

3869



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

Е.Г. Зайцева

ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ВИДЕОСЪЕМКИ

Учебно-методическое пособие

Минск
БНТУ
2010

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Конструирование и производство приборов»

Е.Г. Зайцева

ОБЪЕКТИВЫ ДЛЯ ВИДЕОСЪЕМКИ

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Приборы и системы записи
и воспроизведения аудио- и видеoinформации»
для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты»
специализации 1-38 01 01 05 «Бытовые машины,
приборы и аппаратура»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением высших
учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области приборостроения*

Минск
БНТУ
2010

УДК 681.77

~~ББК 37.95~~

3-17

Рецензенты:

С.К. Дик, Ю.А. Бумай

Зайцева, Е.Г.

3 17 Объективы для видеосъемки: учебно-методическое пособие по дисциплине «Приборы и системы записи и воспроизведения аудио- и видеоинформации» для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические и электромеханические приборы и аппараты» специализации 1-38 01 01 05 «Бытовые машины, приборы и аппаратура» / Е.Г. Зайцева. – Минск: БНТУ, 2010. – 56 с.

ISBN 978-985-525-360-1.

Приведена информация об объективах, предназначенных для кино- и видеосъемки. Рассмотрены основные характеристики объективов, определяющие различные показатели качества формируемого ими изображения.

УДК 681.77

ББК 37.95

ISBN 978-985-525-360-1

© Зайцева Е.Г., 2010

© БНТУ, 2010

Оглавление

Предисловие	4
1. Оптические компоненты объективов	5
2. Классификация характеристик объективов по показателям качества формируемого изображения	8
3. Характеристики объективов, связанные с масштабом изображения и границами изображаемого пространства	9
4. Характеристики, связанные с яркостью и спектральным составом изображения.....	17
5. Характеристики, связанные с резкостью.....	27
6. Характеристики, связанные с геометрическими искажениями	51
Литература.....	54

Предисловие

Зрительная информация составляет основную часть от общего количества информации, воспринимаемой человеком. Если остальные элементы системы преобразования визуальной информации (преобразователи «свет-сигнал», обработка, воспроизводящие изображение устройства) в процессе совершенствования видеотехники претерпели значительные изменения, то принцип формирования изображения с помощью оптики остался практически неизменным. Объектив является первичным звеном системы, предназначенной для записи, хранения и воспроизведения визуальной информации. Поэтому высокое качество преобразования изображения в объективе является необходимым условием для получения успешного конечного результата.

В данном пособии приведена информация об объективах, предназначенных для кино- и видеосъемки. Рассмотрены основные характеристики объективов, определяющие различные показатели качества формируемого ими изображения.

1. Оптические компоненты объективов

В [1] понятие «объектив» определяется как один или несколько линзовых элементов, изготовленных из специального оптического стекла или пластмассы, предназначенных для формирования резкого изображения на фотопленке, фотобумаге или на проекционных экранах. Следует отметить, что, во-первых, нельзя ограничивать гамму материалов оптических элементов только двумя. Оптические растры для стереоскопической и интегральной фотографии изготавливали из хромированной желатины [2]. Кроме того, известна попытка создать объектив для мобильного телефона из слоев воды и масла внутри трубки с оперативно управляемыми гидрофобными и гидрофильными свойствами. Иногда изображение в камере формируется не одним, а множеством объективов. На рис. 1.1 представлены приведенные в [2] схемы многообъективных фотоаппаратов.

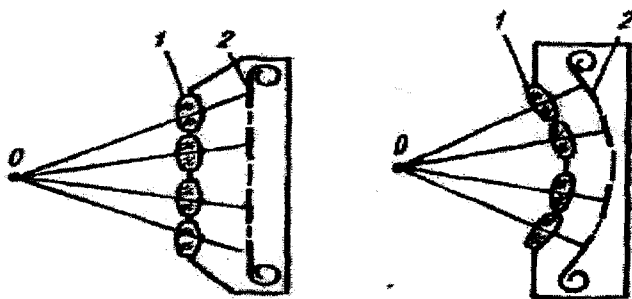


Рис. 1.1. Принципиальные схемы многообъективных фотоаппаратов:
1 – объектив; 2 – фотопленка

Во-вторых, не следует забывать, что объектив формирует в пространстве не плоское, а объемное изображение объекта, а на поверхности носителя информации (кинопленка, светочувствительная мишень, матрица) формируется проекция этого изображения. В будущем дальнейшее усовершенствование

носителей информации и способов записи даст возможность фиксировать не проекции этого объемного изображения, а все изображение в целом.

Способность объектива формировать оптическое изображение обусловлена преломляющими, иногда еще и отражающими свойствами оптических сред, из которых состоят элементы объектива. На рис. 1.2 и 1.3, приведенных в [3], представлены схемы так называемых зеркально-линзовых объективов, которые кроме преломляющих оптических элементов содержат и зеркальные поверхности.

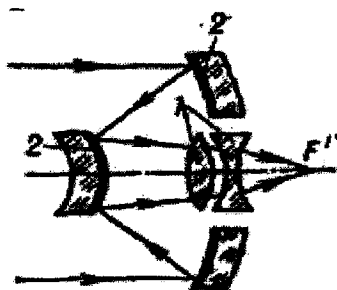


Рис. 1.2. Оптическая схема зеркально-линзового объектива с пятью компонентами: 1 – линза; 2 – сферическое зеркало; F' – фокус

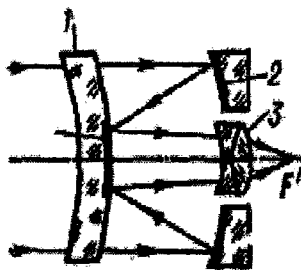


Рис. 1.3. Оптическая схема зеркально-линзового объектива с четырьмя компонентами и большим мениском:
1 – линза; 2 – сферическое зеркало; 3 – склеенные линзы

Эффекты преломления и отражения света являются основной законов геометрической оптики для объективов. Полностью охарактеризовать оптические системы с использованием

только законов геометрической оптики нельзя, так как последние соблюдаются в полной мере лишь для бесконечно узкого пучка лучей, проходящего близко к оптической оси объектива и наклоненного к ней под небольшим углом. Поэтому при анализе свойств объектива, определяющих качество изображения, учитываются и эффекты физической оптики. К таким эффектам относятся дифракция, aberrации.

Современный объектив представляет собой не просто совокупность оптических элементов и диафрагмы. Кроме традиционных элементов он дополнительно содержит электронно-механическую систему. В ее состав входят датчики положения отдельных оптических элементов, степени раскрытия диафрагмы, двигатели и приводные механизмы для перемещения линз, управления диафрагмой, электрические цепи и компьютерное обеспечение для автоматического и ручного управления элементами объектива. На рис. 1.4 представлена приведенная в [4] оптическая схема современного объектива.

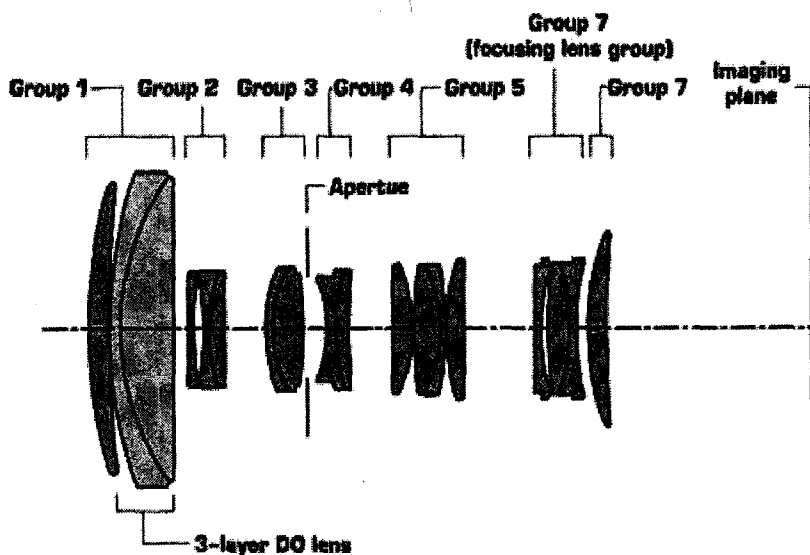


Рис. 1.4. Оптическая схема объектива

Часть показанных на рис. 1.4 линз имеет возможность перемещения, соответственно оснащена датчиками перемещения и соединена с приводным механизмом.

Перемещение линз объектива в продольном направлении обслуживает функции трансфокации и фокусировки. В настоящее время появились объективы, в которых линзы перемещаются перпендикулярно оптической оси или наклоняются относительно нее. Это используется в функциях устранения искажений перспективы, возникающих из-за непараллельности плоскости матрицы и снимаемого объекта. Такие объективы носят названия РС-объективы (аббревиатура английских слов "perspective control" или управление перспективой) или T-S-объективы (Tilt-Shift-объективы). Аналогичное перемещение линз используется в системах оптической стабилизации изображения, предназначенных для компенсации дрожания видеокамеры при съемках без опоры.

Объектив для комбинированной съемки (обычной и 3D) имеет возможность поворота двух линз под углом друг к другу, в результате чего записывается не одно, а два изображения в разных ракурсах, что позволяет воспроизвести стереоскопическое изображение. При необходимости указанная функция может отключаться, тогда воспроизведенное изображение будет плоским.

2. Классификация характеристик объективов по показателям качества формируемого изображения

Существует множество классификаций характеристик объективов.

На основании приведенного в [5] анализа этих классификаций рационально все характеристики объективов разделить на следующие основные группы с учетом влияния характеристик на различные показатели качества формируемого изображения.

1. Характеристики, определяющие масштаб изображения и границы изображаемого пространства (фокусное расстояние,

заднее вершинное фокусное расстояние, рабочий отрезок, углы поля зрения и изображения).

2. Характеристики, определяющие распределение яркости в изображении и его спектральный состав (эффективное относительное отверстие, коэффициент светопропускания, коэффициент спектрального пропускания, распределение освещенности по полю изображения, коэффициент светорассеяния).

3. Характеристики, определяющие резкость изображения (абберации вида «сферическая абберация», «кома», «хроматическая абберация», «астигматизм» и «кривизна поля изображения», функция передачи модуляции (ФПМ), называемая еще амплитудно-частотной или частотно-контрастной характеристикой).

4. Характеристики, определяющие геометрические искажения изображения (абберации вида «дисторсия», отношение фокусного расстояния к диагонали кадра).

Для операторов важны также эргономические и эксплуатационные характеристики (габаритные размеры, конфигурация, масса, способы управления параметрами объектива, условия эксплуатации).

3. Характеристики объективов, связанные с масштабом изображения и границами изображаемого пространства

Масштаб получаемого изображения – это соотношение размеров снимаемого объекта и его изображения [5]. Он равен отношению фокусного расстояния объектива к дистанции съемки (расстоянию между объективом кинокамеры и объектом киносъемки).

Фокусным расстоянием объектива называется расстояние от главной плоскости объектива до соответствующего фокуса [6].

Фокусом называется точка, в которой пересекаются после преломления все лучи, падающие на объектив параллельно оптической оси. Если параллельный пучок лучей идет из про-

странства предметов и образует фокус в пространстве изображений, то такой фокус называется задним. Если наоборот, пучок из пространства изображений собирается в пространстве предметов, то такой фокус называется передним. В оптике принято считать, что световые лучи идут слева направо, то есть слева находится пространство предметов, а справа – пространство изображений.

Использование понятий «передняя и задняя главные плоскости объектива» позволяет упростить расчет хода лучей через оптическую систему. В промежутке между передней (в пространстве предметов) и задней (в пространстве изображений) плоскостями все оптические лучи параллельны оптической оси.

