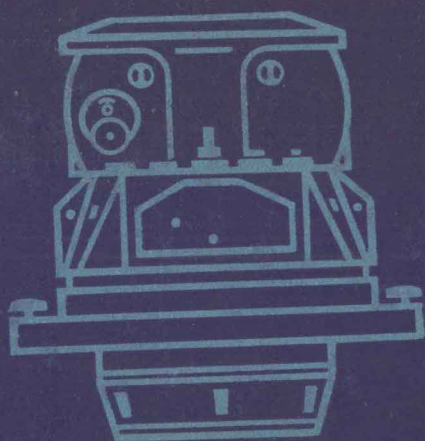




Я. Е. Щербаков

**РАСЧЕТ
И КОНСТРУИРОВАНИЕ
АЭРОФОТОАППАРАТОВ**

Я. Е. ЩЕРБАКОВ

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ АЭРОФОТО- АППАРАТОВ

Издание второе, переработанное и дополненное



Москва «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1979

ББК 37.940.2—5

Щ61

УДК 771.001.2

Рецензент В. Ю. Торочков

Щербаков Я. Е.

Щ61 Расчет и конструирование аэрофотоаппаратов. — 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. — 264 с., ил.

В пер.: 1 р.

В книге рассмотрены вопросы расчета и проектирования аэрофотоаппаратов для решения различных задач. Приведен анализ аэрофотографического процесса и рассмотрено влияние отдельных элементов фотографирующей системы на прохождение светового сигнала.

Особое внимание уделено рациональному выбору параметров отдельных элементов системы, а также вопросам автоматизации и повышения качества фотографического изображения при воздушном фотографировании. Приведены принципиальные схемы приборов и отдельных механизмов и даны рекомендации по их конструированию и методике расчета. Проанализированы погрешности аэрофотографического процесса.

Книга рассчитана на инженеров, занимающихся разработкой и эксплуатацией аэрофотоаппаратов.

Щ $\frac{31808-210}{038(01)-79}$ 210—79 4911030000

ББК 37.940.2—5
6П9.7

ИБ № 2561

Яков Ефимович Щербаков

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ АЭРОФОТОАППАРАТОВ

Редактор Г. П. Филипповская

Технический редактор Н. В. Тимофеевко

Корректор В. Е. Блохина

Переплет художника Е. Н. Волкова

Сдано в набор 27.12.78.

Подписано в печать 22.03.79.

T-06331.

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2.

Гарнитура литературная.

Печать высокая. Усл. печ. л. 16,5.

Уч.-изд. л. 17,4.

Тираж 1900 экз.

Зак. 1772.

Цена 1 р.

Издательство «Машиностроение», Москва, ГСП-6,
1-й Басманный пер., д. 3

Московская типография № 8 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли.
Хохловский пер., 7

© Издательство «Машиностроение», 1974 г.

© Издательство «Машиностроение», 1979 г. с изменениями.

Аэрофотооборудование является одним из основных средств изучения земной поверхности и включает в себя большой комплекс приборов.

В настоящее время созданы сложные автоматические фотографирующие системы, которые позволяют надежно решать разнообразные задачи в условиях быстро изменяющихся параметров полета и фотографируемой ситуации.

Разработка и создание таких фотографирующих систем, основу которых составляет аэрофотоаппарат, является достаточно сложной задачей, правильное решение которой требует тщательного изучения и безусловного выполнения всего комплекса общих технических и специальных фотограмметрических требований.

Широкое применение воздушного фотографирования обусловлено следующими факторами:

1. Полнотой и объективностью полученной информации.
2. Возможностью получения данных о размерах объектов и фотографируемых участков местности.
3. Возможностью искусственного усиления контраста в изображении фотографируемых объектов.
4. Независимостью воздушного фотографирования от высоты и скорости полета.
5. Возможностью определения происходящих изменений на фотографируемых объектах.
6. Высокой производительностью метода, определяемой большим углом поля зрения оптической системы.

Недостатками воздушного фотографирования являются зависимость от метеорологических условий, необходимость высокого уровня технологии процесса получения аэрофотоснимка и сравнительно большой срок обработки материалов.

Материалы воздушного фотографирования применяются в различных областях народного хозяйства (при создании карт местности, строительстве различных сооружений, морской съемке, лесоустройстве, геологических изысканиях, ледовой разведке, археологических работах, прогнозировании погоды и т. д.), а также при исследовании природных ресурсов Земли и охране окружающей среды.

