21. ПОСТРОЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕКАНАЛА МИКРОСКОПА, ВХОДЯЩЕГО В СОСТАВ АРМ.

Ранее мы определили условия адекватности изображений в визуальном и ТВ - каналах микроскопов.

В частотном пространстве:

$$G_в(N) = G_0(N)T_М(N)T_г(N), \quad G_Т(N) = G_0(N)T_М(N)V(N)V(N)T_г(N), \qquad (21.1)$$

где $G_в(N)$ – спектр изображения объекта в визуальном канале, $G_0(N)$ – спектр объекта (идеального изображения объекта), $G_Т(N)$ – спектр изображения в ТВ –канале.

Из-за того, что на частоте Найквиста $V(N)$ = 0,637 (обычно из-за влияния физических факторов, связанных с неэффективностью переносов носителей зарядов и диффузией носителей в подложке, на частоте Найквиста $V(\mathbf{N})$ = 0,15 – 0,3), качество изображения в визуальном и ТВ – каналах никогда не будет одинаковым. Перед разработчиком возникает задача не точного соответствия указанных изображений, а хотя бы добиться их максимально одинакового психофизиологического воздействия на глаз оператора.

$$G'_B(N') = T(N')G_0(N'), \quad G'_T(N') = T(N')V(N')G_0(N'). \qquad (21.2)$$

Однако, если изображение, получаемое в ТВ – канале должно подвергаться математической обработке, то качественные критерии психофизиологического характера не годятся, т.к. такое искажение как муар имеет и математический смысл. В частности критерий Найквиста связан с понятием мимикрии (переналожения) частот спектров функций с ограниченным спектром, что сказывается на результатах математической обработки изображения. Приходим к задаче баланса, оптимизации системы, ее характеристик, одной из которых является значение линейного увеличения β оптической системы ТВ – канала..

Обычно при построении оптической системы ТВ – канала принимают концепцию одинаковости полей зрения в визуальном и ТВ-канале. Окулярное поле зрения микроскопа составляет 15 – 20 мм и более, а форматы матрицы ПЗС 1/4″, 1/3″, 1/2", 2/3", 1″ и т.д. имеют меньшие размеры диагонали, например, матрица 1″ имеет размер диагонали 16мм. Поэтому в ТВ – канале вместо окуляра для визуальных наблюдений появляется адаптер – система для сопряжения поле изображения с матрицей телекамеры и согласования размеров полей указанных каналов. На рис. 21.1 приведены два варианта построения оптической схемы ТВ – канала микроскопа.

В первом варианте адаптер имеет положительное значение линейного увеличения $\beta_а$, т.е. он работает с мнимым предметом, в роли которого выступает изображение, образованное микрообъективом и тубусной линзой, а во втором варианте $\beta_а$ имеет отрицательное значение. Во втором варианте обыкновенный окуляр микроскопа $\varphi_{ок}$ просто дополнен фотообъективом $\varphi_{об}$. На рис. 21.2 приведены фотографии адаптера, построенного по второму варианту. Это серийный адаптер АОТ – 1С.

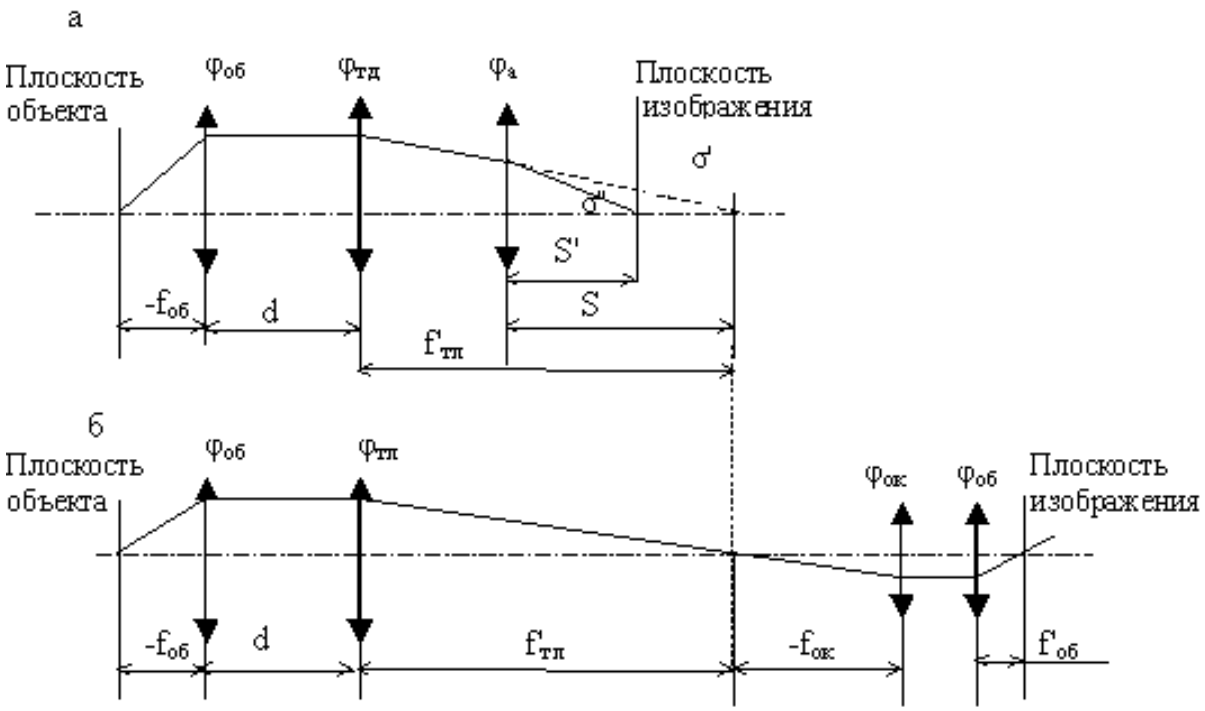


Рис. 21.1

а б

Рис. 21.2

В состав адаптера входит три окуляра 1, 2 и 3 (рис. 21.2 а), обеспечивающие значения линейного увеличения адаптера $\boldsymbol{\beta_a}$ равные 1^x, $0{,}5^x$ и $0{,}3^x$ и объектив (4). На рис. 21.2 (б) приведен вид адаптера в сборе, где 1 окуляр и 2 объектив. Вторая схема длиннее первой, как это имело место в фотоканалах микроскопов при использовании в качестве фотоокуляра типа гомал и обычно расфокусированного окуляра.

Увеличение адаптера $\boldsymbol{\beta_{адапт}}$ определится по формуле:

$$\beta_a = \frac{D}{D_{ПД}}, \qquad (21.3)$$

где $\boldsymbol{D}$ – размер (диагональ) матрицы ПЗС.

Определим разрешение оптической системы ТВ – канала значением $\boldsymbol{\Delta\rho'}$- радиусом диска Эри $\boldsymbol{\Delta\rho}$:

$$\Delta\rho' = \frac{\mathbf{0{,}61\lambda}}{\boldsymbol{A'}}, \qquad (21.4)$$

где $\boldsymbol{A'}$ – задняя апертура адаптера, $\boldsymbol{\lambda}$ – наименьшая длина длина волны рабочего спектрального интервала.