Фокусное расстояние от передней главной плоскости до переднего фокуса называется передним фокусным расстоянием. Так как по определению оно отсчитывается справа налево (против обычного хода лучей в оптике), его считают отрицательным. Фокусное расстояние от задней главной плоскости до заднего фокуса называется задним фокусным расстоянием. Оно отсчитывается слева направо (по ходу лучей в оптике) и является положительным. В технических характеристиках кино- и видеообъективов указывается заднее фокусное расстояние. Если показатели преломления среды в пространстве объектов и в пространстве изображений одинаковы, например, воздух при обычной видеосъемке, то заднее и переднее фокусные расстояния равны между собой. Если оптические среды до и после объектива имеют разные показатели преломления, например, вода и воздух, то абсолютные значения фокусных расстояний (переднего и заднего) прямо пропорциональны соответствующим показателям преломления.

При одном и том же расстоянии до снимаемого объекта объективы с разным фокусным расстоянием обеспечивают разный масштаб съемки и по-разному передают глубину пространства. В зависимости от этих параметров их делят на 3 группы: нормальные, короткофокусные и длиннофокусные. Границы между этими тремя группами определяются соотно-

шением фокусного расстояния и диагонали кадра. Диагональ кадра в цифровых видеокамерах равна диагонали матрицы. Это значение указано в паспорте видеокамеры, как правило в дюймах, необходимо перевести его в миллиметры, умножив его на коэффициент 25,4.

Нормальным считается объектив, у которого фокусное расстояние равно удвоенной диагонали кадра. В [5] указано, что нормальные объективы дают изображения с естественной, неискаженной перспективой, ими часто снимают средние планы, а при съемке нормальным объективом крупных планов появляются искажения, обусловленные нарушением пропорций деталей объекта съемки, находящихся на разном расстоянии от кинокамеры (например, непропорциональное увеличение протянутой к аппарату руки актера).

Длиннофокусные объективы, у которых фокусное расстояние больше удвоенной диагонали кадра, сокращают глубину снимаемого пространства. Все предметы кажутся сплюснутыми по глубине. Скорость движения вглубь кадра и обратно замедляется. В [7] приведены формулы, позволяющие рассчитать, насколько изменяется при восприятии темп движения вдоль оптической оси объектива в зависимости от фокусного расстояния объектива и других параметров.

Увеличение фокусного расстояния объектива уменьшает глубину резко изображаемого пространства. Глубина резко изображаемого пространства – это расстояние вдоль оптической оси объектива между двумя плоскостями в пространстве предметов, в пределах которого предметы изображаются на светочувствительном слое фотоматериала достаточно резко [6]. Таким образом, фокусное расстояние влияет на резкость в изображении самых близких и самых далеких предметов в кадре.

На рис.3.1 представлена фотография, где из-за малой глубины резко изображаемого пространства верхняя и нижняя часть наклонного пня с грибами получились нерезкими, а центральная часть пня, по которой осуществлялась наводка на резкость, имеет хорошее качество по резкости.

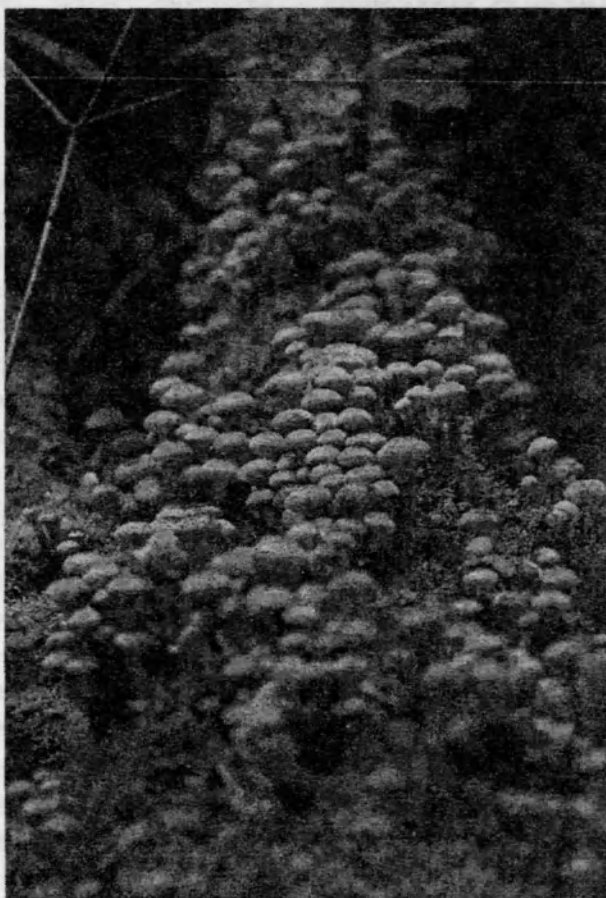


Рис. 3.1. Фотография объекта с малой глубиной резко изображаемого пространства

Нестабильность положения видеокамеры при использовании длиннофокусных объективов вызывает значительное смещение изображения на светочувствительной матрице. Это может привести к нерезкости изображения на кадре, а при определенном сочетании частот колебаний камеры и съемки – и к неустойчивости («тряске») изображения при воспроизведении. Поэтому необходимо осуществлять стабилизацию по-

средством штативов либо использовать стабилизационные возможности видеокамеры или специальной насадки на объектив.

Масштаб при съемке длиннофокусными объективами максимален, т.е. снимаемые предметы на светочувствительном носителе получают максимально крупными. Длиннофокусными объективами обычно снимают крупные планы [5].

У короткофокусных объективов фокусное расстояние меньше удвоенной диагонали кадра. Их также называют широкоугольными, так как угловой охват снимаемого пространства у них больше, чем у нормальных. Масштаб при съемке короткофокусными объективами минимален, и снимаемые предметы на светочувствительном носителе получают мелкими. С другой стороны, эти объективы увеличивают глубину пространства, поэтому небольшие предметы на заднем фоне воспринимаются зрителем крупнее, чем они были на самом деле. Короткофокусные объективы имеют большую глубину резко изображаемого пространства. При их использовании темп движения вглубь кадра и обратно воспринимается на экране увеличенным. Широкоугольные объективы позволяют осуществлять съемку с малых дистанций, поэтому могут использоваться в тесных помещениях [5].

Недостаток короткофокусных объективов – значительные геометрические искажения, проявляющиеся как искривление прямолинейных контуров в изображении (дисторсия), при панорамировании искривляются вертикальные линии по краям кадра [5].

Иногда дисторсия используется как художественный эффект. Широкоугольные объективы с намеренно неисправленной бочкообразной дисторсией называются «рыбий глаз». Оптическая схема объектива типа МС Зенитар-М типа «рыбий глаз» представлена на рис. 3.2, приведенном в [8].

В настоящее время для видеосъемки преимущественно используют объективы с переменным фокусным расстоянием. Отношение максимального фокусного расстояния к минимальному

(так называемый «оптический зум») может достигать 80 при применении конвертера – специальной оптической насадки, увеличивающей фокусное расстояние объектива. Конвертер, как правило, увеличивает фокусное расстояние в 1,4–2 раза и во столько же уменьшает относительное отверстие объектива. В некоторых моделях видеокамер регулируется скорость изменения фокусного расстояния.

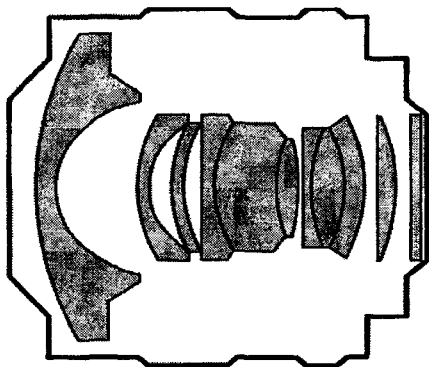


Рис. 3.2. Оптическая схема объектива типа «рыбий глаз»

Анализ соотношений диагонали матрицы и диапазона фокусных расстояний свидетельствует о том, что в основном объективы с переменным фокусным расстоянием в камере работают как длиннофокусные со всеми присущими этой группе достоинствами и недостатками.

Так как положение главных плоскостей объектива относительно оправы или поверхности крайних линз приводится только в практически недоступных операторам и другим пользователям оптических схемах объектива, то определить при необходимости положение фокуса возможно по заднему вершинному фокусному расстоянию. Указанный параметр вместе с рабочим отрезком и торцовым расстоянием определяют положение объектива относительно корпуса видеокамеры и соответственно относительно светочувствительной матрицы, а также воз-

можно при замене «штатного» объектива другим осуществлять автофокусировку.

Заднее вершинное фокусное расстояние (задний отрезок) – это расстояние от «вершины», т.е. точки пересечения главной оптической оси с внешней поверхностью задней линзы объектива, до заднего главного фокуса [6]. Обычно задний отрезок меньше главного фокусного расстояния. Объективы с одинаковым фокусным расстоянием могут иметь разные задние отрезки, что необходимо учитывать при комплектации видеокамеры набором объективов.

Рабочий отрезок (рабочее расстояние объектива) – это расстояние от опорной плоскости торцевой части оправы объектива до главной фокальной плоскости [6]. Показан на рис. 3.3 как $L_{\text{раб}}$. Главной фокальной плоскостью называется плоскость, перпендикулярная оптической оси, где у идеальной оптической системы располагаются главный и все остальные фокусы – точки пересечения преломленных объективом параллельных лучей.

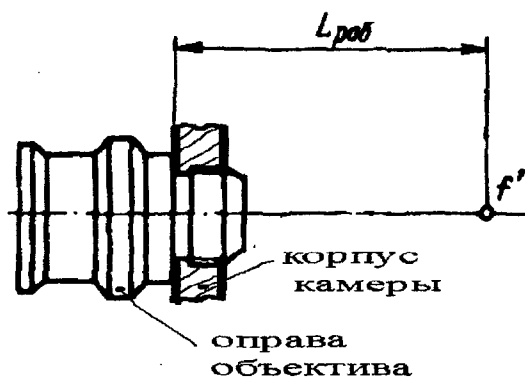


Рис. 3.3. Рабочий отрезок объектива

Рабочий отрезок объектива определяет положение плоскости светочувствительной матрицы. Для сменных объективов его численное значение приводится в паспорте. Важным параметром с точки зрения взаимозаменяемости является также

торцовое расстояние – минимальное расстояние от заднего торца оправы объектива до его заднего фокуса [6].

Углы поля зрения определяют угловой охват снимаемого пространства, изображаемого в пределах кадра и ограниченно-го внутри картинной плоскости на рис. 3.4, приведенном в [5]. Если углы поля зрения являются угловыми границами в пространстве предметов (левая относительно объектива область на рис. 3.4), то углы поля изображения определяют угловой охват в пространстве изображений (правая относительно объектива область на рис. 3.4). Если показатели преломления сред в пространствах предметов и изображений одинаковы, например, «воздух-воздух», то углы в обоих пространствах равны.

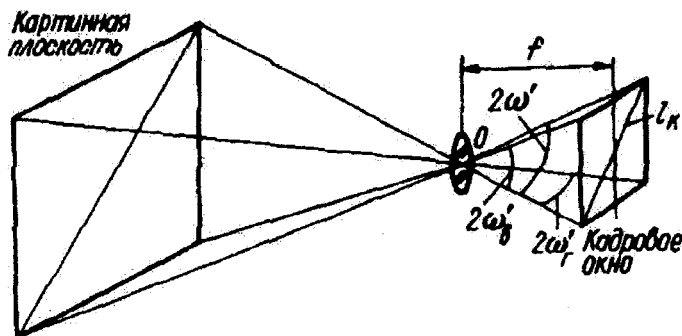


Рис. 3.4. Углы поля зрения и поля изображения

Соотношение фокусного расстояния объектива и диагонали матрицы не только влияют на возможный диапазон масштабов съемки, но и определяют углы поля зрения объектива.

Различают диагональный $2\omega'$, горизонтальный $2\omega_g$ и вертикальный $2\omega_v$ углы поля зрения и поля изображения (см. рис. 3.4).

У многих объективов диаметр поля изображения больше диагонали кадра и, следовательно, используемый угол поля изображения меньше предельно допустимого [7]. При фокусировке объектива на бесконечность значение угла поля изображения может быть определено по формуле

$$\operatorname{tg} \omega = l/2f,$$

где ω – половина угла поля изображения по диагонали, горизонтали или вертикали;

l – диагональ, ширина или высота кадра;

f – фокусное расстояние объектива.