ГЛАВА 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. АЭРОФОТОАППАРАТЫ

Аэрометод является одним из основных методов исследования и изучения поверхности земли и атмосферы, так как позволяет получить наиболее объективную информацию и обеспечивает возможность широкого использования ее в различных областях народного хозяйства, науки и техники.

В зависимости от используемого в качестве носителя информации участка спектра электромагнитных колебаний аэрометоды делятся на аэрофотосъемку, использующую видимую и ближнюю инфракрасную части спектра, и аэрогеофизическую съемку. Аэрогеофизическую съемку, в свою очередь, можно разделить на аэромагнитную, аэрорадиометрическую или аэрогаммасъемку, аэроспектрометрическую, аэрорадиолокационную, аэроэлектросъемку, аэрогравиметрическую и другие виды съемок.

Воздушное фотографирование, осуществляемое аэрофотоаппаратом, установленным на самолете или каком-либо другом летательном аппарате, характеризуется следующими особенностями.

1. Воздушное фотографирование осуществляется с нежесткого основания, совершающего сложное движение под действием непрерывных аэродинамических возмущений и вибраций.

2. Между объектом фотографирования и фотографирующей системой всегда находится слой атмосферы, обладающий свойством светорассеяния с ярко выраженной спектральной избирательностью.

3. Освещенность объектов фотографирования и их контраст изменяются в довольно значительном диапазоне, что предъявляет повышенные требования ко всей фотографирующей аппаратуре и к оптической системе в особенности.

4. Скорость изображения достигает таких значений, что вызывает сдвиг изображения и требует принятия специальных мер для его компенсации.

5. Изменяющиеся условия полета (температура, давление) влияют на параметры фотографирующей системы, что требует разработки способов компенсации этого влияния на качество изображения.

6. Малые размеры изображения объектов фотографирования требуют повышенной разрешающей способности системы объек-

тив — фотослой и увеличения добротности фотографирующей системы.

Важной особенностью воздушного фотографирования является постоянство фокусировки и независимость ее от высоты фотографирования, поскольку оптическая система аэрофотоаппарата настроена на бесконечность.

Современный аэрофотоаппарат (рис. 1.1) состоит из аэрофотокамеры, аэрофотоустановки и командного прибора.

В *аэрофотокамере* происходит построение оптического изображения и восприятие его светочувствительным слоем фотоматериала.

В аэрофотокамеру входят кассета, камерная и объективная части.

Кассета аэрофотоаппарата служит для размещения светочувствительного материала и механизмов перемотки и выравнивания аэрофотоплёнки в фокальной плоскости аэрофотокамеры.

По конструктивному оформлению кассеты аэрофотоаппаратов могут быть съёмными и выполненными совместно с камерной или объективной частями аэрофотокамеры. В последнем случае аэрофотоплёнка может размещаться в специальных пеналах.

Для того чтобы исключить влияние изменения положения центра тяжести при перематывании аэрофотоплёнки со сматывающей катушки на наматывающую, в процессе эксплуатации в аэрофотоаппаратах с большим запасом аэрофотоплёнки следует кассетную часть изолировать от остальных частей аэрофотокамеры.

В камерной части размещены элементы кинематической связи механизмов объективной части и кассеты, а также различные вспомогательные устройства.

Для получения высококачественных аэрофотоснимков очень важно, чтобы не нарушалось относительное расположение камерной и объективной частей, так как в камерной части располагается прикладная рамка аэрофотокамеры, фиксирующая положение ее фокальной плоскости. В этой же плоскости должен находиться и светочувствительный слой в момент экспонирования. Объективная часть аэрофотокамеры служит для размещения оптической системы аэрофотоаппарата.

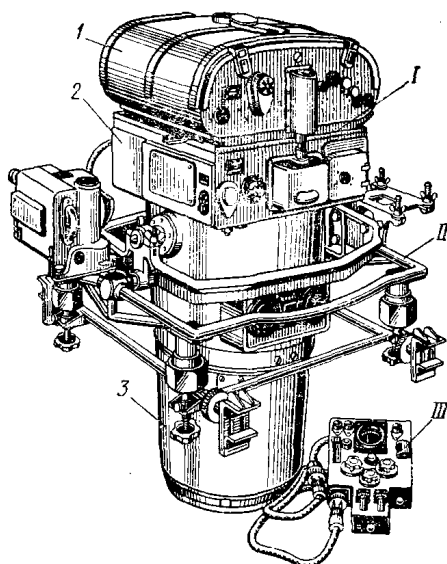


Рис. 1.1. Основные агрегаты и части аэрофотоаппарата:

I—аэрофотокамера; II—аэрофотоустановка; III—командный прибор; 1—кассета; 2—камерная часть; 3—объективная часть

В аэрофотокамере расположены следующие узлы и механизмы: механизм перемотки аэрофотоплёнки; выравнивающий механизм; распределительный механизм; оптическая система; аэрофотоза-
твор.