Общее увеличение ТВ - канала $\boldsymbol{\beta}$ определяется по формуле

$$\beta = \frac{f'_{тл}}{f'_{об}} \cdot \beta_a = \frac{A_{об}}{A'}, \qquad (21.5)$$

где $f_{об}$ и $f_{vк}$ – фокусные расстояния микрообъектива и тубусной линзы, $A_{об}$ – передняя апертура микрообъектива.

Величина $\frac{f'_{тл}}{f'_{об}}$ известна. Если наложить условие Найквиста, то

$$A' = \frac{\mathbf{0.61\lambda}}{\mathbf{2\delta}} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{f'_{тл}}{f'_{об}} = \frac{f'_{тл}}{f'_{об}} \cdot \frac{A_{об}}{A'},$$ где $\boldsymbol{\delta}$ – шаг матрицы ПЗС.

Но тогда условие равенства наблюдаемых полей в визуальном и ТВ – каналах не всегда будет выполняться. Тогда нужно отфильтровать высокие частоты в изображении и использовать формулу Рождественского:

$$\Delta\rho = \frac{\lambda}{A_{об} + A_{ос}}, \qquad (21.6)$$

где $\boldsymbol{A_{ос}}$ – апертура конденсора ОУ микроскопа (ОУ на схеме не показано), $\boldsymbol{\Delta\rho}$ **–** определяет шаг шпальной миры Фуко на предельной частоте.

Фильтрацию можно осуществить, затягивая апертурную диафрагму конденсора и добиться выполнения условия Найквиста. Отметим, что на практике часто используется более жесткое условие, чем критерий Найквиста, а именно:

$$\boldsymbol{\Delta\rho = (1{,}4 \div 12)\delta}. \qquad (21.7)$$

Уровень видения	Задача СТЗ	n_0
Обнаружение	Фиксируется появление объекта в поле зрения	2
Определение	Различается форма объекта и определяется его ориентация	2,8
Различение	Классифицируется объект (дом, автомобиль, человек и пр.)	8
Опознавание	Устанавливается тип объекта (марка автомобиля)	12,8

Есть и электронный способ решения задачи, который ранее уже был рассмотрен, – изменение размера телевизионного растра (уменьшение числа строк и столбцов в матрице с одновременным увеличением $\boldsymbol{\delta}$).

При проектировании оптической системы ТВ – канала разработчик должен четко осознать, какие структуры изображения он должен обнаруживать, какие определять, какие различать и какие опознавать

Например, если объектом исследования служит дифракционная картина на апертуре оптической системы, то может иметь место соотношение: $2r'_m = h$, где h – размер матрицы, r'_m – радиус «m»-го максимума дифракционной картины, при этом: $r'_m = x_m \lambda / 2A'$, откуда

$$A' = \left(x_m \frac{\lambda}{h} \right) \qquad (21.8)$$

где A' – числовая апертура оптической системы в пространстве изображений, x_m – величина, выражаемая в оптических единицах. Для изопланатической системы $\beta = A/A'$ и после преобразований получим:

$$\beta = A_{об} \frac{h}{x_m \lambda} \ . \qquad (21.9)$$

Для круглой апертуры и $m = 3$, $x_m = 3{,}699$ и значениях $A_{об} = 1$, $h = 10$ мм, $\lambda = 0{,}0006$мм и числе строк $n_1 = 625$ получаем значение $\beta = -4506^x$, что на два порядка выше полезного увеличения ТВ – канала, полученного ранее из информационного критерия. Полученное значение β носит экстремальный характер. Реальное значение β меньше. Допустим, что для точного отображения хода кривой светораспределения между двумя соседними максимумами интенсивностями необходимо «уложить» между ними 15 строк или пикселов, тогда: $r_{m+1} - r_m = 15\delta$, одновременно $\delta = h/n_1$, откуда для задней числовой апертуры A' имеем:

$$A' = \Delta x_m \frac{\lambda n_1}{30h} \qquad (21.10)$$

и при прежних значениях величин, входящих в последнюю формулу получаем $\beta = -784^x$ при $m = 2$. Информация, содержащаяся в оптическом изображении, для телевизионой системы избыточна и частично теряется, но количество используемой информации должно быть достаточным для получения качественного телевизионного изображения.

22. УВЕЛИЧЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОР – ОПЕРАТОР.

"В цифровой системе видеонаблюдения есть лишь один этап преобразования телевизионного сигнала, который остаётся не цифровым и не автоматизированным и, скорее всего, не станет таким никогда - превращение изображения на экране монитора в зрительное ощущение оператора. До тех пор пока оператор не осознал увиденную картину задачу системы телевизионного наблюдения нельзя считать выполненной. Именно этому этапу проектировщики уделяют меньше всего внимания". Тем не менее, этот вопрос подробно был разработан в 60-е годы профессором В.Н.Чуриловским при рассмотрении работы микроскопа в

режиме микропроекции и работы телевизионного микроскопа с выводом изображения на экран монитора или его распечатке на принтере (в то время принтеров не было, но результаты В.Н.Чуриловского по рассмотрению процесса фоторегистрации изображения с последующей его печатью на фотоувеличителе позволяют сделать это обобщение). Рассмотрим эти результаты.

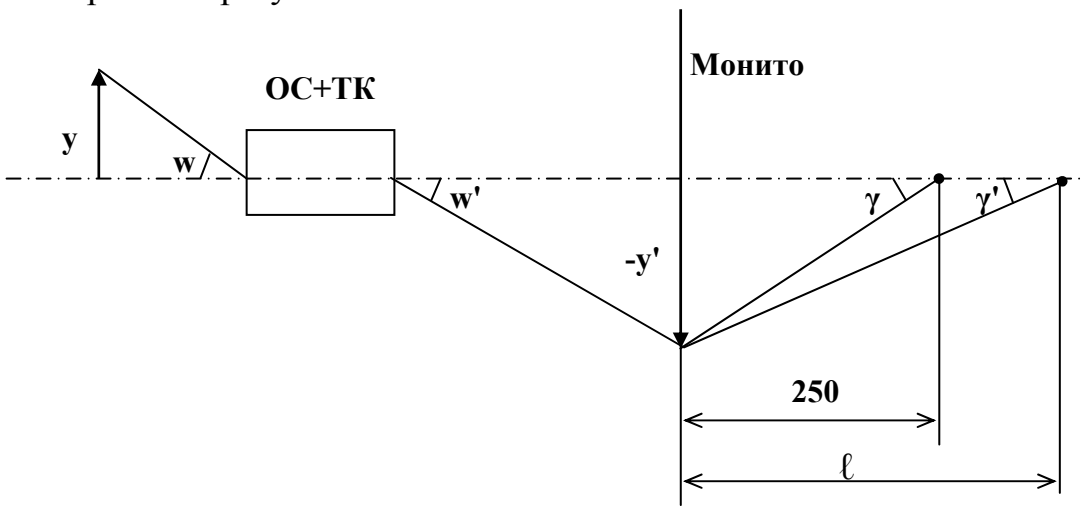


Рис. 22. 1

Под видимым увеличением **Г** оптического прибора в самом общем виде понимается отношение углового размера изображения объекта на сетчатке вооруженного глаза **γ** к угловому размеру изображения объекта на сетчатке невооруженного глаза оператора **γ'**.

$$\mathbf{\Gamma = \gamma'/\gamma}$$

Обратимся к рисунку, на котором схематично представлена система видеонаблюдения, где оптическая система с телекамерой, строящая изображение объекта размером **2*y*** на экране монитора размером **2*y*'**, представлена квадратиком. Глаз оператора может занимать два положения – на расстоянии 250 мм (расстояние наилучшего видения) от экрана монитора и на расстоянии **ℓ**. Из рисунка имеем

$$\gamma = y/250 \text{ и } \gamma = y'/\ell,$$

откуда получаем

$$\mathbf{\Gamma_м = 250/\ell,} \qquad (22.1)$$

где под $\mathbf{\Gamma_м}$ понимается видимое увеличение системы монитор – слой пространства – глаз оператора. Роль оптического прибора играет слой пространства, что хорошо согласуется с теорией распространения.

