полученные в дальней зоне, имели невысокую разрешающую способность порядка 50—60 км. На них было возможно определить некоторые температурные неоднородности и распределение облачности. Современные ИК-системы позволяют регистрировать объекты по изменению тепловых характеристик с точностью 3—4 км днем и 6—10 км при съемке в ночных условиях.

Рассмотрим схему съемочной системы в ИК-диапазоне сканирующего радиометра (рис. 78). В состав аппаратуры входит: сканирующее устройство 1, на которое поступают инфракрасные лучи от объектов земной поверхности. Вращение зеркала осуществляется с помощью привода сканирования 2. Оптическая система, строящая изображения, состоит из зеркал 3, 4 (объектив Кассегрена). Заданный спектральный поток выделяется с помощью светофильтра 5. Модулятор 6 обеспечивает прерывание потока с определенной частотой. Приемником лучистого потока служит фотосопротивление 7, далее сигнал по-

дается на усилитель 8, выпрямляется детектором 9 и поступает на управляемый генератор 10. Далее сигнал передается по радиоканалу или записывается запоминающим устройством 11 на магнитную ленту.

Приборы для ИК-съемки могут быть также построены по следующей схеме (рис. 79). Инфракрасные лучи поступают на чувствительные элементы устройства — детектор 1, который преобразует колебания поступающего излучения в электромагнитные сигналы и передает с помощью оптической системы 2 на усилитель 3. Сигнал после усиления моделируется модулятором 4 и далее производится непрерывная построчная запись на светочувствительный слой 5 модулированного по интенсивности светового потока от точечной лампы.

Следует отметить, что мощность сигнала зависит от температуры объектов съемки, и на нее влияет много факторов, опре-

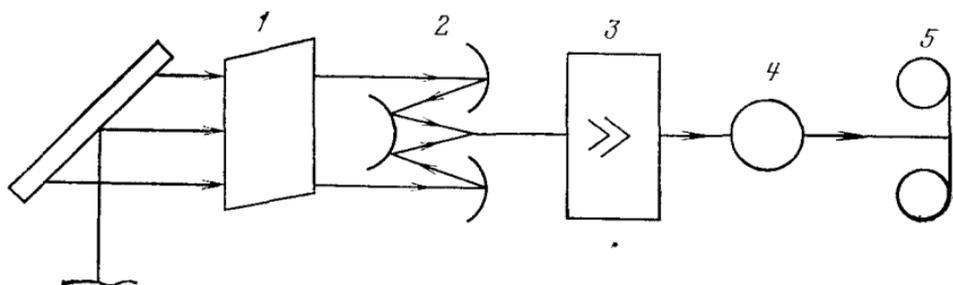


Рис. 79.

деляющих пространственно-временную изменчивость радиационных характеристик. Сюда относятся метеорологические условия съемки, состояние почв, неоднородность подстилающей поверхности, содержание водяных паров и др.

Измерительные свойства ИК-изображения зависят от ряда факторов, определяющих условия съемки и воспроизведение объектов местности. Оптическая система чувствительного устройства имеет постоянное поле зрения. Величина разрешающего участка земной поверхности будет зависеть от угла сканирования, поля зрения системы, высоты фотографирования и расстояния до объекта съемки, т. е. наклонной дальности.

Угол сканирования θ определяется вертикалью и оптической осью системы. Обозначим наклонную дальность R , т. е. расстояние от центра проектирования до земной поверхности в направлении оптической осн. Величина разрешающего участка вдоль оси XX определится формулой

$$L_{X_{\max}} = 2R \operatorname{tg} \alpha, \quad (367)$$

из-за малости угла α запишем

$$L_{X_{\max}} = 2\alpha R = 2\alpha H \sec \theta, \quad (368)$$

величина участка разрешения вдоль оси YU составит

$$L_{Y_{\max}} = 2\alpha H \sec^2 \theta, \quad (369)$$

величина площади разрешаемого участка равна

$$P = L_X L_Y = 4\alpha^2 H^2 \sec^3 \theta. \quad (370)$$

§ 84. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СКАНИРУЮЩИХ СИСТЕМ

Для получения высокой разрешающей способности фотоизображений, полученных сканирующими съемочными системами, необходимо, чтобы светозлектрический преобразователь воспринимал излучение от достаточно малого участка снимаемой поверхности. Разрешение на снимаемой поверхности определяется мгновенным телесным углом поля зрения сканирующей системы, который для данной системы постоянен. Следовательно, разрешение на снимаемой поверхности переменено зависит от величины угла сканирования и определяется формулой

$$A = 2\alpha R = 2\alpha H \sec \theta, \quad (371)$$

где α — половина мгновенного телесного угла поля зрения сканирующей системы; θ — половина угла сканирования; H — высота полета; R — наклонная дальность.