В аэрофотокамере могут располагаться также: механизм оптической компенсации сдвига изображения; механизм механической компенсации сдвига изображения; автоматический спуск или фотореле; автомат регулировки экспозиции; узел автоматической фокусировки аэрофотокамеры; узел регистрационных приборов; механизм смены светофильтров.

Аэрофотоустановка является промежуточным звеном между аэрофотокамерой и летательным аппаратом, на котором она установлена. Аэрофотоустановка служит для обеспечения требуемого положения аэрофотокамеры в пространстве и уменьшает вредные воздействия внешних и внутренних возмущений.

Командный прибор входит в комплект автоматических аэрофотоаппаратов и служит для дистанционного управления и контроля за работой всего аэрофотосъёмочного оборудования. В современных сложных фотографирующих комплексах командные приборы могут являться промежуточным звеном, связывающим аэрофотооборудование с навигационной системой и с бортовыми вычислительными устройствами.

Все современные аэрофотоаппараты имеют специальные устройства для впечатывания в межкадровый промежуток или в площадь аэрофотоснимка по его краям или углам необходимой информации об элементах внутреннего и внешнего ориентирования снимка, параметрах полета, пространственном положении самолета в момент фотографирования, дате и времени фотографирования и других данных.

В некоторых аэрофотоаппаратах впечатывается сенситометрический клин для облегчения фотохимической обработки аэрофильма и ее оценки.

Количество и характер фиксируемой в процессе фотографирования дополнительной информации определяется назначением аэрофотооборудования и конструктивными параметрами самолета (наличием бортовой ЭВМ, навигационных вычислительных устройств).

Фиксация указанных данных может быть осуществлена при помощи специальной точечной или мозаичной матрицы в закодированном виде, например в двоичном коде. Преобразование данных в световые сигналы осуществляется промежуточным электронным блоком, а передача их для фиксирования на фотопленке может быть осуществлена при помощи элементов из жгутов волоконного стекла.

Совокупность действий механизмов аэрофотоаппарата, которые необходимы для выполнения каждого очередного экспонирования аэрофотоплёнки, называется циклом работы аэрофотоаппарата.

Отдельные виды действий механизмов аэрофотоаппарата, со-

ставляющие в совокупности цикл его работы, называются элементами цикла.

К основным элементам цикла относятся следующие виды действий: перемотка аэрофотоплёнки; выравнивание аэрофотоплёнки; взвод и спуск аэрофотозатвора; подъем прижимного стола; работа аэрофотоустановки; работа механизма компенсации.

Количество элементов цикла и порядок их чередования определяются конкретной конструкцией аэрофотоаппарата.

Строгая последовательность действий механизмов аэрофотоаппарата, которая должна сохраняться в течение всего периода эксплуатации, устанавливается в процессе механической юстировки.

Цикл работы аэрофотоаппарата обычно изображают в виде графика, называемого циклограммой. Циклограмма характеризует последовательность элементов цикла в зависимости от времени или числа оборотов двигателя.

При составлении циклограммы необходимо иметь в виду:

1. Спуск аэрофотозатвора должен совпадать с неподвижным и выравненным положением плёнки в плоскости прикладной рамки аэрофотокамеры.

2. Началу перемотки аэрофотоплёнки должно предшествовать освобождение ее от действия выравнивающего механизма.

3. Выравнивание аэрофотоплёнки должно заканчиваться после перемотки проэкспонированного участка плёнки.

Цикл работы аэрофотоаппарата происходит в течение определенного промежутка времени, называемого продолжительностью цикла работы аэрофотоаппарата.

У современных аэрофотоаппаратов продолжительность цикла работы аэрофотоаппарата может изменяться от нескольких десятых долей секунды у специальных аэрофотоаппаратов и до нескольких секунд у топографических.

Для уменьшения продолжительности цикла работы отдельные элементы цикла необходимо совмещать по времени. Продолжительность цикла работы аэрофотоаппарата зависит от схемы его работы. Аэрофотоаппараты, работающие по импульсной схеме, имеют постоянное значение продолжительности цикла, а аэрофотоаппараты, работающие по непрерывной схеме, — переменное значение, изменяемое в определенном интервале в зависимости от условий фотографирования.