Для всей системы видимое увеличение Г определится по формуле

$$\mathbf{\Gamma = \beta_с \Gamma_м,}$$

где по определению В.Н.Чуриловского $\mathbf{\beta_с}$ – полное линейное увеличение всей системы от объекта до экрана монитора.

Величина $\mathbf{\beta_с}$ формируется из двух увеличений - $\mathbf{\beta_с = \beta\ \beta_т}$, где **β** – линейное увеличение оптической части системы, а $\mathbf{\beta_т}$ – линейное увеличение телевизионной части, определяемое, например, отношением диагонали экрана монитора к диагонали ПЗС матрицы телекамеры.

Относительно значения величины β_c следует сказать особо. Принципиально разработчик его может сделать любым, но при неудачном выводе он может натолкнуться на артефакты в изображении, например, дифракционные ореолы вокруг деталей изображения и пр. Например, при выборе его значения должен учитываться критерий Найквиста, а также соблюдены условия отсутствия дифракционных ореолов. Для реализации последнего условия значение величины $\boldsymbol{\beta_c}$ не должно превышать значения полезного увеличения $\boldsymbol{\beta_п}$, которое согласно В.Н.Чуриловского определяется по формуле: $\boldsymbol{\beta_п = -1200A\ell}$,

где $\boldsymbol{A}$ - числовая апертура оптической части в пространстве объектов.

Из физиологических критериев (острота зрения) была получена вилка значений величины $\boldsymbol{\ell}$, определяющей положение наблюдателя относительно экрана монитора

$$\boldsymbol{2D \le \ell \le 5D}, \qquad (22.2)$$

где $\boldsymbol{D}$ – диагональ экрана монитора $\boldsymbol{(2y')}$.

Отметим, что условие (22.2) согласуется с условием естественного впечатления, но при этом необходимо иметь $\boldsymbol{\Gamma = 1}$.

Ниже приведены две таблицы, характеризующие современное видение рассмотренных вопросов.

Основные параметры отображений различного типа. Табл.1

Тип изображения	Расстояние до объекта	Размер изображения по горизонтали	Разрешение	Угловой размер ЭО (мрад)
Страница текста	25 см	20 см	8 лин/мм	1,71
ЭЛТ монитор	50 см	25 см	0,27 мм	1,78
Проекционный экран	250 см	1200 см	1024 лин	1,91
МД	25 мм	10 мм	800 лин	0,16

МД – микродисплей, ЭО – элемент отображения.

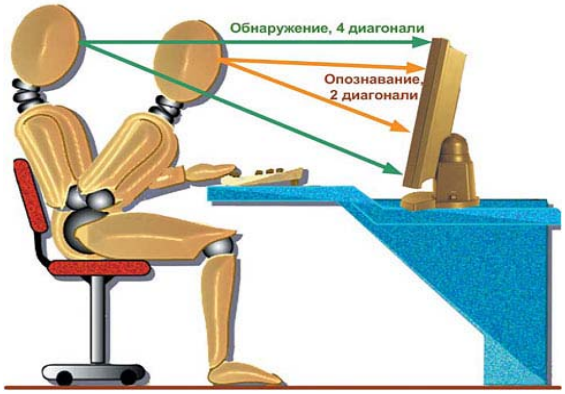
Таблица Джонса Табл.2

Уровень видения	Задача СТЗ	n_0
Обнаружение	Фиксируется появление объекта в поле зрения	2
Определение	Различается форма объекта и определяется его ориентация	2,8
Различение	Классифицируется объект (дом, автомобиль, человек и пр.)	8
Опознавание	Устанавливается тип объекта (марка автомобиля)	12,8

Из рассмотренного материала и Табл.2 следует, что при изменении $\boldsymbol{\ell}$ будет меняться уровень видения. Можно утверждать, что при

коллективном просмотре разные наблюдатели будут видеть одно и то же изображение по-разному и лишь один оператор ("центральный") будет находиться в условиях оптимального наблюдения.

Приведем ряд примеров современного видения рассмотренных вопросов и начнем с организации рабочего места оператора. Он (оператор) живой - двигается.



Это иллюстрация зависимости уровня видения от **ℓ**, но с утверждением, что "откинувшись" на кресле можно взять два крайних значения уровня видения трудно согласиться – отношение дистанций в единицах диагонали должна быть не менее 6 (см. Табл. 2).

Рассмотрим идеальную ситуацию – у оператора есть все.

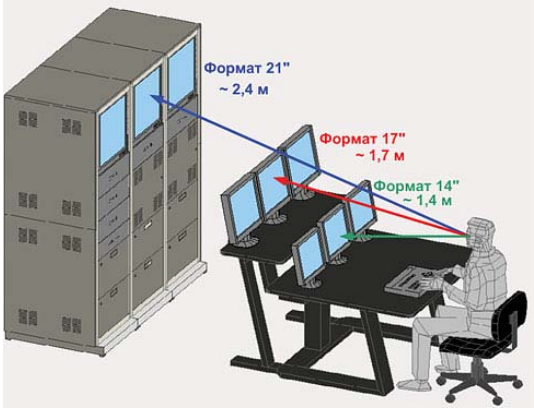


Рис. 22.2

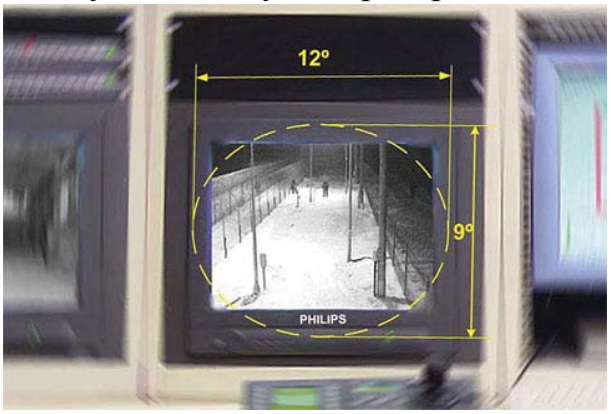


Рис. 22.3

"Обнаружив объект, оператор для лучшего его рассмотрения (зрительная задача опознавания) может приблизиться к экрану, уменьшая рассматриваемую его часть. Но не ближе того расстояния, с которого строки будут мешать целостному восприятию изображения. То есть не ближе 1-2 диагоналей от экрана".