Уравнение для составляющей разрешения по оси Y :

$$B = 2\alpha H \sec^2 \theta. \quad (372)$$

Максимальное разрешение имеем в центре полосы сканирования. При $\theta=0$ получим

$$B = A = 2\alpha H, \quad (373)$$

где A — минимальное значение составляющих по осям X и Y максимально разрешаемого участка снимаемой поверхности.

Площадь разрешаемого участка снимаемой поверхности можно определить следующим образом:

$$P = AB = 4\alpha^2 H^2 \sec^3 \theta, \quad (374)$$

откуда максимальное значение площади минимального участка снимаемой поверхности A определится при $\theta=0$ следующим образом:

$$P = A^2 = 4\alpha^2 H^2. \quad (375)$$

Очевидно, что каждой строке и каждому элементу строки присущи искажения, определяемые изменением угловых и линейных элементов внешнего ориентирования носителя. Однако особенности изображений, полученных сканирующими системами (постоянный угол поля зрения и скорость сканирования), приводят к дополнительным масштабным искажениям по оси Y , значения которых определяются по формуле

$$\Delta Y = -H \left(\operatorname{tg} \theta - \frac{\theta}{S} \right). \quad (376)$$

По формуле (376) можно вычислить ошибку масштаба на краю полосы сканирования. При больших значениях угла θ масштаб на краю полосы значительно мельче масштаба в центре полосы.

Заметим, что масштаб изображения (по осевой линии панорамы) должен быть выбран таким, чтобы сохранить максимум информации о снимаемой поверхности. Знаменатель масштаба M сканирующей съемки может быть определен по формуле

$$M = A/N, \quad (377)$$

где A определяется из формулы (371); N — разрешающая способность эмульсии фотопленки для регистрации видеoinформации в наземных условиях.

Считая, что $A=L$ — расстояние между осевыми линиями смежных полос сканирования, получим

$$L = W/V, \quad (378)$$

где W — путевая скорость носителя; V — скорость сканирования (количество строк в секунду).

С учетом формулы (378) получим

$$2\alpha H = W/V,$$

откуда

$$2\alpha V = W/H. \quad (379)$$

Для данной системы 2α и V постоянны. Следовательно, носитель должен поддерживать $W = \text{const}$, чтобы удовлетворялось равенство (378). В противном случае могут наблюдаться «разрывы» или «наложения» изображения. Отметим, что при съемке поверхности со значительными колебаниями рельефа формула (379) является приближенной.

Для определения скорости движения фотопленки в устройстве индикации видеoinформации имеется формула

$$v = W/m = 2\alpha V H/m, \quad (380)$$

где m — масштабный коэффициент оптической системы устройства индикации видеoinформации.

§ 85. РАДИОЛОКАЦИОННАЯ СЪЕМКА

При радиолокационной съемке местности используются самолетные радиолокаторы различных типов. Изображение земной поверхности может быть получено на экране электронно-лучевой трубки и, что особенно ценно, в любое время суток и в любую погоду.

Радиолокационное изображение фиксируют либо фотографическим способом, либо записывают на магнитную ленту. По радиолокационным изображениям можно составить радиолокационные карты аналитическими или фотограмметрическими

методами. Радиоволны, используемые в радиолокаторах, имеют большую длину, чем световые, поэтому они проходят через лака и туман, почти не поглощаясь и не меняя направления в пространстве. Импульс радиоволн, излученный антенной, стигает Земли, отражается от нее и с помощью антенны попадает в приемник. В приемнике на выходе возникает электрическое напряжение, которое подается на индикатор, на экране которого формируется изображение земной поверхности.