Современные аэрофотоаппараты работают по импульсной схеме, обеспечивающей постоянство продолжительности элементов цикла, удобство механической юстировки и высокую точность продольного перекрытия.

Рациональное построение циклограммы работы аэрофотоаппарата должно предусматривать такой порядок чередования элементов цикла, при котором экспонирование аэрофотоплёнки происходило бы при колебаниях аэрофотоаппарата, меньших пороговых значений этих колебаний [19, 21]. В этом случае первым элементом цикла должно быть срабатывание аэрофотозатвора.

Общие технические требования к аэрофотоаппаратам определяются спецификой эксплуатации всего аэрофотооборудования. К ним относятся малые габариты и масса, высокая надежность, возможность дистанционного управления и контроля, максимально возможная автоматизация основных процессов, удобство в эксплуатации и простота в обслуживании, малая стоимость и минимум потребляемой энергии.

Основное требование, предъявляемое к аэрофотоаппаратам, — обеспечение высокого качества изображения, которое может быть выполнено только при следующих условиях:

1. Максимальная разрешающая способность по всему полю изображения и высокая добротность.

2. Минимальная величина сферической и хроматической аберраций, а также астигматизма.

3. Высокая ортоскопичность оптической системы.

4. Большая светосила оптической системы и правильная передача контраста изображения.

5. Отсутствие влияния работы аэрофотозатвора на качество изображения. Затвор не должен вносить искажений в изображение и должен иметь высокий оптический коэффициент полезного действия.

6. Высоточное выравнивание аэрофотоплёнки в фокальной плоскости аэрофотокамеры.

7. Высокое качество амортизации аэрофотокамеры.

8. Постоянство элементов внутреннего ориентирования: фокусного расстояния камеры и главной точки снимка.

Важными требованиями являются возможность стабилизации оптической оси и введение поправки на угол сноса, а также сохранение заданного интервала между циклами. Удовлетворение этих требований обеспечивает постоянство перекрытия между снимками.

При разработке и проектировании аэрофотооборудования, выполняемого в соответствии с техническим заданием, первоочередной задачей является выбор структурной схемы, разработка функциональных и принципиальных схем (оптической, кинематической, электрической) и выполнение предварительных расчетов.

В техническом задании должны быть указаны назначение аэрофотоаппарата, требования к качеству изображения, вид и форма носителя информации, запас аэрофотоплёнки, спектральный диапазон фотографирования, габаритные и массовые соотношения, степень и характер автоматизации, характеристики носителя и условия эксплуатации, сведения об источниках энергии.

В процессе дальнейшего проектирования необходимо решить следующие основные вопросы: определить параметры оптической системы, размер кадра, требования к механизмам перемотки и выравнивания аэрофотоплёнки, параметры аэрофотозатвора, продолжительность цикла и составить циклограмму, параметры элементов привода аэрофотоаппарата и отдельных его механизмов, требования к приборам управления и их состав, требования к аэрофото-

установке. На этом этапе проектирования могут быть решены и уточнены и другие дополнительные вопросы, такие как, например, необходимость компенсации сдвига изображения, стабилизация положения оптической оси в момент фотографирования, характер регулирования экспозиции.

Особое внимание при разработке аэрофотооборудования следует обращать на уменьшение габаритных и массовых соотношений, получение необходимой точности — высокого качества изображения, на технологичность конструкции, рациональное построение циклограммы, высокую надежность элементов, механизмов и всего прибора в целом, на уменьшение потребляемой энергии, удобство эксплуатации в различных условиях и максимальную степень автоматизации.

Рассмотрим наиболее характерные системы классификации, определяющие основные параметры конструкции аэрофотоаппарата.

По принципу работы аэрофотоаппараты могут быть неавтоматические, полуавтоматические и автоматические.

По схеме работы механизмов аэрофотоаппараты делятся на импульсные аэрофотоаппараты и аэрофотоаппараты непрерывного действия.

По характеру движения аэрофотоплёнки во время цикла их можно разделить на кадровые аэрофотоаппараты и аэрофотоаппараты непрерывного изображения на циклические и бесциклические.

По решению задач современные аэрофотоаппараты можно классифицировать на аэрофотоаппараты дневного фотографирования для измерительных, топографических целей, аэрофотоаппараты кадровые, панорамные и щелевые для дневного фотографирования, аэрофотоаппараты для ночного фотографирования, аэрофотоаппараты научного и прикладного назначения.

По характеру используемого светочувствительного материала аэрофотоаппараты делятся на пластинчатые и плёночные.