Д – микродисплей, $\varphi_л$ – окуляр (очко).

Последнее утверждение сомнительно из-за своей неконкретности ("....не более 1-2 диагоналей .....")

У нормального пользователя будет один монитор. Какой должен быть монитор? Укажем, что основная причина низкой эффективности восприятия изображения связана с не оптимальным форматом монитора.

Для решения зрительной задачи обнаружения оператору нужен весь экран. В таком случае желательно, чтобы видимый угловой размер экрана соответствовал угловому полю "ясного зрения" оператора, которое (по мнению некоторых) для здорового человека составляет приблизительно 9° по вертикали и 12° по горизонтали (рис.22.4). Обратим внимание, что важен не линейный, а именно угловой размер экрана. Тем не менее для

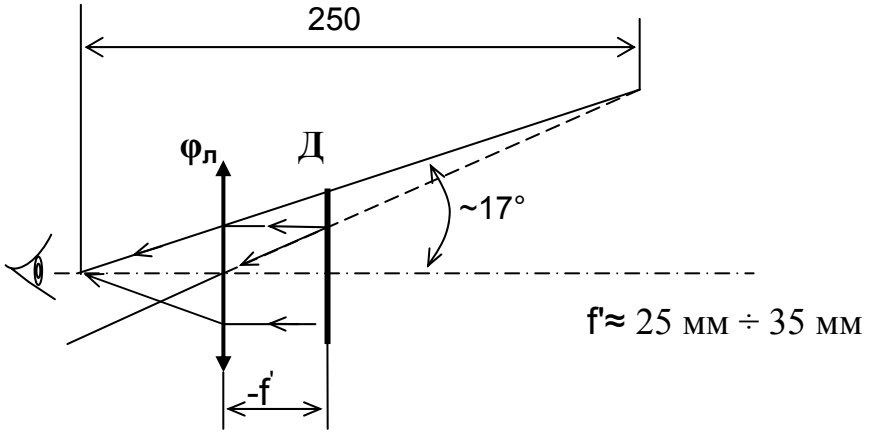


Рис. 22.4

комфортного поля зрения оператора существуют и другие цифры – 34° по вертикали и 24° по горизонтали (см. рис. 22.5).

Воспользовавшись данными Табл.1, то мы получим иные цифры. Если же мы рассмотрим поле зрения окуляра микроскопа, **2w'** (см. рис. 22.1) то оно не будет меньше 40°. Все это говорит о не изученности вопроса, о разрозненности результатов различных разработчиков, получаемых не понятным путем (не по результатам собственных исследований, а по результатам литературных источников). Конечно, необходимы дополнительные исследования и не опыты, а эксперименты, связанные с согласованием полей зрения визуального и телевизионного каналов. В визуальном канале мы можем двигать глазами – сканировать поле зрения, а в телеканале нет такой возможности. Отсюда возникает мысль о целесообразности телефиксации не всего поля зрения визуального канала, а его центральной части, ограниченной зоной "неподвижности зрачков глаза" наблюдателя, и здесь появляется возможность разрешения некоторых противоречивых требований к телеканалу микроскопа (и не только микроскопа).

Рассмотрим вопрос шире – когда видеоинформацию должен получать не любознательный, а ответственный человек, например, второй пилот самолета.

Рис. 22.6

Мы приходим к понятию функции рассеяния экрана (ФРТ).

Область существования ФРТ в горизонтальном направлении обычно составляет 150°, яркость экрана не менее 1000 нт. Область существования ФРТ определяется действием рассеивателей в системе подсветки экрана и этих рассеивателей не менее трех – два одномерных рассеивателя типа фазовой дифракционной решетки и один хаотический, например на микросферах, обеспечивающих рассеяние не в соответствии с теорией Релея, а в соответствии с теорией рассеяния Ми, где доля обратного рассеяния мала..

Большой угловой размер ФРТ (150^0) неизбежно приведет к нарушению цветопередачи в изображении, которое можно объяснить явлением метамерии. Различают четыре вида явления метамерии: метаметризм излучения, метаметризм наблюдателя, метаметризм углового поля зрения и метаметризм геометрический.

Метаметризм излучения наиболее знаком и он связан с тем, что при освещении разными источниками света цвет изображения меняется.

Метаметризм наблюдателя связан со способность разных людей по-разному воспринимать цвет, метаметризм углового поля зрения связан с тем, что равенство цветов пропадает, когда угол, под которым виден объект, меняется с 2° на 10°. Напомним, что существует две системы основных цветов МКО 1931 г. и 1964 г. Первая оперирует с углом поля зрения 2°, а вторая с углом в10^o.

Геометрический метаметризм связан с геометрией наблюдения, иначе в зависимости от положения наблюдателя зависит и цвет. Это не то же самое, что имеет место при рассматривании изображения под разным ракурсом на экране ЖК-дисплея, хотя похоже. Метаметризм по-разному проявляется в разных областях спектра.

"Коллективный просмотр изображения с экрана монитора равносилен работе одного оператора с несколькими мониторами. Этот вопрос развит в охранных системах и системах военных. В нужный момент второй пилот может моментально получить информацию с экрана "вспомогательного" монитора, если выбранные изображения никогда не переключаются. При этом руки пилота остаются свободными, достаточно лишь бросить взгляд на соответствующий экран".

Отметим, что для второго пилота явление метаметризма малозначительно, т.к. бортовые экраны чаще всего не передают полутонов.

23. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС.

В современных АРМ можно выделить не менее 3-х режимов: диалоговый (изображение берется ТВК и обрабатывается на компьютере, оператор – активный участник процесса); интеллектуальный режим (моторизованная микроскопия – сшивка полей зрения, сканирование большого поля по заданной траектории полем зрения микроскопа, оператор несет ограниченную ответственность); автономный режим

(допустимо использование оператора низкой квалификации). На сегодняшний день наиболее распространен в России диалоговый режим.

Полностью или частично автономные АРМ используются в охранных системах, в производственных технологических линиях, на беспилотных летательных аппаратах, в системах контроля состояния зданий, мостов и других сооружений, например, железнодорожных путей, его контактной сети электрифицированных участков магистрали, тоже относится и к метрополитену.

Рассмотрим коротко принципы построения таких систем на основе диагностического комплекса (ДК) вагона – лаборатории контактной сети (ВИКС, разработка НИИ ЭФА им. Д.В. Ефремова, г. С-Петербург) и вагона путеизмерителя, которые используются на железных дорогах и метро для диагностики состояния контактной сети и пути. Такие системы

Рис. 23.1

есть во всех развитых странах с разветвленной сетью дорог и метро.

Комплекс базируется в специально оборудованном вагоне (дрезине, матриссе и пр. см. рис. 23.1), который, проходя по тому или иному маршруту, за время движения производит измерения. Скорость движения в настоящее время (Россия) до 140 км/час, измерения выполняются каждые 20 мм. Ведутся работы по обеспечению работы диагностического комплекса на скоростях до 200 км/час.