Этой формулой можно пользоваться для расстояний, присущих обычной видеосъемке, т. к. дистанция съемки считается бесконечно большой по сравнению с фокусным расстоянием объектива. Исключением являются макросъемки, где дистанции соизмеримы с фокусным расстоянием. Для таких случаев в [9] предлагается формула (3.1), учитывающая дополнительное выдвижение объектива:

$$\operatorname{tg} \omega = l/2(f' + x'), \quad (3.1)$$

где x' – дополнительное выдвижение объектива для данной дистанции съемки.

В случае использования декораций в художественной съемке угол поля зрения для съемки определенного плана необходимо знать заранее, чтобы изготовить декорации необходимого размера.

4. Характеристики, связанные с яркостью и спектральным составом изображения

Освещенность светочувствительной матрицы в видеокамере при прочих равных условиях зависит в первую очередь от относительного отверстия объектива.

Геометрическое относительное отверстие – это отношение диаметра входного зрачка к заднему фокусному расстоянию [6]. Входной зрачок есть изображение 1 (рис. 4.1) апертурной диафрагмы 2, сформированное передней частью 3 оптической системы (то есть расположенной левее конструкции диафрагмы) в пространстве предметов при обратном ходе лучей. Апертурная

диафрагма 2 – отверстие, ограничивающее поперечное сечение как осевого, так и наклонных световых пучков, проходящих через объектив.

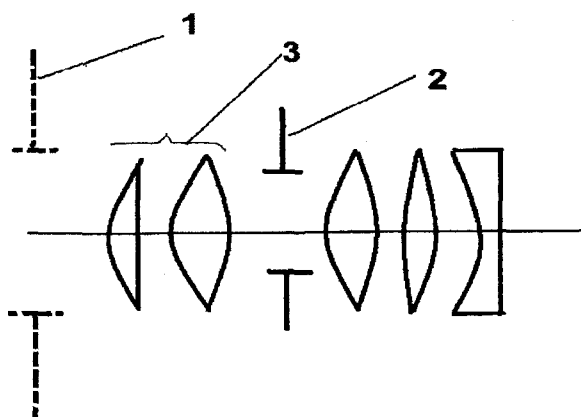


Рис. 4.1. К определению входного зрачка объектива

На рис. 4.2, приведенном в [3], показано, что пучок лучей, выходящих из какой-либо точки предмета (например, из точки O), ограничивается входным зрачком.

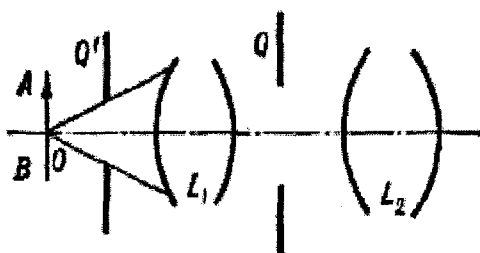


Рис. 4.2. Взаимное расположение элементов оптической системы и входного зрачка: AB – предмет; O – апертурная диафрагма; O' – входной зрачок; L_1 и L_2 – части оптической системы, расположенные соответственно перед апертурной диафрагмой и за ней

В видеокамерах максимальное значение геометрического относительного отверстия зависит от параметров оптической схемы объектива. Меньшие значения устанавливаются за счет

изменения размера апертурной диафрагмы, обычно конструктивно выполненной в виде совокупности лепестков. Такая лепестковая конструкция получила название ирисовой.

При изменении фокусного расстояния объектива в нем происходит взаимное перемещение оптических элементов, и изображение апертурной диафрагмы в пространстве предметов, являющееся входным зрачком, изменяется. Как правило, при увеличении фокусного расстояния входной зрачок уменьшается. Поэтому и уменьшается относительное отверстие объектива. В техническом паспорте объектива или видеокамеры в таких случаях указывают 2 значения геометрического относительного отверстия: большее соответствует минимальному фокусному расстоянию, меньшее – максимальному.

Необходимо отметить, что геометрическое относительное отверстие определяет не только освещенность кадра, но и качество формируемого изображения, влияет на глубину резко изображаемого пространства.

В сложных многолинзовых объективах значительны потери света в объективе за счет поглощения и отражения оптическими элементами. Для того, чтобы упростить определение необходимой экспозиции (количества световой энергии, обеспечивающей оптимальный перепад освещенностей на светочувствительной матрице), эти потери «переводят» в уменьшение относительного отверстия, то есть считают, что данный объектив не имеет потерь за счет поглощения и отражения, а обладает уменьшенным относительным отверстием по сравнению с истинным, геометрическим. Такое уменьшенное относительное отверстие называют эффективным.

Эффективное относительное отверстие показывает, какое относительное отверстие имел бы идеальный (без потерь света за счет поглощения и отражения) объектив, создающий в кадре изображения такую же освещенность, как и данный реальный объектив [5].

На оправе объектива вместе с фокусным расстоянием или диапазоном расстояний указывается максимальное геометри-

ческое относительное отверстие или диапазон значений этого отверстия. Если объектив дополнительно имеет шкалу относительных отверстий диафрагм, то на ней указаны эффективные значения. Градуировка этих значений обеспечивает изменение проходящего через объектив светового потока в два раза при изменении эффективного относительного отверстия на одно значение шкалы. Стандартная шкала имеет следующий ряд значений относительного отверстия: 1:0,7; 1:1; 1:1,4; 1:2; 1:2,8; 1:4; 1:5,6; 1:8; 1:11; 1:16; 1:22; 1:32 [9]. Знаменатель относительного отверстия называют диафрагменным числом. В современных видеокамерах информация о текущем значении относительного отверстия выводится на дисплей в цифровом виде через меню операций.

Часто имеют место попытки пользоваться вместо понятия «относительное отверстие» понятием «светосила». В литературе существуют различные трактовки этого понятия. Освещенность светочувствительной матрицы пропорциональна площади входного зрачка, то есть квадрату относительного отверстия. Этот квадрат относительного отверстия в [3] называется светосилой объектива, геометрической или эффективной. В то же время в [9] светосилу рассматривают как синоним относительного отверстия.

Потери света в объективе оцениваются коэффициентом светопропускания. Это отношение светового потока, прошедшего через объектив, к световому потоку на входе. Измеряется в относительных единицах или в процентах. Коэффициент светопропускания, эффективное и геометрическое отверстия связаны между собой следующей зависимостью: знаменатель эффективного относительного отверстия равен частному от деления знаменателя геометрического относительного отверстия на корень квадратный из коэффициента светопропускания. В табл. 4.1, приведенной в [5], указаны различные коэффициенты τ светопропускания объектива и соответствующие им коэффициенты k , показывающие, во сколько раз геометрическое относительное отверстие больше эффективного. Из значений,

приведенных в таблице, следует, что у высококачественных многолинзовых объективов, имеющих низкий коэффициент светопропускания, разница между геометрическим и эффективным отверстиями значительна.

Таблица 4.1

Связь между значениями коэффициента светопропускания объектива и разницей геометрического и эффективного отверстий

T	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5
k	1,054	1,120	1,200	1,290	1,410

Коэффициент светопропускания объектива является функцией длины волны падающего на объектив светового излучения. Поэтому для более точной оценки свойств объектива пользуются параметром «коэффициент спектрального пропускания», характеризующим пропускание объектива для конкретной длины волны излучения.

Зависимость коэффициента τ_λ спектрального пропускания от длины волны λ падающего на объектив светового излучения для некоторых киносъёмочных объективов представлена на приведенном в [5] рис. 4.2.

Непостоянство спектрального пропускания на разных длинах волн искажает цветопередачу на светочувствительной матрице видеокамеры и соответственно может повлиять на цветовоспроизведение во всей системе записи и воспроизведения изображения. В настоящее время этот недостаток можно компенсировать цифровой обработкой изображения.

Коррекцию спектральных характеристик объективов, повышающую коэффициент пропускания, осуществляют нанесением многослойных просветляющих покрытий. Оптическое просветление – это уменьшение коэффициента отражения света от

поверхностей преломляющих свет оптических деталей путем нанесения на них прозрачных пленок толщиной, соизмеримой с длиной волны оптического излучения и с промежуточным значением коэффициента преломления между применяемыми сортами стекла и воздуха [6]. Просветляющее действие этих пленок основано на явлении интерференции (сложении) световых волн, отраженных от поверхности стекла и наружной поверхности нанесенной на него пленки или нескольких пленок.

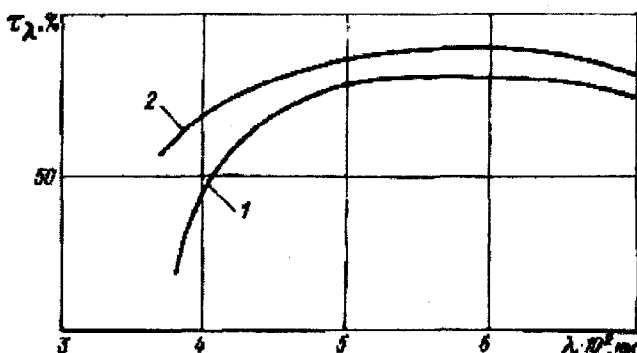


Рис. 4.2. Зависимость коэффициента τ_{λ} спектрального пропускания от длины волны λ падающего на объектив светового излучения для объективов ОКС 1-28-1 (кривая 1) и ОКС 5-250-1 (кривая 2)

Полное устранение отражения за счет интерференции возможно только для какой-либо одной длины волны. Для этой волны путь света в толще пленки (туда и обратно) должен составлять половину длины световой волны, т. е. толщина самой пленки должна быть равна $1/4$ длины волны. Отражение лучей других длин волн при этом ослабляется частично. Кроме того, нанесение просветляющих слоев дополнительно способствует повышению коэффициента пропускания света за счет уменьшения энергетического порога на границе сред [6]. Просветление зеркальных поверхностей увеличивает их коэффициент отражения.

В состав «белого» света входят лучи с разной длиной волны. Поэтому в качественных объективах предусмотрено многослойное просветление («мультипросветление»), рассчитанное на не-

сколько длин волн. На объективах российского производства оно стандартно обозначается как «МС» перед названием [6].

На рис. 4.3, приведенном в [5], графически представлены зависимости коэффициента спектрального пропускания R от длины волны λ светового излучения.

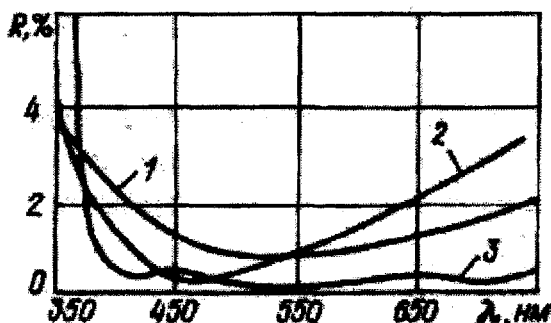


Рис. 4.3. Спектральные коэффициенты отражения просветляющих покрытий: 1 – однослойного; 2 – двухслойного; 3 – многослойного

Из графиков следует, что с увеличением количества просветляющих слоев коэффициент светопропускания «выравнивается», становится постоянным в широком диапазоне излучения. Следовательно, искажения цвета объективом уменьшаются.

Распределение освещенности по полю изображения оценивается коэффициентом спада освещенности, представляющим собой отношение освещенности на краю кадра к освещенности центра кадра. Спад освещенности от центра кадра к его краям подчиняется закону «косинуса в четвертой степени»:

$$E_{\omega'} = E_0 \cos^4 \omega',$$

где E_0 – освещенность центра кадра;

ω' – угол зрения объектива;

$E_{\omega'}$ – освещенность на краю кадра.

В табл. 4.2, приведенной в [10], указано относительное падение освещенности по полю кадра в зависимости от угла зрения объектива.