Принципиальная блок-схема станции показана на рис. 80. Передатчик вырабатывает короткие импульсы с частотой повторения сотни или тысячи раз в секунду. Продолжительность каждого импульса — около одной микросекунды. Передатчик излучает сверхвысокочастотные колебания в течение этих ко-

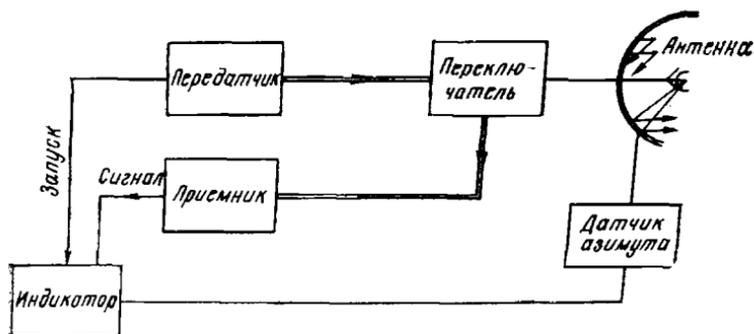


Рис. 80.

ротких микросекундных импульсов. Импульсы колебания сверхвысокой частоты от передатчика по специальной линии передаются в антенну.

Антенна предназначена для излучения импульсов в определенном направлении, а после отражения радиоволн от земной поверхности — для приема отраженных сигналов.

Антенна крепится внизу фюзеляжа самолета таким образом, чтобы ничто не препятствовало излучению радиоволн по направлению к земной поверхности.

Антенный переключатель соединяет антенну с передатчиком на короткий период времени, равный продолжительности импульса, во время которого антенна излучает, а затем соединяет антенну с приемником до прихода следующего импульса. Импульсы вырабатываются генератором. Передатчик преобразует каждый импульс, поступающий от генератора, в радиоимпульс.

Во время работы радиолокатора антенна при помощи мотора вращается вокруг вертикальной оси с небольшой скоростью (10 об/мин). Частота импульсов излучения составляет около 1000 раз в секунду, поэтому антенна за время между двумя импульсами успевает повернуться на ничтожно малый

угол, так что антенну можно считать неподвижной. Антенна сразу после излучения импульса из передающей становится приемной. Принятые отраженные сигналы усиливаются приемником и передаются на индикатор радиолокатора. Индикатором самолетного радиолокатора служит электронно-лучевая трубка. Электронно-лучевая трубка формирует изображение местности, сходное с картой. Изображение получается путем модуляции интенсивности электронного пучка видеосигналом, образованным на выходе приемника.

Для того чтобы направления излучения и приема совпадали с перпендикуляром к линии пути самолета, предусмотрена система стабилизации обзора, которая управляет антенной и при необходимости производит дополнительные перемещения и разворот строки развертки электронно-лучевой трубки в соответствии с перемещением сканирующего луча на местности. Исходные данные в систему навигации поступают от навигационных датчиков полета, измерителей путевой скорости, крена и тангажа.

Рассмотрим импульсную радиолокационную систему, антенна которой при коэффициенте направленного действия (КНД) D_a излучает импульсную мощность P_n в направлении объекта, удаленного на расстояние R от системы. Допустим, что в пространстве, окружающем объект, нет потерь энергии. Если считать антенну ненаправленной, то на сфере радиуса R излучаемая мощность равномерно распределится по поверхности $4\pi R^2$. Реальная антенна направленная и плотность потока мощности у объекта в D_a раз больше:

$$P_{об} = P_n D_a / 4\pi R^2. \quad (381)$$

Энергия прямой волны частично поглощается, а частично рассеивается объектом. Всякий реальный объект обладает направленностью вторичного излучения и его отражающие свойства в направлении РЛС оцениваются некоторой средней эффективной площадью рассеяния $S_{эф. об}$. Мощность отраженной волны можно представить произведением $P_{об} S_{эф. об}$, а плотность потока мощности в месте расположения приемной антенны

$$P_{пр} = P_n D_a S_{эф. об} / (4\pi R^2)^2.$$

От приемной антенны подводится к приемнику мощность сигнала, равная

$$P_c = \frac{P_n D_a S_{эф. об} S_{эф. а}}{(4\pi R^2)^2}. \quad (382)$$

Это выражение называют основным уравнением радиолокации. Оно устанавливает зависимость между мощностью принимаемого сигнала P_c и мощностью излучения P_n . Из уравнения видно, что с увеличением дальности объекта (R) мощность сигнала, подводимого к приемнику, уменьшается обратно про-

порционально четвертой степени дальности. Так как мощность шумов от дальности не зависит, то отношение сигнал/шум с увеличением дальности уменьшается обратно пропорционально R^4 .