Объект исследования – контактная сеть, основным элементом которой является контактный провод (КП) и опоры вокруг него. КП может находиться на высоте от 6900 до 5400 мм от уровня верхней головки рельс (УВГР), идет зигзагом с амплитудой ±700 мм с шагом 50 м. Зигзаг необходим, чтобы контактная площадка лыжи, закрепленной на пантографе, выполненная из графита, стиралась равномерно по своей длине.

На рис.23.2 приведена укрупненная блок-схема ДК ВИКС. Выполнение диагностических функций вагона обеспечивают следующие основные комплексы (рис.23.2): датчико-диагностический комплекс (ДДК), информационно-вычислительный (ИВК) и электроэнергетический комплекс (ЭЭК). ДДК состоит из датчиков и аппаратуры предварительной обработки сигналов (АПОС). Далее сигналы поступают в ИВК, который представляет собой двухуровневую локальную сеть из трех персональных компьютеров (*ПК*).

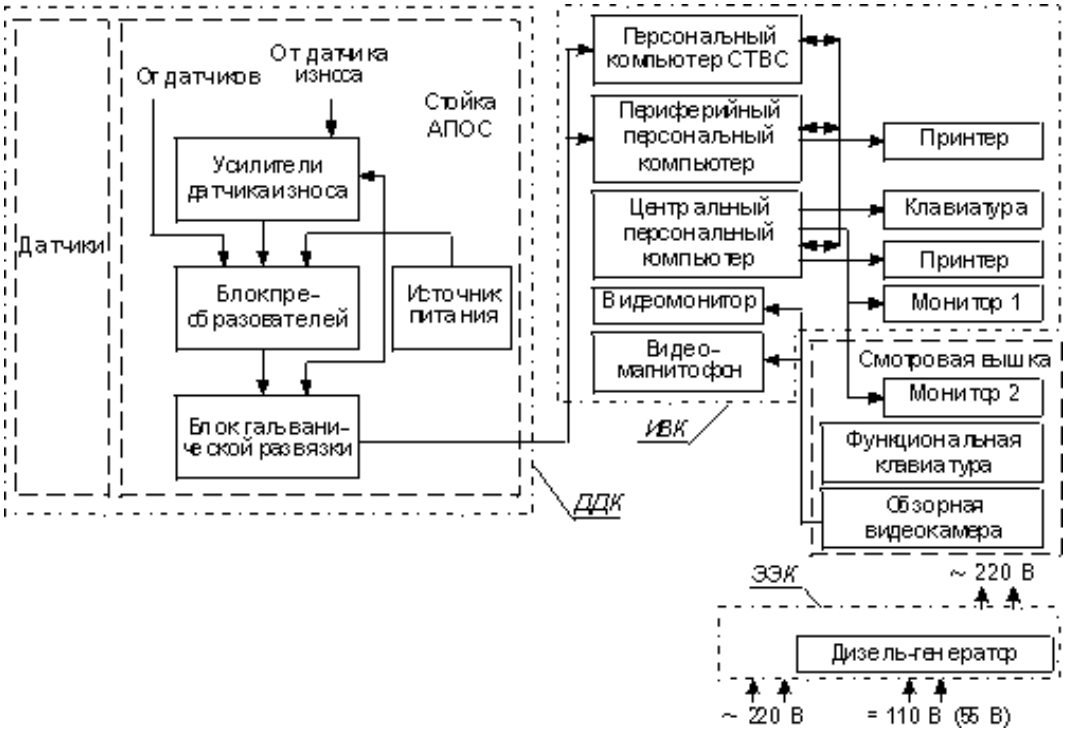


Рис. 23.2

На рис.23.3 приведено рабочее место оператора. На рис.23.4 схематично представлены основные датчики ДК и решаемые ими задачи.

Рис.23.3

Основные компоненты (системы и датчики) ДК вагона-лаборатории. Основной системой ДК является стереотелевизионная система, в которой решается классическая триангуляционная задача. На рис.23.5 приведена зона и ее размеры, где могут находиться один или несколько (до четырех) КП и стереотелевизионная система из трех ТК, которые работают с линейными ПЗС.

Стереосистема располагается под потолком внутри вагона (рис. 23.7) на уровне от верхней головки рельс (УВГР) 3500 мм и может работать одновременно с 4 КП, поэтому для избежания проявления ложных сигналов - артефактов она включает в себя не два, как это показано на рис.23.6, а три ТК.

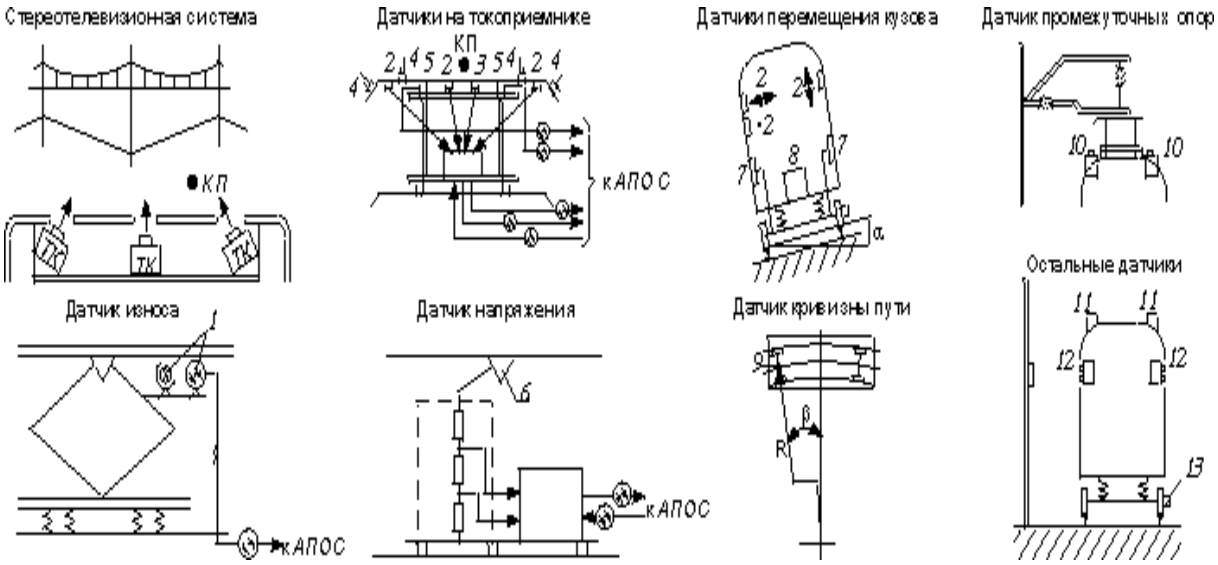


Рис. 23.4

Суть проявления артефактов приведена на рис. 23.6. Алгоритм обработки результатов измерений построен так, что при решении задачи находятся точки пересечения лучей. Из рис. 23.6 ясно, что в точке А нет КП. Поэтому, если не принять специальных мер, может проявиться артефакт. Алгоритм построен на простых тригонометрических преобразованиях. Система требует начальной калибровки, в результате которой формируется таблица тангенсов – между номером пиксела и значением тангенса устанавливается соответствие. Конструкция ТК проста – ТК висят в карданном подвесе.