Относительное падение освещенности $E_{\omega'}/E_0$ по полю кадра в зависимости от угла ω' зрения объектива

ω' , град.	0	10	20	30	40	50	60	70
$E_{\omega'}/E_0$	1,0	0,94	0,78	0,56	0,34	0,17	0,06	0,014

Если угол ω' луча с осью пересекает границу кадра, то он равен половине ω угла поля изображения, показанного на рис. 3.4. Из таблицы видно, что происходит значительное падение освещенности на краях изображения, особенно сильное для широкоугольных объективов.

Дополнительный спад освещенности на краях кадра обусловлен явлением виньетирования. Виньетирование – это частичное затемнение наклонного по отношению к оптической оси пучка лучей при прохождении через оптическую систему вследствие ограничения различными диафрагмами оптической системы (оправами линз и др.) [6]. Этот эффект оценивается коэффициентом виньетирования. Для каждой точки изображения коэффициент виньетирования представляет собой отношение площади затененного для данной точки изображения участка входного зрачка оптической системы к полной площади входного зрачка [6].

Коэффициент виньетирования в объективе зависит не только от угла наклона падающего пучка, но и от диаметра диафрагмы. При уменьшении диаметра диафрагмы объектива сечение пучка лучей уменьшается и освещенность по полю кадра за счет виньетирования изменяется в меньшей степени. Максимальная степень виньетирования присуща широкоугольным объективам. Чтобы в определенной мере компенсировать этот недостаток, в качестве передней линзы вводят отрицательный мениск большого диаметра (рис. 4.4) [11], обращенный выпуклостью в сторону пространства предметов [5]. Введение отрицательного мениска было использовано при проектировании объективов серии «Руссар».

13 элементов в 10 группах
(3 асферические линзы / 5 асферических поверхностей)

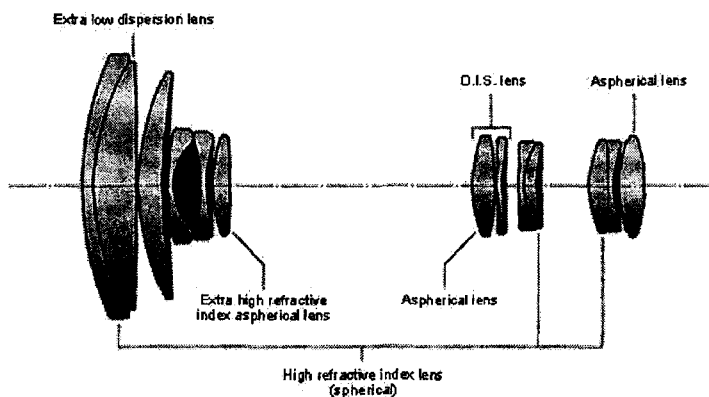


Рис. 4.4. Объектив с отрицательным мениском большого диаметра, обращенным выпуклостью в сторону пространства предметов, в качестве передней линзы

По данным [5] освещенность на краю кадра составляет для различных объективов 22–98 % от освещенности в центре кадра. На рис. 4.5, приведенном в [5], графически представлено относительное падение освещенности по полю кадра для объективов ОКС 1-28-1 (кривая 1) и ОКС 5-250-1 (кривая 2).

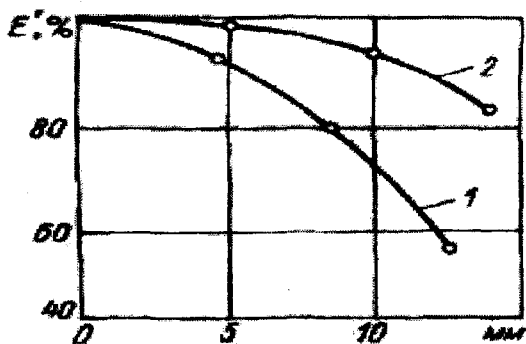


Рис. 4.5. Распределение освещенности по полю кадра для объективов ОКС 1-28-1 (кривая 1) и ОКС 5-250-1 (кривая 2)

Графики на рисунке свидетельствуют о существенном спаде освещенности на краю кадра. Если с этим эффектом при использовании пленочных носителей записи приходилось мириться, то использование матриц для записи изображения и последующая его компьютерная обработка в принципе позволяют осуществить компенсацию спада освещенности на краю кадра.

Светорассеяние в объективе влияет главным образом на потерю контраста в изображении, то есть на его резкость. Но оно также может уменьшить равномерность освещенности в кадре. Поэтому параметр «коэффициент светорассеяния» указан в разделе 2 как относящийся одновременно к двум группам (характеристики, определяющие распределение яркости в изображении и его спектральный состав, и характеристики, определяющие резкость изображения).

Коэффициент светорассеяния равен отношению светового потока, прошедшего через объектив от абсолютно черного объекта (например черного бархата), расположенного на равномерно освещенном белом фоне (белом экране, диффузно отражающем свет), к световому потоку от этого фона [3]. На практике его обычно определяют как отношение освещенности оптического изображения черного объекта к освещенности оптического изображения белого фона.

Причиной светорассеяния является отражение световых лучей от различных элементов конструкции объектива (линзы, диафрагмы, оправы). Другой причиной являются дефекты материала линз (пузырьки, свилю), ошибки конструирования (потертости лепестков ирисовой диафрагмы), низкий уровень технологии изготовления (плохое чернение внутренних поверхностей оправы объектива, фасок линз, лепестков ирисовой диафрагмы, сколы стекла на фасках), несоблюдение правил эксплуатации (царапины на поверхностях линз). Не следует забывать, что в объектив могут попасть лучи, отраженные от внутренних поверхностей корпуса видеокамеры. Поэтому при

съемке одного и того же объекта одним и тем же объективом, установленным в разные видеокамеры, можно получить разный коэффициент светорассеяния.

Практически значение коэффициента светорассеяния не превышает 2–3 % [3].

Кроме параметров объектива и видеокамеры на светорассеяние влияют яркие детали и бликующие поверхности, даже находящиеся вне угла зрения объектива. При съемке объективами с высоким светорассеянием ярких объектов на темном фоне в изображении могут появиться пятна отраженного света, что искажает картину распределения яркости в изображении снимаемого объекта.

Следует иметь в виду, что светорассеяние экранного изображения есть совокупность процессов светорассеяния при видеосъемке, проекции и печати изображения (при наличии последней).

5. Характеристики, связанные с резкостью

Резкостью называют различимость линейных границ деталей различной яркости в изображении по сравнению с теми же границами в объекте [12]. Необходимо иметь в виду, что, если пренебречь наличием астигматической кривизны поля изображения (она будет рассмотрена при анализе аберраций), объектив способен максимально резко воспроизвести только плоский объект, плоскость которого перпендикулярна оптической оси. Оценка характеристик объектива, определяющих резкость, как раз и производят для этой плоскости. Все используемые для оценки резкости характеристики (разрешающая способность, амплитудно-частотная характеристика, функции рассеяния линии, точки, края и другие) зависят от расстояния до плоскости, на которую фокусируется объектив. Чтобы избежать в практике чрезмерного количества информации, в характеристиках указывается одно значение или диапазон. Кроме

того, из-за наличия aberrаций значения вышеуказанных характеристик зависят от координат в плоскости изображения.

Все остальные элементы неплоского снимаемого объекта, лежащие вне плоскости фокусировки объектива, изображаются на светочувствительной матрице «размытыми». На рис. 5.1, приведенном в [3], показано построение объективом изображения точек, лежащих вне и на плоскости фокусировки. Из рисунка видно, что изображение A' точки A на фокусируемой плоскости представляет собой точку (абберации в данном примере пока не учитываются), а изображения B' и C' точек B и C превращаются в «размытые» кружки.

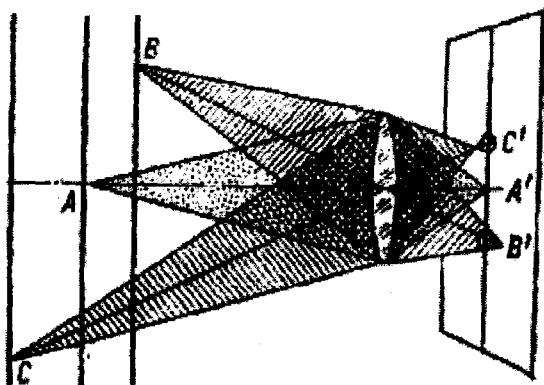


Рис. 5.1. Схема построения изображений точек, A, B, C , лежащих вне и на плоскости фокусировки

Если диаметр «размытых» кружков большой, то зритель будет воспринимать изображения соответствующих точек на экране как нерезкие. Уменьшая этот диаметр, можно достигнуть некоторого порогового значения, когда из-за неидеальности зрения эти кружки будут восприниматься как точки. Эти два пороговых значения допустимых кружков рассеяния B' и C' , образованных точками B и C , лежащими перед и за плоскостью фокусировки, определяют глубину резко изображаемого пространства.

Глубиной резко изображаемого пространства называется расстояние, измеренное вдоль оптической оси объектива между двумя плоскостями в пространстве предметов, в пределах которого предметы изображаются на светочувствительном носителе (матрица, фотоматериал) с достаточной степенью резкости (диаметр кружка нерезкости не превышает допустимого значения) [3]. Существует приведенная в [3] приближенная формула расчета глубины L резко изображаемого пространства:

$$L = 2 p_{\text{нав}}^2 K d_{\text{доп}} / f^2,$$

где $p_{\text{нав}}$ – расстояние от переднего фокуса объектива до плоскости, на которую сфокусирован объектив (до плоскости наводки);

f – фокусное расстояние объектива;

$d_{\text{доп}}$ – допустимый диаметр кружка нерезкости;

K – диафрагменное число (знаменатель геометрического относительного отверстия).

Если для киносъемочных камер, использующих 35-мм киноплёнку с обычным форматом кадра, и условий кинопоказа 35-мм фильмов (первый ряд кинозала находится от экрана на расстоянии, равном 1,5 его ширины) оказалось возможным с использованием известного масштаба проекции рассчитать допустимое значение кружка рассеяния на киноплёнке (0,03 мм [10]), то в цифровых камерах это значение определить сложнее. Проблема обусловлена большим разнообразием размеров светочувствительных матриц в камерах, а также предварительной неопределенностью в размерах экрана для демонстрации снятого материала и в расстояниях между зрителем и экраном. Можно выбрать самые «жесткие» условия: минимальный встречающийся размер матрицы, максимально возможный размер демонстрационного экрана и минимально возможное расстояние от зрителей до экрана. Но в этом случае можно получить заниженное значение допустимого кружка рассеяния и соответственно меньшую глубину резко изображаемого пространства.

На рис. 5.2 представлена зона резко изображаемого пространства при различных дистанциях наводки для объектива с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1:2, предназначенного для киносъемки на 35-мм киноплёнку. Для объективов, «работающих» со светочувствительными матрицами, из-за других размеров кадра диаметр допустимого кружка рассеяния другой и соответственно другая глубина резкости. Это относится и к приведенным ниже рис. 5.3 и 5.4. Из рис. 5.2 видно, что с увеличением дистанции наводки глубина резко изображаемого пространства значительно растёт.

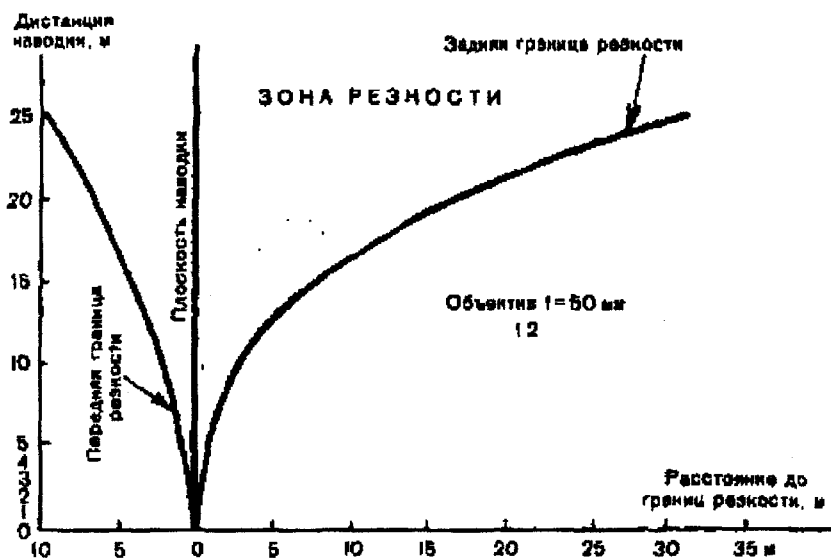


Рис. 5.2. Зона резко изображаемого пространства при различных дистанциях наводки для объектива с фокусным расстоянием 50 мм и относительным отверстием 1:2, предназначенного для киносъемки на 35-мм киноплёнку [10]

На рис. 5.3 представлена зона резко изображаемого пространства для различных фокусных расстояний объектива. Здесь видна противоположная тенденция: с ростом фокусного расстояния глубина резко изображаемого пространства уменьшается.