По величине фокусного расстояния аэрофотоаппараты могут быть короткофокусные ($f' < 100$ мм), среднефокусные ($f' < 500$ мм), длиннофокусные ($f' > 500$ мм).

По углу поля зрения аэрофотоаппараты могут быть узкоугольные ($2W < 50^\circ$), нормальные ($2W < 80^\circ$), широкоугольные ($2W > 110^\circ$), сверхширокоугольные ($2W > 150^\circ$).

По формату аэрофотоснимка аэрофотоаппараты могут быть условно классифицированы на малоформатные (менее 18×18 см), нормальноформатные (18×18 см), крупноформатные (более 18×18 см).

По свойствам аэрофотоснимка или по положению оптической оси аэрофотоаппараты могут быть: плановые, перспективные, панорамные.

Плановые аэрофотоаппараты характеризуются вертикальным положением оптической оси с максимальным отклонением ее от вертикали на угол $\pm 3^\circ$.

Перспективные аэрофотоаппараты имеют постоянное отклонение оптической оси от вертикали на угол более 3° .

Аэрофотоаппараты для панорамного фотографирования отличаются наличием бесконечно узкой связки проектирующих лучей, вращающейся вокруг оси, проходящей через заднюю узловую точку оптической системы аэрофотоаппарата.

1.2. АНАЛИЗ АЭРОФОТОГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Сигнал от объекта фотографирования характеризуется пространственно-частотным распределением яркостей B_0 . При прохождении через слой атмосферы он изменяется под действием различных атмосферно-оптических факторов и на высоте аэрофотоаппа-

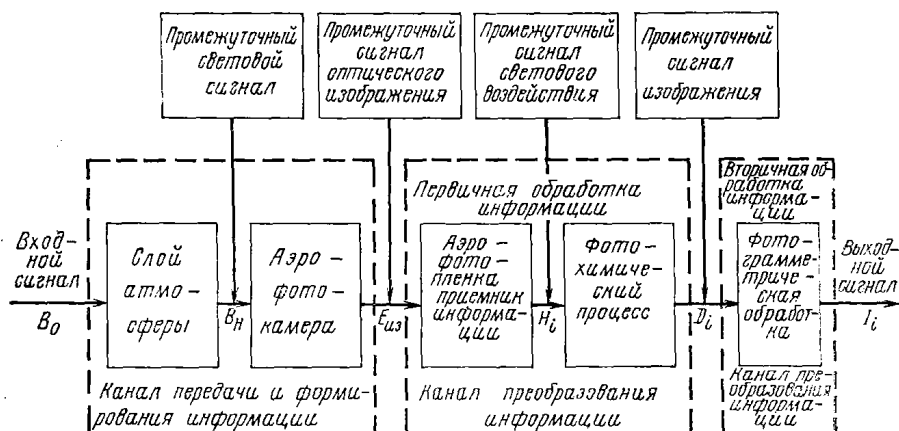


Рис. 1.2. Функциональная схема аэрофотограмметрического процесса

рата (высоте фотографирования) этот промежуточный световой сигнал будет характеризоваться пространственно-частотным распределением яркостей B_H с учетом влияния атмосферы (рис. 1.2). Поступая в оптическую систему аэрофотоаппарата, сигнал, характеризующий пространственно-частотное распределение яркостей B_H , формируется оптической системой аэрофотоаппарата в промежуточный сигнал оптического изображения $E_{из}$, являющийся выходным сигналом канала передачи и формирования информации. Этот же сигнал $E_{из}$ служит входным сигналом канала первичной обработки информации — канала преобразования информации. Промежуточный сигнал оптического изображения $E_{из}$, представляющий пространственно-частотное распределение освещенности изображения в фокальной плоскости аэрофотокамеры с учетом параметров аэрофотоаппарата и условий фотографирования, взаимодействует со светочувствительным слоем аэрофотопленки, играющей роль приемника информации, и преобразуется в промежуточный сигнал светового воздействия H_i , представляющий пространственно-частотное распределение экспозиции по полю изображения и характеризующий эффект взаимодействия

энергии света со светочувствительным слоем аэрофотопленки. В дальнейшем в процессе фотохимической обработки аэрофотопленки этот сигнал H_i преобразуется в промежуточный сигнал изображения D_i , являющийся пространственно-частотным распределением плотности изображения на светочувствительном слое. Этот сигнал является выходным сигналом канала первичной обработки информации и входным сигналом для канала вторичной обработки информации, основу которого составляет фотограмметрическая обработка изображения. При фотограмметрической обработке промежуточный сигнал изображения D_i преобразуется соответствующими методами с целью получения необходимого информационного критерия I_i , являющегося выходным сигналом всего аэрофотограмметрического процесса.