Если бы атмосфера не содержала гидрометеоров, то электромагнитная энергия поглощалась бы только находящимися в тропосфере газами. Энергия радиоволн вызывает в молекулах газов переход электронов с одного энергетического уровня на другой. Если частота распространяемой волны совпадает с собственной частотой внутриатомного перехода, наступает резонанс и поглощение резко возрастает. Электромагнитные волны в каплях влаги вызывают только смещения, которые становятся источниками вторичного излучения. В диапазоне волн, применяемых в радиолокации, затухание в атмосфере становится значительным при $\lambda < 3$ см, а на миллиметровых волнах оно особенно значительно, только небольшое окно на волне $\lambda \approx 8,7$ мм удается использовать для радиолокации.

Четкость радиолокационного изображения зависит не только от отражательной способности участков снимаемой местности, размеров и очертаний предметов и от угла падения на них луча, но и от длины радиоволны, которая должна быть меньше размеров отражающего объекта.

Состояние отражающей поверхности и длина волны обуславливают характер отражения, который может быть зеркальным или рассеянным (диффузным). Значения коэффициента отражения для бурного моря сильно уменьшаются. Коэффициенты для различных почв изменяются нерегулярно — от 0,1 почти до 1 в зависимости от угла падения луча и характера поверхности. Наличие растительности увеличивает поглощение радиоволн, а для гладких и песчаных поверхностей коэффициент отражения приближается к 1 при малых углах. В виде ярких пятен на экране радиолокатора видны города, крупные промышленные центры, различные железобетонные сооружения.

На экране радиолокатора можно измерить расстояние (дальность) до объекта. Для определения расстояния (дальности) используются масштабные кольца, получаемые с помощью генератора масштабных импульсов.

Для определения направления на объект вокруг экрана помещают круговую шкалу, на нуль которой наносится светящаяся линия — курсовая линия.

Фотографическое изображение местности отличается от радиолокационного в связи с тем, что фотографическое изображение строится по угломерному принципу, а радиолокационное — по дальномерному.

Радиолокационные станции, используемые для землеобзора, носят название панорамные радиолокаторы. К ним относятся бортовые радиолокационные станции кругового и бокового обзора. В радиолокационных станциях кругового обзора антенна

совершает круговой или секторный обзор земной поверхности. Особенно хорошо на экране индикатора видны границы между водой и сушей. Изображение земной поверхности получается в виде массивов разной яркости, четко выделяются по яркости возвышенные участки и участки, обладающие высокой проводимостью. Гладкая водная поверхность дает зеркальное отражение, а земная поверхность рассеивает волны во всех направлениях.

По своим задачам панорамные радиолокаторы требуют высокого разрешения целей, для того чтобы получить изображение местности, близкое по качеству к аэроснимкам.

Радиолокационные станции бокового обзора имеют антенну в виде многоэлементной решетки, которая размещается вдоль одной либо обеих сторон фюзеляжа летательного аппарата (ЛА). Лучи антенны производят обзор земной поверхности перпендикулярно к продольной оси ЛА. Поскольку антенна бокового обзора неподвижна и размещается вдоль фюзеляжа, то появилась возможность увеличить раскрыв антенны, что увеличило разрешающую способность.

В панорамном радиолокаторе, разрешающая способность складывается из разрешающей способности по дальности и по азимуту.

Разрешающая способность по дальности — это минимальное расстояние между двумя объектами, расположенными на одном направлении относительно радиолокатора, при котором эти объекты видны раздельно. В радиолокации момент, когда два объекта будут видны раздельно, наступит в том случае, если разность между отраженными от них сигналами будет равна длительности импульса τ зондирования. Следовательно, чем короче импульс, тем выше разрешающая способность радиолокатора:

$$\frac{2D_1}{c} - \frac{2D_2}{c} \geq \tau, \quad (383)$$

где D_1 и D_2 — расстояния до объектов; c — скорость распространения электромагнитной волны.

По направлению разрешающая способность определяется наименьшим углом между двумя объектами, находящимися на одинаковом расстоянии от радиолокатора, при котором импульсы, отраженные от этих объектов, видны раздельно. Разрешающая способность будет зависеть от ширины направленности антенны. Чем уже диаграмма направленности, тем выше разрешающая способность по азимуту.