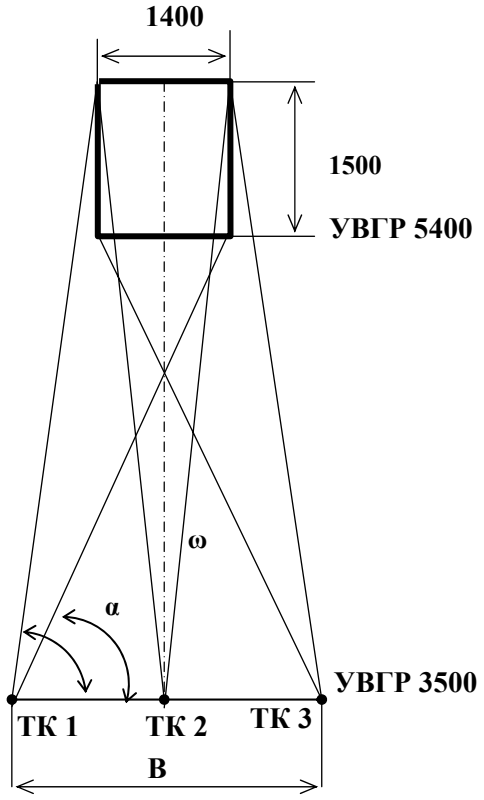


Рис.23.5

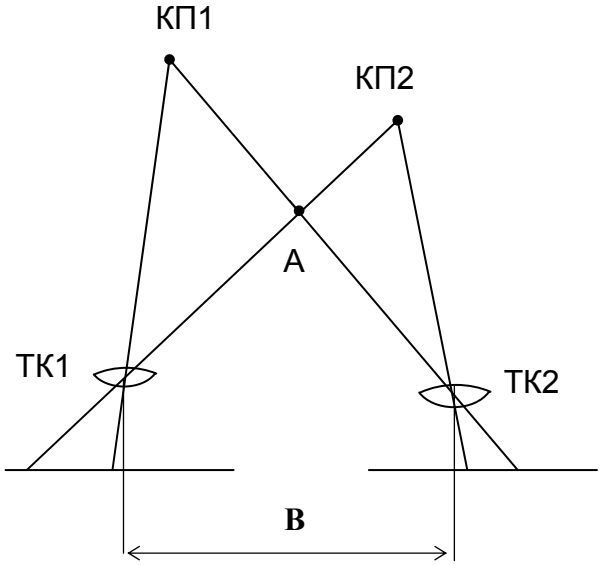


Рис.23.6.

Рис. 23.7

Сложность здесь встречается на стадии эксплуатации, так как ДК на большой скорости движения вагона работает круглые сутки при любых погодных условиях – ночь, день, дождь, снег и пр. С учетом того, что ТК "смотрят" вверх - солнце, посторонние светильники и облака снижают надежность получаемого результата. На некоторых участках ж/д ДК может просто не работать. Для борьбы с влиянием Солнца и облаков используются узкополосные ($\Delta\lambda_{0,5}$ = 1-2 нм) интерференционные ИК – светофильтры (λ = 800-900 нм). ПЗС имеет электронную диафрагму, изменяющую чувствительность детектора без изменения апертуры объектива ТК. На ранних стадиях развития системы световой поток, попадающий на детектор, регулировался путем затягивания механической апертурной диафрагмы объектива ТК в автоматическом режиме.

В дневное время ДК работает без подсветки, а ночью с подсветкой. Во избежание «*смаза*» изображения датчики работают в импульсном режиме. Частоту следования замеров определяют датчики реперных опор КП (провод, натянутый между столбами - опорами, стоящими вдоль железнодорожного полотна), смотрящие вертикально вверх. Именно на реперных опорах крепятся КП. Датчик (рис. 23.8) состоит из объектива $\varphi_{об}$ и фотодиода ФД, Датчик имеет ночной и дневной режимы работы. Ночью реперные опоры подсвечиваются фарами, установленными на крыше вагона.

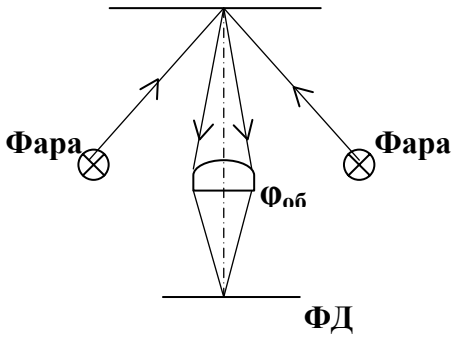


Рис.23.8

Для определения местоположения ВИКС на магистрали в состав ДК входит глобальная система определения местоположения и датчик боковых опор (столбов), на которых могут располагаться уголковые отражатели УО (рис. 23.9).

Датчик боковых опор состоит из двух каналов, содержащих светодиод СД и фотодиод ФД, установленных в переднем фокусе объективов $\varphi_{об}$. Световой пучок СД отразившись от опоры или уголкового отражателя (УО) приходит во второй канал на ФД, где вырабатывается сигнал о наличии опоры.

Рис. 23.9

Кроме уже рассмотренных датчиков в ДК имеются и другие, например, датчик промежуточных опор (рис. 23.10). На этих кронштейнах-опорах крепятся реперные опоры (трос). Задача датчика - контроль за их сохранным состоянием. Датчик так же решает триангуляционную задачу и, т.к. в схеме измерения имеется прямоугольный треугольник достаточно одной телекамеры и системы лазерной подсветки, включающей в себя лазерный диод (ЛД) и коллиматор (на рисунке не показан), светящий в зенит.

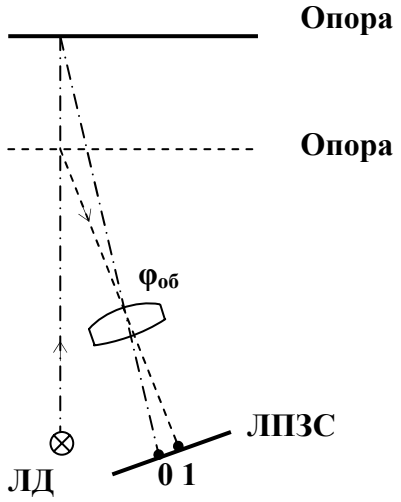


Рис. 23.10

Опора может по высоте занимать промежуточные между двумя крайними положениями. Пучок ЛД, отразившись от опоры фокусируется объективом $\varphi_{об}$ в плоскости линейного ПЗС (ЛПЗС) в зависимости от высоты опоры между точками крайних положений **0** и **1**. Далее решается тригонометрическая задача.

Важную задачу решает датчик износа КП. Датчик износа КП расположен на лыже пантографа, на крыше вагона (рис. 23.11), строится по принципу сканера.

Сканирование осуществляется за счет движения вагона и при этом контролируется ширина площадки износа КП, поперечное сечение которого можно принять круглым. Первые датчики износа строились как многоканальная система, в каждом из каналов было по 2000 светодиодов и фотодиодов, сигнал с которых по волоконной линии связи поступал в ИВЦ. Для обеспечения равновеликости сигналов в каналах в каждом из них был усилитель и пр.