Для того чтобы можно было оценить влияние каждого элемента системы на входной сигнал, а также на аэрофотоснимок, необходимо выбрать критерий качества изображения, который должен удовлетворять следующим основным требованиям [10, 12]:

1. Быть однозначным в оценке свойств изображения и в оценке изменений этих свойств.

2. Допускать возможность оценки влияния каждого элемента системы в отдельности и всей фотографирующей системы.

3. Быть однозначным в оценке связи критерия качества изображения и свойств аэрофотоснимка (измерительных и дешифровочных).

4. Позволять использовать критерий качества для анализа и синтеза фотографирующей системы.

5. Допускать возможность использования критерия качества для оценки работы сложных систем.

6. Позволять фиксировать с требуемой чувствительностью изменение качества изображения.

Все элементы, участвующие в построении изображения, ухудшают качество изображения. В результате этого физическая точка объекта будет воспроизведена фотографирующей системой в виде множества точек, характеризующих кружок нерезкости или «размытость».

Для оценки влияния каждого элемента реальной фотографирующей системы на входной сигнал введем понятие функции рассеяния, которая будет характеризовать закон изменения световой энергии в пределах нерезкости и его форму.

Функция рассеяния является элементарной характеристикой проектирующей системы и всех элементов фотографического процесса и позволяет достаточно просто проанализировать распределение освещенности в плоскости изображения одномерного объекта фотографирования, а также определить геометрическую форму кружка рассеяния в изображении точечного объекта.

Функция рассеяния характеризует влияние aberrаций, дифракции, дефокусировки, свойств затвора, светорассеяния и других факторов на характер изменения освещенности изображения тест-объекта. Функция рассеяния полностью определяет процесс преобра-

зования фотографирующей системой входного сигнала, и поэтому ее можно назвать также передаточной функцией всей фотографирующей системы в целом или каждого элемента системы в отдельности.

Функции рассеяния могут быть получены (рис. 1.3, а) фотометрированием изображения точки малым сканирующим отверстием (двухмерная функция) или фотометрированием изображения длинной узкой щели (одномерная функция).

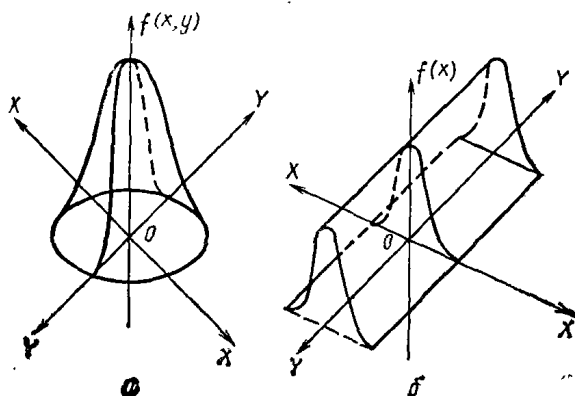


Рис. 1.3. Функции рассеяния

В фотографии часто используется одномерная функция рассеяния, характеризующая изменение световой энергии в изображении бесконечно длинной светлой линии в направлении, перпендикулярном оси линии (рис. 1.3, б).

Функция рассеяния линии называется еще линейно-импульсной реакцией системы или в сложной системе линейно-импульсной реакцией каждого из элементов системы. Функция рассеяния линии $f(x')$ является функцией только одной ординаты и представляет собой x -сечение двумерной функции рассеяния $f(x', y')$ — $x'=0$ и может быть получена из соотношения

$$f(x') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') dy'. \quad (1.1)$$

Если функция рассеяния линии представляет собой V -сечение двумерной функции рассеяния $f(x', y')$ — $y'=0$, она может быть получена из соотношения

$$f(y') = \int_{-\infty}^{\infty} f(x', y') dx'. \quad (1.2)$$

Закон изменения интенсивности в изображении бесконечно узкой щели, освещенной некогерентным светом, будет характеризовать одномерную функцию рассеяния. Функция рассеяния для различных точек изображения из-за aberrаций будет принимать раз-

личные значения. Однако в пределах некоторой области плоскости изображения в связи с медленным изменением значений аберраций по полю изображения можно считать функцию рассеяния постоянной. Этот участок в плоскости изображения называется изопланатическим, а сама оптическая система будет изопланатична.