Высокую разрешающую способность при обзоре земной поверхности на больших расстояниях удалось получить при использовании метода синтезированных антенн в радиолокационных станциях с когерентной обработкой сигналов. Сущность метода состоит в том, что при движении летательного аппарата

осуществляется обзор земной поверхности неподвижным боковым лучом (как при обычном боковом обзоре). Отраженный сигнал принимается и усиливается, но подается в запоминающее устройство. Затем несколько сотен или тысяч сигналов, отраженных от разных точек траектории полета, суммируется с определенными фазовыми соотношениями. Такую обработку сигналов можно назвать пространственно-временной, при которой учитываются закономерности изменения фазы за счет относительного перемещения цели. В результате сложения получается картина сигналов по всем точкам траектории, как если бы сигналы принимались одновременно антенной, размеры которой равны длине трассы. Эта протяженность может достигать километров. Синтезированные антенны обладают острой направленностью и могут обеспечить высокую разрешающую способность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Большаков В. Д., Гайдаев П. А.* Теория математической обработки геодезических измерений. М., Недра, 1977.
2. *Герман М. Н.* Спутниковая метеорология. Л., Гидрометиздат, 1975.
3. *Кириллов Н. И.* Проблемы фотографии. М., Искусство, 1965.
4. *Кучко А. С.* Аэрофотография. М., Недра, 1974.
5. *Ландсберг Г. С.* Оптика. М., Наука, 1976.
6. *Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф.* Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. М., Недра, 1981.
7. *Мельников А. А.* Теория и расчет фотозатворов. М., Машиностроение, 1973.
8. *Первые панорамные поверхности Венеры.* Ответственный редактор М. В. Келдыш. М., Наука, 1979.
9. *Советские пилотируемые корабли и орбитальные станции.* Под ред. Г. С. Нарминова. М., Машиностроение, 1976.
10. *«Союз» и «Аполлон».* Рассказывают советские ученые, инженеры и космонавты — участники совместных работ с американскими специалистами. М., Политиздат, 1976.
11. *Страницы советской космонавтики.* Под ред. Г. С. Нарминова. М., Машиностроение, 1975.
12. *Телевизионные системы летательных аппаратов.* Под ред. А. И. Величкина. М., Советское радио, 1979.
13. *Фризер Х.* Фотографическая регистрация информации. М., Мир, 1978.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава I. Космические летательные аппараты (КЛА)	5
§ 1. Задачи фотосъемок из космоса	5
§ 2. Общие технические данные космических летательных аппаратов	9
§ 3. Космический летательный аппарат «Союз»	13
§ 4. Орбитальная пилотируемая станция «Салют»	16
§ 5. Орбитальная станция «Скайлэб» (США)	19
§ 6. Метеорологические спутники	21
§ 7. Автоматические межпланетные станции для космической съемки планеты Венера	30
§ 8. Автоматическая межпланетная станция «Марс»	33
§ 9. Фотографическая съемка с автоматических станций «Зонд»	35
§ 10. Подгонные подспутниковые эксперименты и применяемые в них носители	37
Глава II. Основные параметры полета космического летательного аппарата	41
§ 11. Основные участки траектории полета КЛА	41
§ 12. Элементы орбиты КЛА	43
§ 13. Системы измерения времени	44
§ 14. Типы орбит КЛА	46
§ 15. Некоторые системы определения координат космического летательного аппарата	48
§ 16. Скорость движения спутника по орбите	50
§ 17. Уравнения движения ИСЗ. Невозмущенное движение	52
§ 18. Факторы, влияющие на движение спутника по орбите. Возмущенное движение	55
§ 19. Учет освещенности земной поверхности и времени запуска КЛА	56
§ 20. Геометрические параметры космической фотосъемки	61
Глава III. Основные характеристики космической съемочной системы	68
§ 21. Классификация космических съемочных камер	68
§ 22. Блок-схема КСК	72
§ 23. Кардинальные точки оптической системы	73
§ 24. Аберрации оптической системы	78
§ 25. Характеристики оптической системы КСК	83
§ 26. Разрешающая способность оптической системы	89
§ 27. Светофильтры	98
§ 28. Фотозатворы космических съемочных камер	101
§ 29. Кассеты космических съемочных камер	115
§ 30. Многозональная космическая съемка	118
§ 31. Панорамная фотосъемка	120
Глава IV. Система управления КСК	124
§ 32. Система автоматического управления комплектом космической съемочной аппаратуры	124
§ 33. Частотный и корреляционный методы решения отношения W/H при фотосъемке	128
§ 34. Устройство компенсации сдвига изображения	134
Глава V. Калибровка космических съемочных систем	141
§ 35. Определение элементов внутреннего ориентирования	141
§ 36. Калибровка КСК по снимкам звезд	145