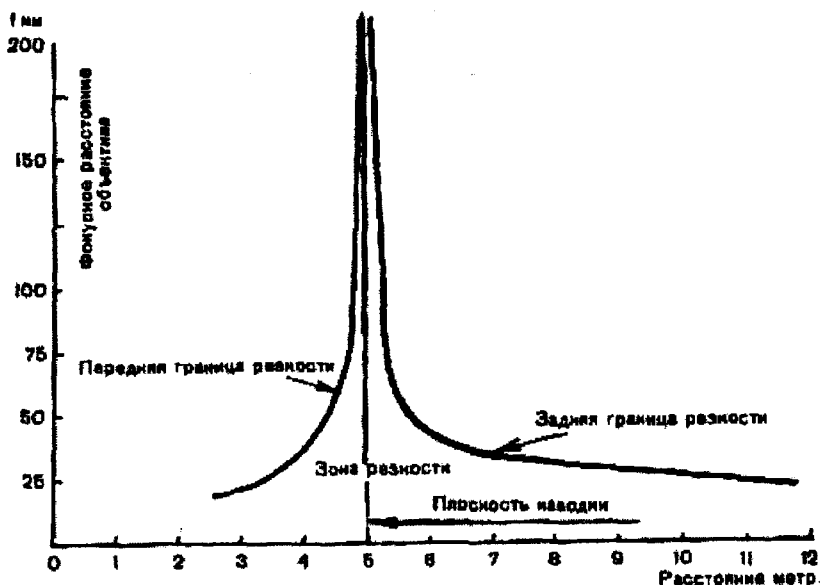


Рис. 5.3. Зона резко изображаемого пространства для различных фокусных расстояний объектива, предназначенного для киносъемки на 35-мм киноплёнку, при постоянных значениях дистанции наводки (5 м) и относительного отверстия объектива (1:2) [10]

Использование двух вышеуказанных зависимостей при съемке объективом с переменным фокусным расстоянием может обеспечить интересные эффекты. Например, если одновременно увеличивать дистанцию наводки и фокусное расстояние, то возможно сохранить глубину резко изображаемого пространства, а при росте дистанции и уменьшении фокусного расстояния получить стремительное уменьшение глубины резкости. Однако оператору сложно одновременно осуществлять указанные операции, поэтому выполнять их целесообразно было бы через запрограммированную соответствующим образом систему управления.

На рис. 5.4 представлена приведенная в [10] зона резко изображаемого пространства при различных значениях относительного отверстия объектива. Уменьшение относительного отверстия увеличивает глубину резко изображаемого пространства.

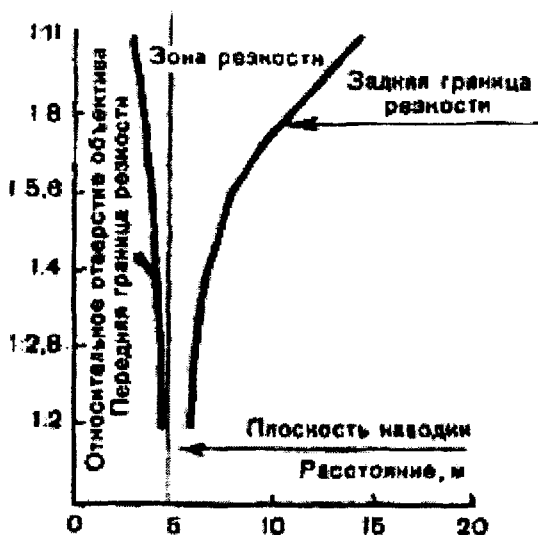


Рис. 5.4. Зона резко изображаемого пространства при различных значениях относительного отверстия объектива, предназначенного для киносъемки на 35-мм киноплёнку, (фокусное расстояние объектива 50 мм, дистанция наводки 5 м) [10]

Необходимо иметь в виду, что резко изображаемое пространство далеко не всегда ограничивается плоскостями. Если оптическая система обладает сильными aberrациями, например, при использовании анаморфотных насадок (они сужают изображение при съёмке широкоэкранных фильмов методом анаморфирования), то резкое пространство может ограничиваться не плоскостями, а криволинейными поверхностями, что затрудняет работу оператора.

Зрительный анализатор человека содержит оптическую систему, для него также существует глубина резко изображаемого пространства. Поэтому наличие размытия в соответствующих пределах на переднем и заднем планах снятого кадра при акцентировании внимания зрителя на элементы кадра, находящиеся в плоскости резкой наводки, создают эффект естественности восприятия. К сожалению, из-за использования плоских записывающих элементов (матрица, киноплёнка) и

соответственно плоских демонстрационных экранов зритель не может при изменении фокусировки глаз получить элементы заднего и переднего плана резкими, т.е. переводить взгляд на разню удаленные по глубине кадра предметы. Это станет возможным при создании систем записи и воспроизведения трехмерного изображения, увеличив естественность восприятия.

Допущение о формировании объективом точечного изображения точки, лежащей в плоскости фокусировки, не является точным вследствие действия законов физики. Причин этому две. Во-первых, для очень малых световых отверстий (относительные отверстия 1:5,6 и менее для киносъемочных объективов [13]) происходит дифракция света на диафрагме, и точка изображается как дифракционный кружок рассеяния. Во-вторых, при больших относительных отверстиях, когда световые лучи проходят не бесконечно близко вдоль оптической оси и не под бесконечно малыми углами к ней, в соответствии с законами физики точка изображается в виде размытого пятна, имеющего различные формы и окраску в зависимости от координат на кадре и других условий (проявление аберраций).

Аберрациями в оптике называются погрешности (искажения) изображения, формируемого реальной оптической системой [3]. Они вызваны несовершенством преломляющих и отражающих поверхностей реальных оптических систем, их неидеальностью [6].

Граница между дифракционными и аберрационными свойствами объектива регламентируется критерием Рэлея. В соответствии с ним, если волновая аберрация (отклонение от сферичности прошедшей через объектив световой волны) не превосходит четверти длины этой волны, то оптическая система называется дифракционно ограниченной [14]. Если это отклонение от сферичности превосходит четверть длины светового излучения, то свойства объектива определяются не дифракцией, а аберрациями. Из критерия Рэлея следует, что граница, разделяющая дифракционные и аберрационные свойства объектива,

зависит от длины волны светового излучения. Так как на практике в объектив поступает полихроматическое излучение (белый свет), то имеет смысл говорить не о граничном значении, а о граничном диапазоне относительных отверстий, разделяющих дифракционные и абберационные свойства объектива.

В [5] предлагается следующая классификация аббераций:

- осевые, т.е. относящиеся к изображениям точек, лежащих на оптической оси объектива;
- полевые, касающиеся точек, лежащих вне оптической оси объектива;
- монохроматические, т.е. не зависящие от длины световой волны;
- хроматические, зависящие от длины волны.

В соответствии с [6] существует пять монохроматических аббераций низшего (третьего) порядка: сферическая абберация, кома, астигматизм, кривизна изображения и дисторсия. В реальных системах обычно наблюдаются комбинации всех аббераций, дополнительно на общую картину налагаются и абберации высших порядков. Хроматические абберации обусловлены дисторсией (зависимостью показателя преломления среды от длины проходящей волны) и проявляются двояко: как хроматическая абберация положения и хроматическая абберация увеличения. Известны также другие типы аббераций.

Сферическая абберация проявляется как изображение точки, лежащей на оптической оси, не одной точкой, а отрезком O_1O_5 бесконечной совокупности точек на некотором участке оси (рис.5.5). Она обусловлена несовпадением фокусов для лучей света, проходящих через осесимметричную оптическую систему на разных расстояниях h_1-h_5 от оптической оси (рис. 5.5). Приводит к нарушению гомоцентричности (одноцентричности) пучка на выходе системы. Фокус бесконечно узкого пучка лучей радиусом h_1 , проходящего вдоль оптической оси, лежит в плоскости O_1O , называемой гауссовой. Расстояние между гауссовой плоскостью и фокусом пучков, прошедших через

крайнюю кольцевую зону, называют продольной сферической aberrацией, а радиус кружка рассеяния пучков лучей в гауссовой плоскости – поперечной [3].

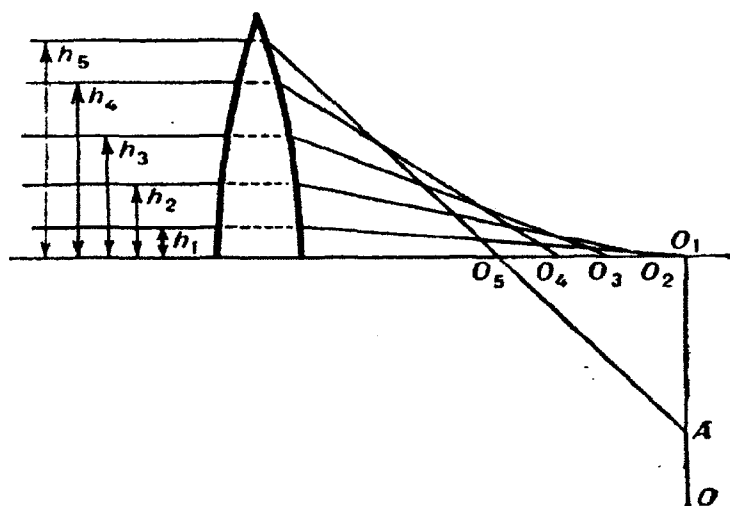


Рис. 5.5. Ход параллельных лучей через оптическую систему, обладающую сферической aberrацией [3]

Так как светочувствительная матрица или киноплёнка перпендикулярны оптической оси, для практического использования в обычной двумерной видеосъёмке важнее значения поперечной aberrации, представляющей проекцию объёмного изображения осевой точки на матрицу или плёнку. Эти значения зависят от максимального диаметра кольцевой зоны, то есть от относительного отверстия объектива и растут с увеличением последнего. Сферическая aberrация является осевой, так как имеет место только для точек, лежащих на оптической оси.

Графики зависимости сферической aberrации $\Delta S'$ (по горизонтальной оси) в функции тангенса апертурного угла $\text{tg } \sigma'$ приведены на рис. 5.6. Апертурным углом или угловой апертурой называют угол между крайними лучами светового конуса, попадающего в оптический прибор [6]. Этот угол обра-

зован световым конусом, показанным на рис. 5.2 и расположенным слева от оптической системы. Апертурный угол зависит от диаметра входного зрачка и, следовательно, определяется отверстием диафрагмы.

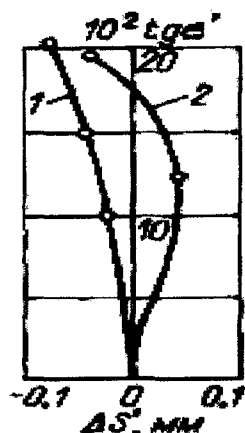


Рис. 5.6. Графики зависимости сферической аберрации $\Delta S'$ (по горизонтальной оси) в функции тангенса апертурного угла $\text{tg} \sigma'$, умноженного на 100, (по вертикальной оси) для объективов ОКС 5-18-1 (кривая 1) и ОКС 5-250-1 (кривая 2) [5]

Сферическая аберрация является осевой, так как имеет место только для точек, лежащих на оптической оси.