Распределение интенсивности в изображении можно найти как суперпозицию синусоидальных и косинусоидальных составляющих бесконечно большого числа бесконечно малых величин пространственных распределений интенсивности.

Оптическая система, удовлетворяющая условиям суперпозиции и изопланатизма, будет характеризоваться свойствами линейной системы.

Не все элементы рассматриваемого аэрофотографического процесса имеют функцию рассеяния или импульсную реакцию, постоянную во времени. Для данного момента времени t функции рассеяния элементов можно считать постоянными и однозначными, однако при изменении внешних условий (температуры, давления, вибрации, солнечной радиации, скорости полета и др.) значение функций рассеяния может изменяться. В этом случае изображение может описываться двумя интегралами: первый интеграл будет характеризовать изображение при нулевых начальных условиях, а второй — характеризовать изменение параметров изображения при условиях, отличных от нулевых.

Функции рассеяния каждого элемента системы являются непериодическими и, следовательно, могут быть представлены суммой периодических составляющих в форме интеграла Фурье, т. е. суммой бесконечно большого числа бесконечно малых значений функции бесконечно близких по частоте:

$$f(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(x') e^{-j2\pi N x'} dx' \right] e^{j2\pi N x'} dN, \quad (1.3)$$

где N — пространственная частота в 1/мм.

Введем [17]

$$S(N) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x') e^{-j2\pi N x'} dx' \quad (1.4)$$

и получим формулу для интеграла Фурье в комплексной форме

$$f(x') = \int_{-\infty}^{\infty} S(N) e^{j2\pi N x'} dN. \quad (1.5)$$

Эти две формулы (1.4) и (1.5) представляют собой пару преобразований Фурье и связывают между собой две функции: вещественную функцию расстояния $f(x')$ и комплексную функцию пространственной частоты $S(N)$.

Так как комплексная амплитуда dC каждого отдельного колебания бесконечно мала, а также бесконечно мал и частотный

интервал dN между двумя колебаниями, то спектр амплитуд будет изображаться непрерывной последовательностью точек. Такой спектр носит название сплошного и определяется как спектральная плотность процесса по формуле

$$S(N) = \pi dC / dN. \quad (1.6)$$

Обычно величину $S(N)$ называют комплексным спектром непериодической функции, а абсолютное значение (модуль этой величины)

$$\Phi(N) = |S(N)| \quad (1.7)$$

— просто спектром.

Величина $\Phi(N)$, как правило, монотонно убывает с увеличением пространственной частоты N и характеризует, с какой амплитудой система передает сигнал освещенности на частоте N_i при условии, что амплитуда на входе была равна амплитуде при $N_0=0$.

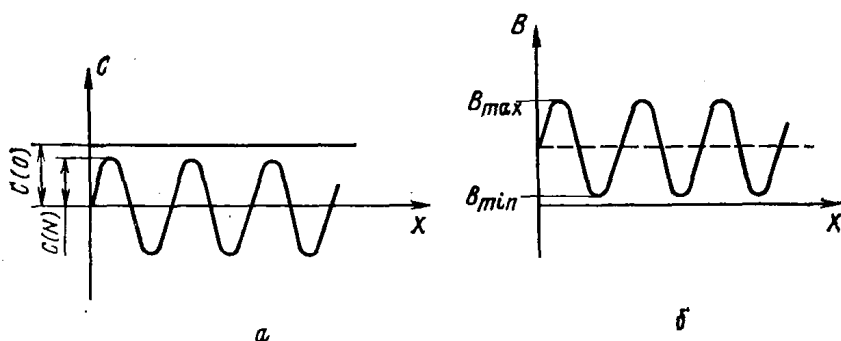


Рис. 1.4. К выводу формулы контраста

Обычно для получения однозначных и сравнимых характеристик элементов системы при спектральном анализе используют нормированную функцию рассеяния или иначе функцию веса элемента или системы, удовлетворяющую условию

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x') dx' = 1. \quad (1.8)$$

Спектр такой нормированной функции рассеяния при пространственной частоте N_0 , равной нулю,

$$\Phi(0) = 1.$$

Из общего бесконечно большого числа гармонических составляющих, образующих функцию рассеяния $f(x')$, выделим две гармоники на частоте 0 и частоте N_i (рис. 1.4,а). График, характеризующий сумму этих двух гармоник $f(0)$ и $f(N_i)$, показан на рис. 1.4,б.