§ 37. Способ калибровки фотосъемочных камер по результатам измерений	146
§ 38. Учет атмосферной рефракции	149
Глава VI. Фотографические материалы для космической съемки	149
§ 39. Действие света на эмульсионные слои	149
§ 40. Сенситбилизация эмульсионных слоев	151
§ 41. Другие характеристики эмульсионных слоев	153
§ 42. Спектральные характеристики пленок	155
§ 43. Цветные пленки для фотографических съемок из космоса	160
Глава VII. Фотографическая сенситометрия	164
§ 44. Методика сенситометрических испытаний	164
§ 45. Сенситометрические характеристики пленок	167
§ 46. Сенситометрические испытания цветных пленок	175
§ 47. Сведения о зарубежных системах сенситометрии	178
§ 48. Деформация пленок и методы ее определения	179
Глава VIII. Экспонетрические условия космической съемки	181
§ 49. Решение экспонетрического уравнения при космической фотосъемке	181
§ 50. Автоматизация процесса экспонирования	183
§ 51. Изменение регулируемых экспонетрических параметров	184
§ 52. Метод регулирования экспозиции по минимальной яркости	186
§ 53. Выбор конструктивных параметров оптического датчика АРЭ	186
§ 54. Учет спектральных характеристик съемочной системы при экспонетрических расчетах	190
Глава IX. Фотохимическая обработка материалов космической съемки	192
§ 55. Процесс проявления материалов космической съемки	192
§ 56. Проявление цветных негативов	202
§ 57. Обработка цветных обрабатываемых пленок	207
§ 58. Разрешающая способность цветных снимков	208
§ 59. Проявочные приборы для негативных фотоматериалов	211
§ 60. Быстрые процессы обработки фотопленок	216
§ 61. Электронно-оптические приборы для управления процессом проявления материалов космических съемок	220
Глава X. Позитивный процесс	222
§ 62. Основные характеристики позитивного процесса	222
§ 63. Фотографические материалы для позитивного процесса	227
§ 64. Приборы для печати позитивных изображений	228
§ 65. Фотохимическая обработка материалов позитивной печати	231
Глава XI. Информационные свойства космической съемочной системы и критерии оценки качества фотоизображения	231
§ 66. Структурная схема прохождения пространственных частот в съемочном канале	231
§ 67. Информация об объекте съемки	233
§ 68. Влияние атмосферы на информацию об объекте	233
§ 69. Передаточные частотные характеристики объектива	235
§ 70. Искажения информации об объекте приемником лучистой энергии	237
§ 71. Учет траекторных перемещений КЛА	238
§ 72. Критерий оценки качества фотоизображения по пограничным кривым	239
§ 73. Метод использования передаточной функции модуляции	241
§ 74. Определение качества фотографической системы по величине постоянной закона Гаусса	243
§ 75. Передаточная характеристика позитивного процесса	246

Глава XII. Телевизионные системы для космической съемки	247
§ 76. Классификация космических телевизионных систем	247
§ 77. Разрешающая способность и другие характеристики телевизионных космических съемочных систем	251
§ 78. Некоторые съемочные телевизионные системы	256
§ 79. Кадровая телевизионная съемка с космических летательных аппаратов	259
Глава XIII. Сканирующие системы	263
§ 80. Панорамная сканерная телевизионная съемка	263
§ 81. Панорамная телевизионная камера для съемки Венеры	267
§ 82. Геометрические свойства телевизионных снимков	270
§ 83. Инфракрасная съемка	275
§ 84. Геометрические свойства и разрешающая способность сканирующих систем	278
§ 85. Радиолокационная съемка	279
Список литературы	285

Надежда Павловна Лаврова

КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОСЪЕМКА

Редактор издательства Н. Т. Куприна
 Переплет художника В. У. Полякова
 Технические редакторы Н. С. Гришанова, А. Е. Матвеева
 Корректор Е. В. Наумова

ИБ № 3052

Сдано в набор 15.09.82. Подписано в печать 02.03.83. Т-06705. Формат 60×90¹/₁₆. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 18,0. Усл. кр.-отт. 18,0. Уч.-изд. л. 18,0. Тираж 5000 экз. Заказ 2426/7472—15. Цена 85 коп.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12.
 Третьяковский проезд, 1/19.

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград. Социалистическая ул., 14.