Кома – это аберрация, проявляющаяся в изображении внеосевой точки в виде запятой [6]. Она возникает в результате неодинаковости углов падения наклонных параллельных лучей на поверхности. При этом нарушена симметричность хода наклонных лучей оптической системы. Кома является полевой аберрацией. Но если объектив плохо отцентрирован, то есть центры кривизны линз не лежат на одной прямой, она имеет место и для точки на оптической оси.

Астигматизм – аберрация, проявляющаяся в том, что точки, расположенные не на главной оси оптической системы, изображаются двумя взаимно перпендикулярными отрезками, рас-

положенными на некотором расстоянии друг от друга (рис. 5.7). Ось KK' пучка лучей, распространяющихся из точки S в пространстве предметов, проходит наклонно к оптической оси OO' оптической системы L . Сферическая волновая поверхность $Q_1Q_2Q_3Q_4$ на входе оптической системы превращается на ее выходе в деформированную, отличную от сферической волновую поверхность $Q_1'Q_2'Q_3'Q_4'$.

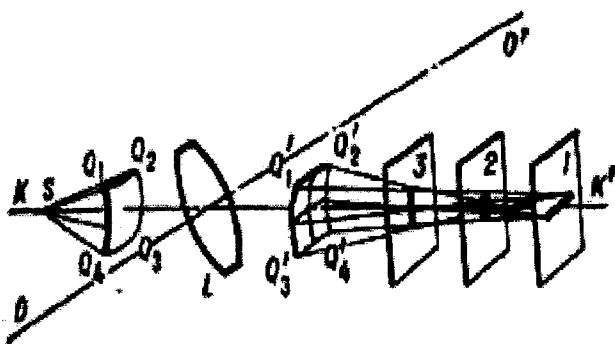


Рис. 5.7. Ход пучка лучей из точки S через оптическую систему, обладающую астигматизмом [3]

В сечениях пучка плоскостями 1, и 3 изображение точки имеет соответственно вид горизонтального и вертикального отрезков, а в плоскости 2, расположенной посередине между плоскостями 1 и 3, — нерезких эллипса или окружности.

Вследствие астигматизма изображение получается нечетким. Он устраняется подбором кривизны и показателей преломления линз, при котором астигматизм одной линзы компенсируется астигматизмом другой. Объективы с исправленным астигматизмом называют анастигматами.

Астигматизм объектива обычно характеризуют графически в виде зависимости расстояний между плоскостями меридионального X'_m (по вертикали) и сагиттального X'_s (по горизонтали) астигматических фокусов элементарных пучков и идеальной фокальной плоскостью от угла наклона лучей.

На рис. 5.8, а представлена приведенная в [5] характеристика астигматизма объектива ОКС 7-28-1 в виде астигматических кривых, т.е. зависимостей X'_m (штриховая линия) и X'_s (сплошная линия) от угла поля зрения σ' . Если принять, что создаваемое объективом изображение наилучшего качества лежит на поверхности, равноудаленной от меридионального и сагиттального изображений отрезков, то по графикам астигматических кривых X'_m и X'_s возможно найти положение этой поверхности наилучшего изображения. Она показана штрихпунктирной линией на рис. 5.8, а. Очевидно, что в данном случае поверхность наилучшего изображения не плоская, а имеет определенную кривизну.

Указанная кривизна поля изображения является одним из возможных проявлений аберрации. Так как изображение при видеосъемке проецируется на плоскую матрицу, то наличие кривизны поля изображения может привести к нерезкости изображения по полю кадра даже при равенстве значений X'_m и X'_s .

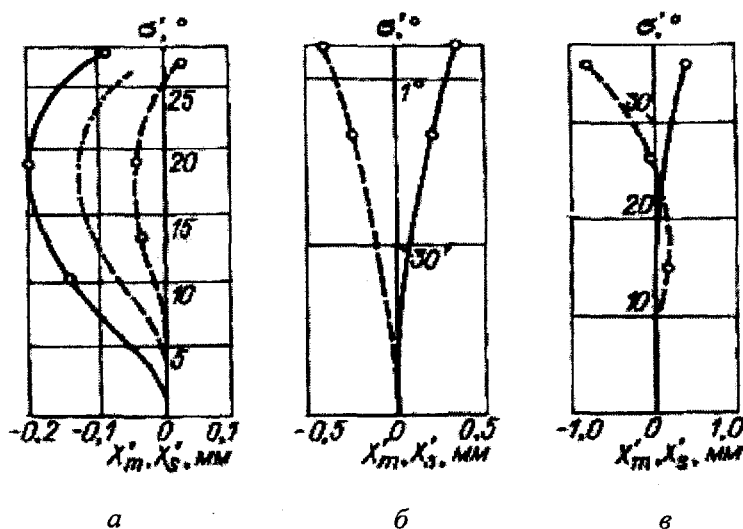


Рис. 5.8. Астигматические кривые для объективов ОКС 7-28-1 (а), ОКС5-50-1 (б), и объектива 70 ОПФ5-1 для предельного значения фокусного расстояния (в) [5]

Из рис. 5.8, б видно, что у объектива ОКС5-50-1 исправлена кривизной поля изображения, но значителен меридиональный и сагиттальный астигматизм. У объективов-анастигматов (рис. 5.8, в) астигматизм исправлен для некоторого угла поля и значительно уменьшены астигматизм и кривизна поля изображения для всего поля. Поэтому у таких объективов высокая резкость изображения по всему полю кадра.

Показатель преломления оптической среды зависит от длины проходящей световой волны. Это явление вызывает в объективах хроматические aberrации, проявляемые двояким образом.

Во-первых, не совпадают положения фокальных плоскостей для лучей различных длин волн, то есть фокусное расстояние объектива становится функцией длины волны. В результате на резкое изображение в фокальной плоскости для одного цвета будут наложены нерезкие изображения других цветов, фокальные плоскости для которых не совпадают с данной. Поэтому изображение точки в плоскости светочувствительной матрицы будет иметь вид размытого и «перламутрового» кружка.

Хроматическая aberrация, обусловленная таким несовпадением положения фокальных плоскостей для лучей различных длин волн, называется продольной хроматической aberrацией (хроматической aberrацией положения). Мерой данного вида aberrации является протяженность участка оптической оси, в пределах которого находятся все фокусы монохроматических пучков поступающего в объектив светового диапазона.

Во-вторых, зависимость фокусного расстояния объектива от длины световой волны является причиной несовпадения коэффициентов увеличения для разных длин волн. Хроматическая aberrация, обусловленная несовпадением коэффициентов увеличения для разных длин волн, называется хроматической aberrацией увеличения. Она количественно оценивается разностью линейных размеров изображения, полученного в разных длинах световых волн или в разности соответствующих

поперечных увеличений. Этот вид aberrации может проявляться в виде цветной окантовки изображений.

Хроматические aberrации объективов корректируются применением линз с фокусными расстояниями противоположных знаков, изготовленных из стекол с различной дисперсией [9]. При этом в общем фокусе совмещаются лучи двух различных длин волн. Корректированные таким образом объективы называют ахроматами.

Если у объектива уменьшен оставшийся после такой коррекции вторичный спектр, называемый вторичной хроматической aberrацией, объектив называют апохроматом. Промежуточный по коррекции между этими двумя группами вариант объектива будет называться полуапохроматом.

Для оценки резкости изображения, обусловленной как дифракцией, так и aberrациями объектива, используют множество критериев. Их можно разделить на две группы: критерии на основе функций рассеяния и критерии на основе функции передачи модуляции (ФПМ) или амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

Известны три функции рассеяния: края, линии и точки.

Функцией рассеяния края (ФРК) называется распределение освещенности в изображении края светящейся полуплоскости. Рис. 5.9, приведенный в [3], может служить иллюстрацией получения функции рассеяния линии для объектива. Если в качестве объекта использовать светящуюся полуплоскость, образованную засветкой экрана Э, частично заслоняющего световой пучок, проходящий через прозрачный фильтр Ф (рис. 5.9, а), распределение освещенности в изображении границы экрана объективом за счет дифракции или aberrаций будет изменяться от темного к светлому не скачком, а в виде плавной кривой $D(x)$ (рис. 5.9, б), где D – относительная освещенность, x – пространственная координата. Чтобы облегчить сравнение ФРК для разных объективов, эту характеристику нормируют, то есть считают, что относительная освещенность изменяется в пределах от 0 до 1.

ФРК – критерий, наиболее связанный с приведенным выше определением резкости, так как по наклону или «ширине склона» ФРК легко судить о степени размытости границ в изображении. Но из-за ряда недостатков он не нашел широкого применения для оценки объективов и оценки качества изображения, сформированного всей системой записи и воспроизведения в целом.

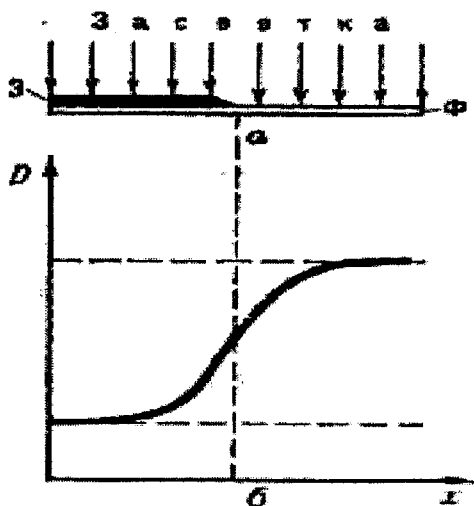


Рис. 5.9. Получение светящейся полуплоскости (а), и график функции рассеяния края $D(x)$ для объектива (б)

Во-первых, для удобства оценки свойств объектива желательно иметь не кривую, а одно число. Известны, например, попытки использовать вместо ФРК длину проекции ее графика на горизонтальную ось, максимальный или средний градиент (тангенс угла наклона кривой). Но однозначную связь между субъективной оценкой резкости сформированных объективом изображений и значениями этих показателей обнаружить не удалось. Во-вторых, нахождение ФРК для всей системы записи и воспроизведения изображения по ФРК составляющих систему звеньев (съёмочный, проекционный объективы,

светочувствительные материалы и т.д.) возможно, но требует громоздких математических вычислений.

Функцией рассеяния точки (ФРТ) называется распределение освещенности в изображении светящейся точки. Так как в некоторых случаях оптические системы обеспечивают неодинаковую резкость в различных направлениях (вертикаль, горизонталь, наклонная ориентация), указанная характеристика позволяет в этом случае получить исчерпывающую информацию. На рис. 5.10 представлен график ФРТ, обладающей круговой симметрией. Это означает, что имеющий такую ФРТ объектив, формирует изображения, одинаково резкие во всех направлениях.

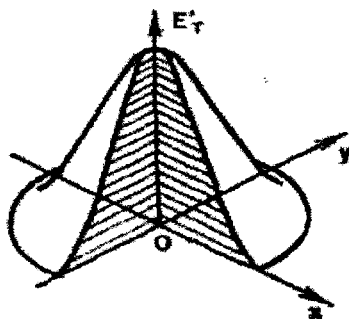


Рис. 5.10. График ФРТ объектива [13]

Этот параметр для оценки качества объектива по резкости не получил широкого распространения по тем же причинам, что ФРК.

Для оптических систем, обладающих одинаковыми свойствами во всех направлениях (изотропных), вместо ФРТ используют функцию рассеяния линии (ФРЛ). ФРЛ – это распределение освещенности в изображении светящейся линии (рис. 5.11).

В отличие от ФРТ, ФРЛ является одномерной функцией, поэтому пользоваться ей удобнее, чем ФРТ, но по тем же причинам, что и ФРК этот критерий не очень удобен для практического использования.