Как видно из графиков,

$$\begin{aligned} B_{\max} &= C(0) + C(N_i); \\ B_{\min} &= C(0) - C(N_i); \\ \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} &= \frac{2C(N_i)}{2C(0)} = \Phi(N_i). \end{aligned}$$

Если $\Phi(0)=q$, то имеем $q \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}} = \Phi_q(N)$.

Если спектр функции рассеяния определяется по нормированной функции ($q=1$), то он характеризует зависимость контраста изображения от частоты при исходном контрасте синусоидальной миры, равном единице.

Если же

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x') dx = q, \quad (1.9)$$

где $q < 1$, то спектр будет характеризовать зависимость контраста изображения от частоты при исходном контрасте миры, равном q .

В фотографии значение нормированного спектра обычно обозначают $T(N)$, т. е.

$$\Phi_{q=1}(N) = T(N), \quad (1.10)$$

и называют комплексной частотно-контрастной характеристикой или комплексным коэффициентом передачи контраста, т. е. ЧКХ и КПК соответственно.

Функция $T(N)$ определяется отношением контраста изображения тест-объекта к контрасту тест-объекта и связана с комплексной функцией передачи контраста или с комплексной частотно-контрастной характеристикой зависимостью

$$T(N) = |T(N)| e^{-j\varphi(N)}. \quad (1.11)$$

В этой формуле смещение фазы $\varphi(N)$ является аргументом комплексной функции и называется частотно-фазовой характеристикой, которая характеризует смещение фазы в изображении тест-объекта при изменении пространственной частоты.

Наличие смещения фазы определяется несоответствием местоположения точек изображения по отношению соответствующих точек объекта, что в проектирующей системе может быть вызвано дисторсией, комой и астигматизмом.

При анализе и синтезе сложных фотографирующих систем необходимо провести сравнительную оценку влияния свойств отдельных элементов системы на ЧКХ всей системы.

Используя понятие свертки функций и распространяя его последовательно на все элементы фотографирующей системы, напишем формулу для вычисления результирующего значения ЧКХ всей фотографирующей системы

$$T(N) = T_1(N) T_2(N) \dots T_n(N). \quad (1.12)$$

ЧКХ одномерных функций рассеяния элементов фотографирующей системы

Вид функции рассеяния элемента системы	Значение ЧКХ элемента системы
1. $f(x) = \frac{2,3}{K_{\Phi}} e^{-4,6 \frac{ x }{K_{\Phi}}}$ Экспоненциальная функция рассеяния фотоэлемента с противоореальной защитой	$T(N) = S(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{2,3}{K_{\Phi}} e^{-4,6 \frac{ x }{K_{\Phi}}} e^{-j2\pi Nx} dx$ $T(N) = \frac{1}{1 + 1,86 (NK_{\Phi})^2}$
2. $f(x) = \begin{cases} h & \text{при } \frac{a}{2} \geq x \geq -\frac{a}{2} \\ 0 & \text{при } -\frac{a}{2} > x > \frac{a}{2} \end{cases}$ Прямоугольная функция рассеяния сдвига изображения от затвора при $\eta_{\text{опт}} = 1,0$	$T(N) = S(N) = \int_{-a/2}^{+a/2} h e^{-j2\pi Nx} dx$ $T(N) = \frac{\sin \pi Na}{\pi Na}$
3. $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2}$ Колокольная функция рассеяния для случая вибрации при $\eta_{\text{опт}} = 1,0$	$T(N) = S(N) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-x^2/2\sigma^2} e^{-j2\pi Nx} dx$ $T(N) = e^{-2(\pi N\sigma)^2}$
4. $f(x) = \begin{cases} h & \text{при } b \geq x \geq -b \\ 0 & \text{при } -a \geq x \geq a \end{cases}$ $\frac{h(a-x)}{a-b}$ при $b < x < a$ Трапецидальная функция рассеяния сдвига изображения	$T(N) = S(N) = \int_{-a}^{+a} \frac{h(a-x)}{a-b} e^{-j2\pi Nx} dx$ $T(N) = \frac{1}{(a^2 - b^2) \pi^2 N^2} \times$ $\times \left(\cos \frac{2\pi Nb}{2} - \cos \frac{2\pi Na}{2} \right)$
5. $f(x) = h \cos \frac{\pi}{a} x$ $a = \frac{1}{2} \Delta f' \frac{2d}{f'}$ Косинусоидальная функция рассеяния расфокусировки	$T(N) = S(N) = \int_{-a/2}^{+a/2} h \cos \frac{\pi}{a} x e^{-j2\pi Nx} dx$ $T(N) = \frac{\cos \pi Na}{1 - 4N^2 a^2}$