Рис. 23.11

Система сложна и дорога, поэтому была реализована схема с четырьмя телевизионными датчиками, рассмотренными ранее и приведенными на рис. 23.12. Система сложна и дорога, поэтому была реализована схема с четырьмя телевизионными датчиками, рассмотренными ранее и приведенными на рис. 23.12.

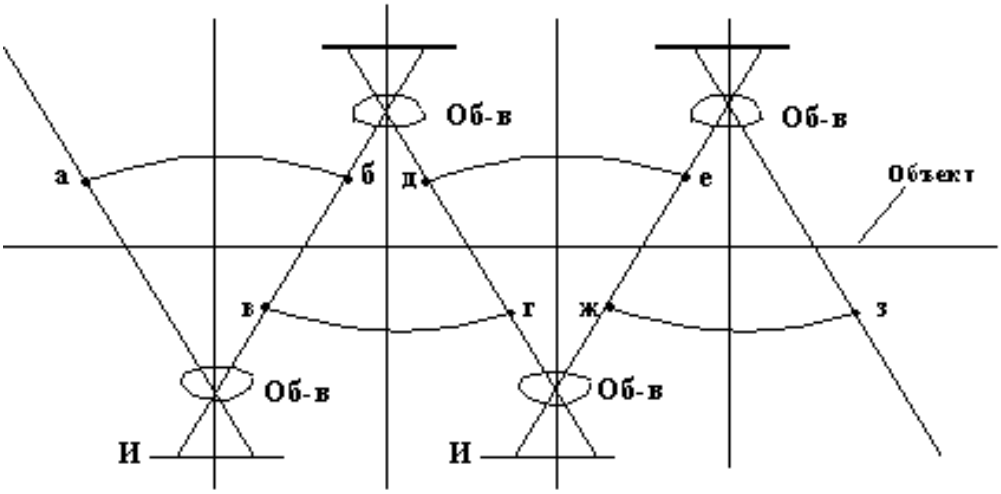


Рис. 23.12

Проблема стыковки четырех полей (сшивки) решается как конструктивно, так и программно. Осциллограмма одиночного импульса от КП имеет вид до обработки в соответствии с рис.23.13 (а) и после обработки в соответствии с рис. 23.13 (б).

а б

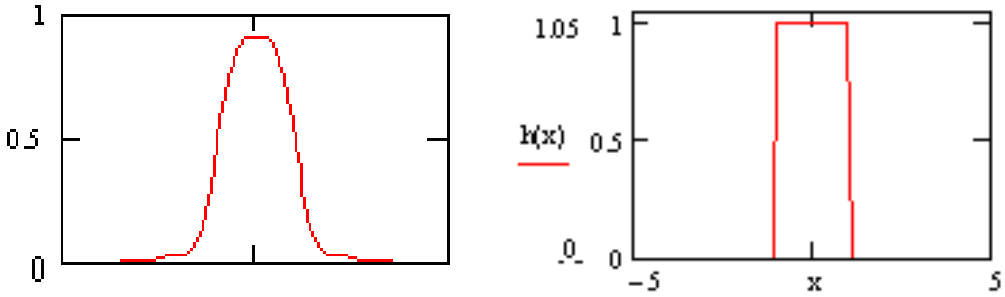


Рис.23.13

Кроме оптических датчиков в вагоне имеются и датчики, работающие на других физических принципах. Это датчики для измерения ускорений, силы удара, измерения электрического напряжения в контактной сети, датчик скорости, датчик кривизны пути и пр.

Есть одно обстоятельство, которое никак не может быть обойдено. Все датчики находятся на подвижной платформе, имеют место бортовая и килевая качки. Это требует введения поправок в измерения. Для выработки этих поправок имеются датчики боковых перемещений (см. рис.23.4). При изменении положения вагона поворотный трансформатор разворачивается на некоторый угол, изменяется длина троса ℓ_0. Вагон при движении "закручивается" и длины троса ℓ_0 на 4-х датчиках разные. Практика показала целесообразность учета только боковой качки, килевую качку – угол тангажа можно не учитывать. Результаты этих измерений позволяют выработать поправки на боковую качку и использовать эти поправки в алгоритмах обработки результатов измерений всех датчиков и систем. В таких датчиках велика вероятность обрыва троса, что приведет к тому, что поправки не будут вводиться и проезд получается холостым. Точность достаточно невелика. Есть альтернативные разработки на основе стереотелевизионной системы, использующие принцип электронного нониуса.

В качестве примера на рис. 23.15 приведен фрагмент распечатки графической записи основных параметров - высоты, зигзага, нажатия с наложением сигнала от ударов и подбоев. Горизонтальные линии соответствуют указанным слева номерам опор. На графике видны погрешности в регулировке контактной сети: в середине пролета 46 - 48 стрела провеса отрицательная, у опоры 54 завышен зигзаг контактных проводов; отмечен подбой у опоры 46, резкое увеличение нажатия токоприемника у опор 48, 58 и снижение нажатия у опор 46, 48, 54.

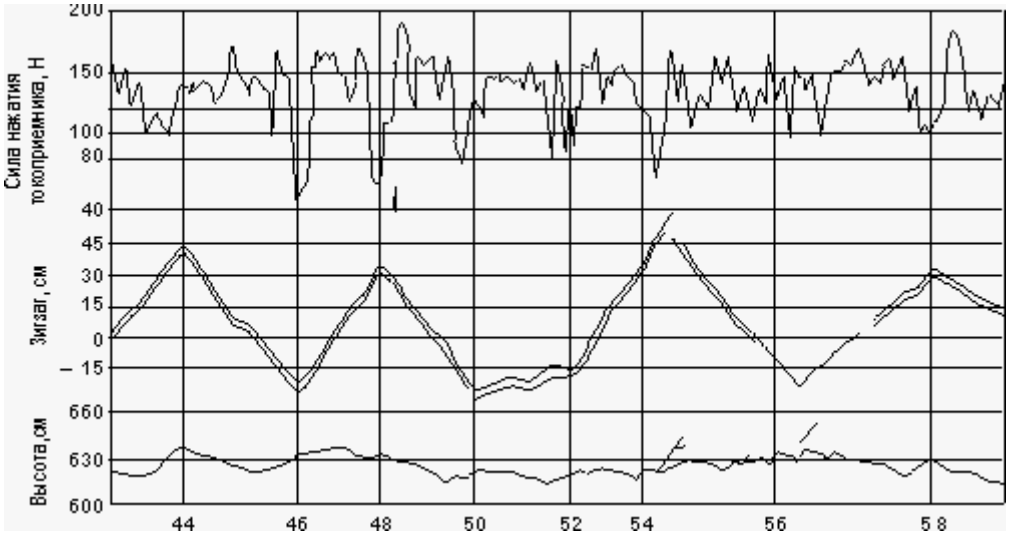


Рис.23.15

24. ЦЕХОВЫЕ ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ.

Приборы контроля в оптическом производстве служат для решения задач технического контроля изделий, его узлов и отдельных элементов

(линз, призм, зеркал, покрытий и пр.) на соответствие их чертежу с учетом установленных допусков и требований технических условий (ТУ) на прибор в целом. Мы здесь не будем рассматривать приборы контроля, которые описаны во многих книгах и пособиях по курсу "Оптические измерения", а обратим внимание на малоизвестные, но важные для оптического производства приборы и методики.