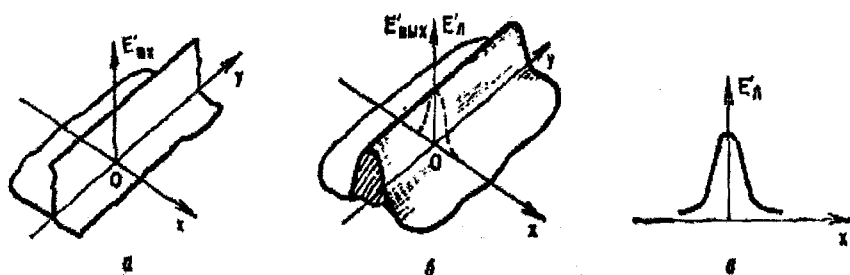


Рис. 5.11. Графики функции, описывающей изображение светящейся линии (а), и функции рассеяния линии (б, в) [13]

Следует отметить, что все вышеперечисленные функции (ФРК, ФРТ и ФРЛ) связаны между собой: зная двумерную ФРТ, можно найти ФРК и ФРЛ в любом направлении (вертикальном, горизонтальном, наклонном).

Более распространенной характеристикой для оценки качества объектива по критерию «резкость» является функция передачи модуляции (ФПМ, английская аббревиатура – MTF), которую еще называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), контрастно-частотной характеристикой (КЧХ) или пространственно частотной характеристикой (ПЧХ). ФПМ объектива – это зависимость коэффициента передачи («ослабления») контраста в изображении миры от частоты решетки этой миры.

Мирой называется изображение черно-белых полос различной толщины, соответственно, период между полосами различен. Частота миры обратно пропорциональна периоду и тоже различна. Период измеряется в миллиметрах, а частота миры – в обратных миллиметрах. На рис. 5.12 показано изображение миры с синусоидальным распределением яркости по ширине полос, а на рис. 5.13 – с прямоугольным распределением яркости.

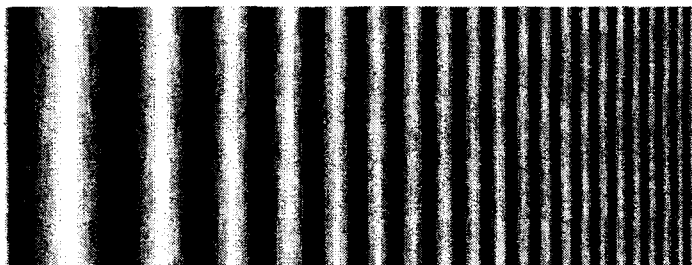


Рис. 5.12. Изображение миры с синусоидальным распределением яркости по ширине полос [15]

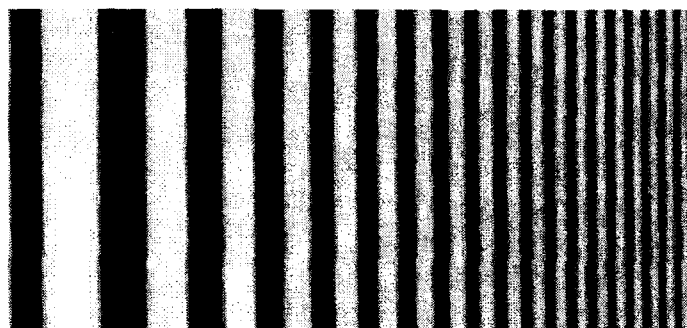


Рис. 5.13. Изображение миры с прямоугольным распределением яркости по ширине полос [19]

Использование синусоидальной миры позволяет легко перейти от оценки свойств объектива к оценке качества всего изображения в целом, так как при использовании такой миры ФПМ системы записи и воспроизведения изображения (съёмочный объектив, матрица, дисплей либо киноплёнки и проекционный объектив) есть произведение ФПМ всех звеньев составляющих систему. Прямоугольная мира традиционно используется главным образом для определения разрешающей способности.

Разрешающей способностью объектива называется такая граничная частота в изображении черно-белых полос миры, когда они начинают восприниматься как серый фон («сливаться»). В характеристиках объектива указывается разрешающая спо-

способность, определенная по прямоугольной мире. Очевидно, что для того же самого объектива разрешающая способность, определенная по синусоидальной мире, ниже чем по прямоугольной. Характеристика объектива «разрешающая способность» нашла широкое применение в силу своей простоты, но она не дает информации о том, как объектив подавляет контраст для более крупных объектов (на низких частотах), что позволяет сделать ФПМ.

Объектив уменьшает контраст в изображении полос мира, то есть белые полосы воспроизводятся в изображении потемневшими, а черные – посветлевшими. На рис. 5.14 приведены графики распределения освещенности $E_{вх}$ в синусоидальной мире определенной частоты и в ее изображении $E_{вых}$ объективом в функции пространственной координаты x , направленной перпендикулярно полосам мира.

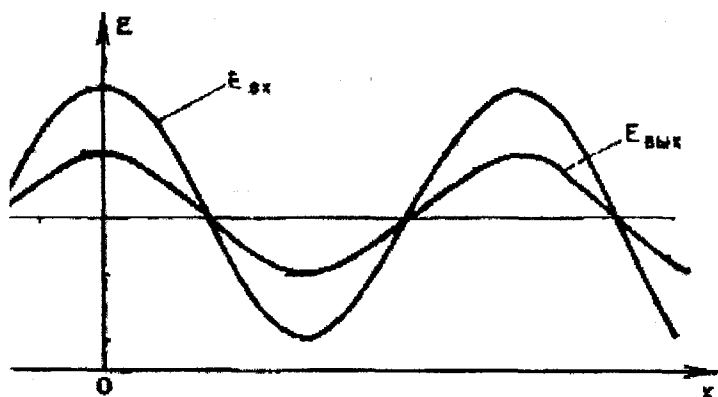


Рис. 5.14. Графики распределения освещенности $E_{вх}$ в синусоидальной мире определенной частоты и в ее изображении $E_{вых}$ объективом в функции пространственной координаты x [13]

На рис. 5.15 представлены такие же графики для мира с прямоугольным распределением контраста («тельняшки»), период которой равен T .

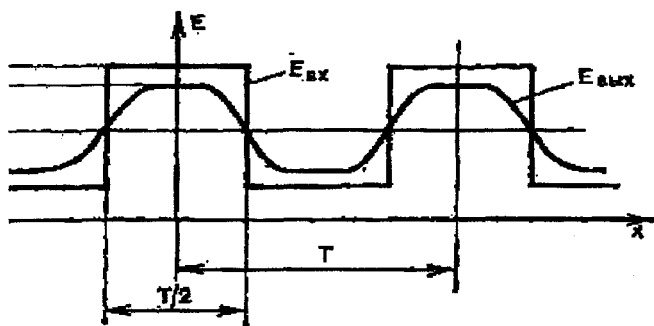


Рис. 5.15. Графики распределения освещенности $E_{вх}$ в прямоугольной мире с периодом T и в ее изображении $E_{вых}$ объективом в функции пространственной координаты x [13].

Чем выше частота полос мира, тем сильнее объектив подавляет контраст в изображении полос, то есть белые полосы все более темнеют, а черные светлеют. На рис. 5.16 показан график распределения освещенности в изображении синусоидальной мира, содержащей полный набор частот – от низких (слева), до высоких (справа), в функции пространственной частоты.

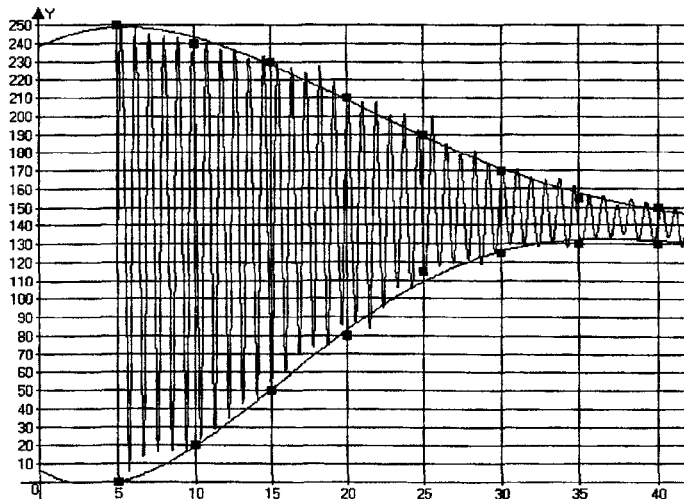


Рис. 5.16. График распределения освещенности в изображении синусоидальной мира, содержащей полный набор частот – от низких (слева), до высоких (справа), в функции пространственной частоты [15]

Для нахождения ФПМ объектива по распределению освещенности в сформированном им изображении мира определяют коэффициент передачи контраста на каждой частоте.

Контрастом K называется отношение амплитуды a (отклонения от среднего значения) освещенности в изображении мира к среднему значению a_0 освещенности E (рис. 5.17).

$$K = a / a_0.$$

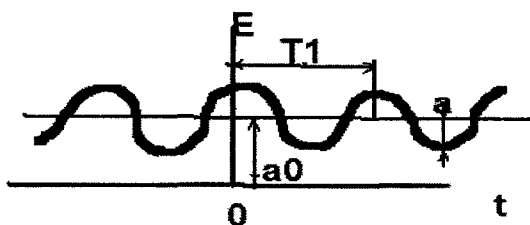


Рис. 5.17. К определению понятия «контраст»

Коэффициентом передачи контраста КПК называют отношение контраста $K_{\text{вых}}$ в воспроизведенном объективом изображении мира к контрасту мира $K_{\text{вх}}$:

$$\text{КПК} = K_{\text{вых}} / K_{\text{вх}}.$$

Чем выше частота мира, тем меньше КПК, так как амплитуда a яркости в изображении мира падает с ростом частоты (см. рис. 5.16).

Так как ФПМ объектива равна КПК, то с ростом частоты мира она падает. На рис. 5.17 представлены ФПМ объектива для мира с прямоугольным распределением контраста в полосах ($K_{\text{пр}}(f)$) и синусоидальным ($K(f)$). Из рисунка видно, что, во-первых, ФПМ объективов уменьшается с ростом частоты. Во-вторых, для одного и того же объектива значения ФПМ, определенные по синусоидальной мире ниже, чем значения ФПМ, определенные по прямоугольной мире на той же частоте.

Необходимо иметь в виду, что ФПМ объектива в общем случае зависит от направления ориентации полос миры. ФПМ однозначно связана с группой функций рассеяния (ФРТ, ФРЛ, ФРК), то есть, зная ФПМ, можно найти эти функции и наоборот. Определить ФПМ объектива можно экспериментально, либо пересчетом экспериментально найденных функций рассеяния, либо компьютерным расчетом, где исходными данными являются конструктивные параметры составляющих объектив линз (например программа ОПАЛ, созданная в ЛИТМО).

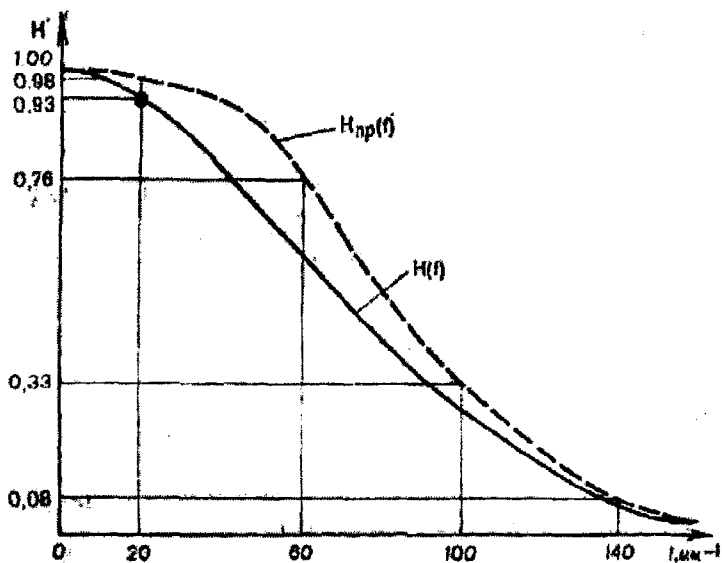


Рис. 5.17. ФПМ объектива для миры с прямоугольным распределением контраста в полосах ($K_{пр}(f)$) и синусоидальным ($K(f)$) [13]

По графику ФПМ можно определить разрешающую способность объектива. Разрешающая способность N равна абсциссе (горизонтальной координате) точки на графике ФПМ, ордината (вертикальная координата) которой равна предельно различимому человеком контрасту $K_{пред}$ (в среднем 0,025). На рис. 5.18 показаны графики ФПМ двух объективов, имеющих одинаковую разрешающую способность N .

Из рис. 5.18 следует, что два объектива, имеющих одинаковую разрешающую способность N , воспроизводят по-разному полосы миры более низких, чем разрешающая способность, пространственных частот, то есть по-разному воспроизводят детали крупных размеров. Очевидно, что объектив, имеющий более вогнутую («провальную») ФПМ, будет воспроизводить крупные детали менее контрастно, чем объектив с выпуклой ФПМ. Следовательно, первый объектив является более «мягко рисующим», чем второй.

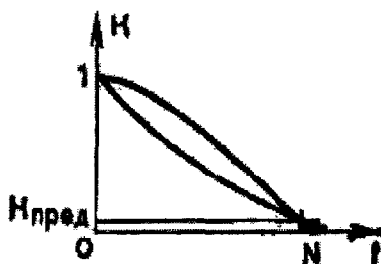


Рис. 5.18. Графики ФПМ двух объективов, имеющих одинаковую разрешающую способность N [13]

Необходимо отметить, что ФПМ объектива является функцией дистанции резкой наводки, относительного отверстия, в объективах с переменным фокусным расстоянием она зависит от значения фокусного расстояния. В цифровой фото-видеотехнике существует процессорная «коррекция» ФПМ, то есть программными способами изменяют контраст уже переведенного в цифровую форму изображения, имитируя таким образом изменение ФПМ объектива. На рис. 5.19 показаны приведенные в [15] ФПМ разных объективов с различными параметрами настройки, жирной пунктирной линией показана сымитированная ФПМ объектива, где в настройках RAW-конвертера была установлена более высокая степень резкости и дополнительно в программе «Photoshop» использована функция UnsharpMask (интенсивность 100 %, радиус 1,0).

Из анализа приведенных на рис. 5.19 графиков очевидно, что с помощью программного обеспечения в определенных пределах можно корректировать полученную при цифровой видеосъемке резкость изображения.

При расфокусировке объектива, когда плоский снимаемый объект удаляется от плоскости резкой наводки, ФПМ объектива для этого объекта становится все более пологой и вогнутой, поэтому падает резкость изображения объекта. Так как снимаемые объекты не являются плоскими, детали, лежащие вне плоскости резкой наводки, будут сформированы более пологой и вогнутой ФПМ и, соответственно, будут являться менее резкими, чем лежащие в плоскости резкой наводки. Таким образом, ФПМ объектива при заданной дистанции резкой наводки является функцией глубины расположения снимаемой детали.

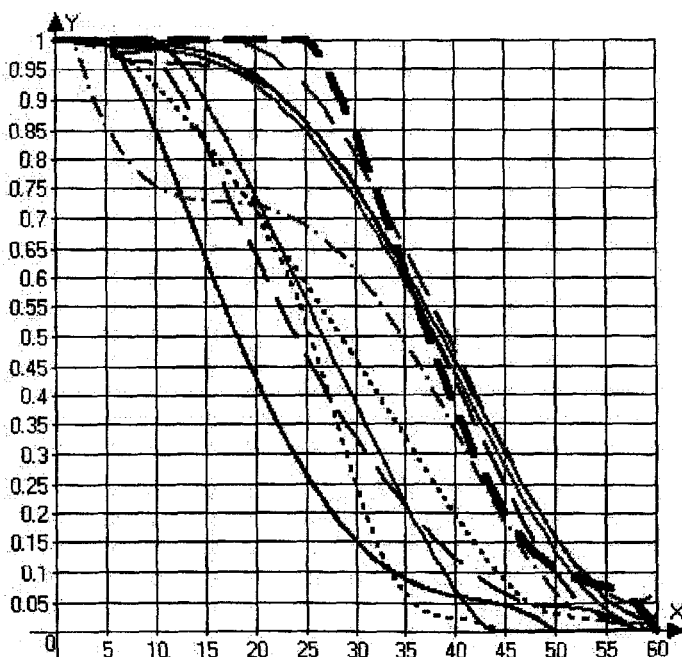


Рис. 5.19. ФПМ разных объективов с различными параметрами настройки, жирная пунктирная линия – программно сымитированная ФПМ [15]

ФПМ достаточно полно описывает свойства объектива по резкости. Недостатком этого показателя является громоздкая форма данных (ФПМ описывается графиком либо таблицей значений). Поэтому были сделаны попытки разработать показатель, который бы, с одной стороны, учитывал весь график ФПМ, и с другой – характеризовался одним числом, как разрешающая способность. Таким показателем является информационная плотность.

Информационная плотность определяется как отношение информационной емкости к площади изображения. В свою очередь, информационная емкость есть логарифм максимального числа изображений, которое может воспроизвести система (в данном случае – объектив), если появление любого изображения равновероятно [13]. Информационная плотность линейно связана с логарифмом площади под графиком ФПМ и зависит от разрешающей способности объектива, определяемой как координата точки ФПМ. Формулы для расчета информационной плотности по ФПМ приведены в [13, 16]. Эксперименты показали, что информационная плотность, вычисленная с применением ФПМ, линейно связана с субъективной оценкой изображения по резкости.

6. Характеристики, связанные с геометрическими искажениями

Эффект искривления прямых линий и контуров при видеосъемке может быть обусловлен дисторсией объектива. Дисторсия – это погрешность изображений оптических систем, при которой нарушено геометрическое подобие между объектом и его изображением [6]. Она является следствием неодинаковости линейного увеличения объектива в различных точках поля изображения, так как периферийные зоны положительной линзы более сильно отклоняют луч по сравнению с центральной частью линзы [5].

Если линза расположена за апертурной диафрагмой, то масштаб изображения уменьшается при удалении от оптической оси к периферии кадра, и диагональ в изображении квадрата становится короче истинного значения (левое изображение на рис. 6.1), а изображение всего квадрата выпуклое и меньше своего истинного размера с учетом масштаба съемки. Такой «выпуклый» вид дисторсии называют бочкообразным или отрицательным.

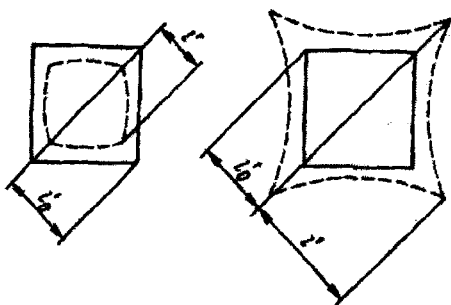


Рис. 6.1. Изображение при отрицательной (бочкообразной) дисторсии (слева) и при положительной (подушкообразной) дисторсии (справа), l_0' – размер изображения диагонали квадрата без дисторсии, l' – с дисторсией [5]

Линзы, расположенные перед диафрагмой, вызывают появление обратного эффекта (увеличение масштаба от центра к периферии) и являются «виновниками» подушкообразной или положительной дисторсии (правое изображение на рис. 6.1). При этом диагональ изображения квадрата больше истинного значения, изображение квадрата вогнутое и больше истинного значения. Если оптическая схема объектива симметрична относительно диафрагмы, то происходит взаимная компенсация двух видов дисторсии [5]. Компенсировать дисторсию возможно и другими способами.

Количественно дисторсию оценивают зависимостью абсолютного или относительного отклонения от прямолинейности в функции угла поля зрения σ' . На рис. 6.2 представлены зави-

симости относительной дисторсии $\Delta y'$ объектива (по горизонтальной оси) от угла поля зрения σ' .

Как было отмечено в разделе 3, отношение фокусного расстояния к диагонали кадра определяет угол поля зрения объектива. Чем больше этот угол, тем сложнее устранить в объективе дисторсию, тем сложнее конструкция объектива и больше его стоимость.

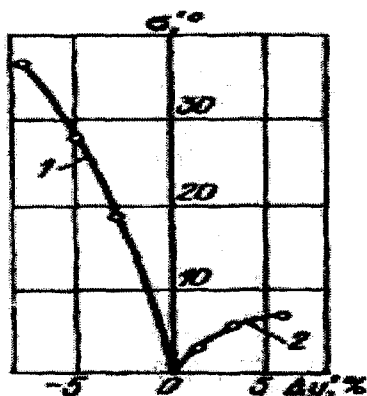


Рис. 6.2. Зависимости относительной дисторсии $\Delta y'$ объектива 70 ОПФ 5-1 (по горизонтальной оси) от угла поля зрения σ' для минимального (40 мм) и максимального (240 мм) фокусных расстояний [5]

Поэтому короткофокусные (широкоугольные) объективы могут иметь большую дисторсию, чем длиннофокусные, которая иногда намеренно не устраняется для создания специальных художественных эффектов (объективы типа «рыбий глаз»).

Литература

1. Бушерон. Мастер-класс. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://busheron.ru/master/word/> – Загл. с экрана.
2. Дудников, Ю.А. Растровые системы для получения объемных изображений / Ю.А. Дудников, Б.К. Рожков. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отд., 1986. – 216 с.
3. Фотокинотехника. Энциклопедия / Научно-редакционный совет изд-ва «Советская энциклопедия»; гл. ред. Е.А. Иофис. – М.: Советская энциклопедия, 1981. – 447 с.
4. dumpz.ru. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://s51.radikal.ru/i131/0811/e9/489f2e94a1b4.jpg> – Загл. с экрана.
5. Ершов, К.Г. Киносъемочная техника / К.Г. Ершов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
6. ZENIT. Красногорский завод им. С.А. Зверева. Научно-технический центр. Фотографические термины и понятия. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.zenit.istra.ru/qa/qa-terms.html> – Загл. с экрана.
7. Зайцева, Е.Г., Никитин, В.В. Анализ отличий в восприятии объектов в трехмерном пространстве и результатов видео- и киносъемки // Инженерия поверхности: сборник научных статей Международной научно-технической конференции. – Брест: изд-во БрГТУ, 2007. – С. 44 – 56.
8. Оптическая схема объектива МС Зенитар-М. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fototest.ru/images/art/20040507141858.gif> – Загл. с экрана.
9. Гордийчук, И.Б. Справочник кинооператора / И.Б. Гордийчук, В.Г. Пелль. – М.: Искусство, 1979. – 440 с.
10. Гордийчук, И.Б. Техника киносъемки в искусстве кинооператора / И.Б. Гордийчук, Л.Ф. Снятиновская. – М.: Искусство, 1983. – 303 с.
11. Оптическая схема объектива. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.panasonic.ru/images/technologies/hs300/03_hd_300.jpg – Загл. с экрана.

12. Film 35-mm Sybjective Bewertung der Oualitat Kinematographische Schwarzeissbilder Begriffe Bedingungen Kriterien. // Bild und Ton, 1972, № 5, P. 159-160.

13. Гребенников, О.Ф. Основы записи воспроизведения изображений (в кинематографе): учебное пособие для вузов кинематографии / О.Ф. Гребенников. – М.: Искусство, 1982. – 239 с.

14. Основы теории преобразования информации: учебно-методическое пособие / Е.Г. Зайцева [и др.]. – Минск: БНТУ, 2007. – 84 с.

15. Измеряем МТФ самостоятельно. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.afanas.ru/video/mtf.htm> – Загл. с экрана.

16. Девойно, Е.Г. Квалиметрия изображений: Методическое пособие по курсу «Физико-математические основы получения изображений и моделей» / Е.Г. Девойно. – Минск: БПИ, 1985. – 49 с.

Учебное издание

ЗАЙЦЕВА Елена Георгиевна

**ОБЪЕКТИВЫ
ДЛЯ ВИДЕОСЪЕМКИ**

Учебно-методическое пособие
по дисциплине «Приборы и системы записи
и воспроизведения аудио- и видеоинформации»
для студентов специальности 1-38 01 01 «Механические
и электромеханические приборы и аппараты»
специализации 1-38 01 01 05 «Бытовые машины,
приборы и аппаратура»

Редактор И.Ю. Никитенко
Компьютерная верстка Д.К. Измайлович

Подписано в печать 22.09.2010.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,55. Тираж 100. Заказ 182.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.