Контроль чистоты поверхности (шероховатости) и качества покрытия (коэффициент пропускания/отражения - **τ/ρ** в рабочем спектральном интервале) может выполняться на микроспектрофотометре типа МСФУ-К, выпускаемом серийно ОАО "ЛОМО", которыми оснащаются оптические цеха и электровакуумные лаборатории. На рис. 24.1 представлен общий вид МСФУ-К, который может измерять коэффициенты зеркального и диффузного отражения оптических (и не только оптических) поверхностей с нанесенным на них покрытием и без. Микроспектрофотометр построен по однолучевой схеме, поэтому в нем предусмотрена калибровка регистрируемых спектров по эталонам, входящих в его состав.

Рис. 24.1

В состав микроспектрофотометра входит микроскоп типа "Люмам РПО-11", спектральная насадка с дифракционной решеткой (600 мм$^{-1}$) в качестве диспергирующего элемента и компьютер с программным обеспечением "Барсик".

Контроль чистоты поверхности на микроспектрофотометре проводится по методике А.С.Топорца, в основу которой положена формула:

$$h = \frac{\lambda}{\pi Cos(\varepsilon)}\sqrt{\frac{\rho_d}{\rho}}, \qquad (24.1)$$

где **λ** – длина волны падающего излучения, **ε** – угол падения освещающего пучка, ρ_d и **ρ** коэффициенты диффузного и зеркального отражения поверхности.

Оптические элементы поляризационных приборов, располагаемые между поляризатором и анализатором, в обязательном порядке должны подвергаться контролю на их двулучепреломление, которое может быть вызвано как неоднородностями в заготовке стекла, так и напряжениями, возникающими при изготовлении оптического элемента и его пережатии в механической оправе.

Для контроля на двулучепреломление крупногабаритных изделий могут быть использованы поляриметры типа ПКС-250 и ПКС-500, однако для контроля микрооптики они малопригодны. Цеховой контроль в этом случае осуществляется на поляризационных микроскопах типа "Полам Р-213" в проходящем свете (рис. 24.2).

Рис. 24.2

Тем не менее этот контроль затруднителен из – за проявления ложного двулучепреломления, вызванного зависимостью коэффициентов Френелевского преломления от угла луча с нормалью в точке преломления. Большая кривизна поверхностей изделий микрооптики приводит к сильному проявлению ложного двулучепреломления, в виде темного "мальтийского креста" в поле зрения. Гашение света происходит не по всему полю, а внутри этого креста, направление которого совпадает с направлениями пропускания скрещенных поляризатора и анализатора.
На рис. 24. 3 представлено теоретическое светораспределение в

а б

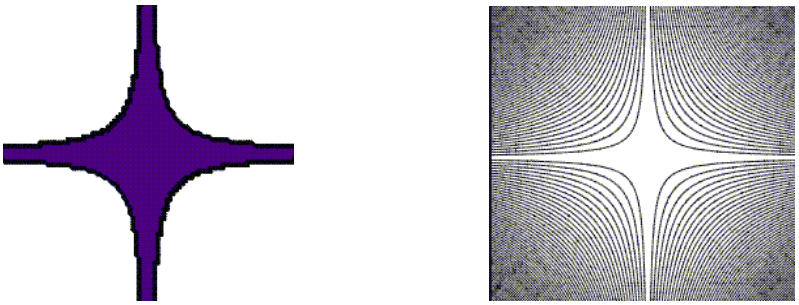


Рис. 24. 3

выходном зрачке микрообъектива при скрещенных поляризаторе и анализаторе.

На рис. 24. 4 приведены телевизионные изображения свето-распределения в выходном зрачке микрообъектива ахромата ОМ-10П при скрещенных поляризаторе и анализаторе (рис. 24. 4 а) и малом развороте

анализатора относительно скрещенного положения вправо (рис. 24. 4 б) и влево (рис. 24. 4 в).

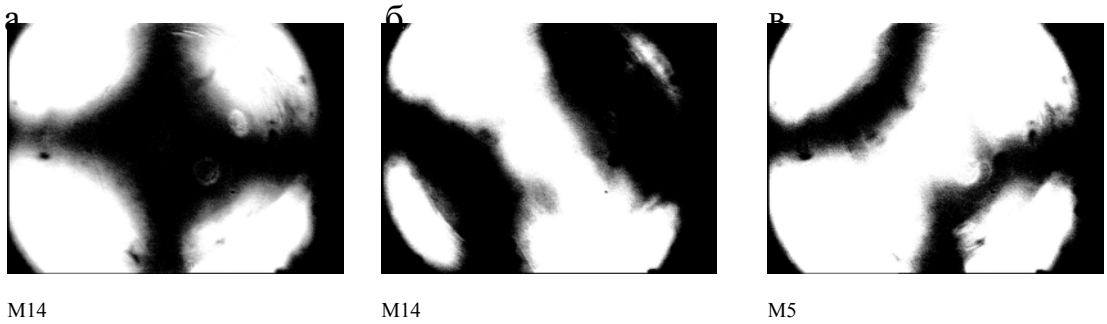


Рис. 24.4

Имеющиеся в изделии двулучепреломляющие участки, возникающие из-за напряжений в материале, проявляют свойства одноосных кристаллов и могут быть визуализированы на темном поле в виде просветленных участков. Так как в нашем случае гашение имеет место внутри креста, то контролер вынужден крутить деталь вокруг оси, чтобы просмотреть все поле, но при этом оси указанных одноосных кристаллов разворачиваются и могут быть развернуты так, что на темном поле просветления не дадут. Появляется возможность пропустить не годную деталь. Избежать такой ситуации возможно при изменении режима работы микроскопа – в нем должна быть реализована схема кругового поляриметра, в которой избранных направлений не будет и, следовательно, не будет "мальтийского креста". Для реализации такого режима в оптическую схему поляризационного микроскопа должны быть введены две четвертьволновые пластинки с взаимно перпендикулярными осями, которые в свою очередь относительно направлений пропускания поляризатора и анализатора должны быть развернуты на угол 45°.

Контроль качества микрооптики должен включать в себя контроль качества изображения в микроскопе при всех режимах – при светлопольном и темнопольном освещении, в поляризованном свете, свете люминесценции, качества изображения даваемого микрообъективом, его центрировку, контроль качества сборки, например, контроль параллельности осей трубок бинокулярной насадки и пр. При этом следует разделять методы контроля в зависимости от стадии изготовления, например, при сборке объектива сборщик должен иметь простую и наглядную методику контроля. На этой стадии контроль ведется по дифракционному изображению точки или изображению шпальной миры на оптической скамье, тест-объекту типа "звездное небо" или "рвань" и, например, в микроскопии по естественным объектам типа диатомовой водоросли. На этом этапе количественной оценки не делается, но обеспечивается необходимая оперативность контрольных операций, выполняемых в процессе сборки.

Тест-объекты типа "звездное небо" и "рвань" для собственных производственных нужд изготавливаются на ОАО "ЛОМО" и так же

подвергаются контролю и аттестации. На рис. 24.5 приведено изображение

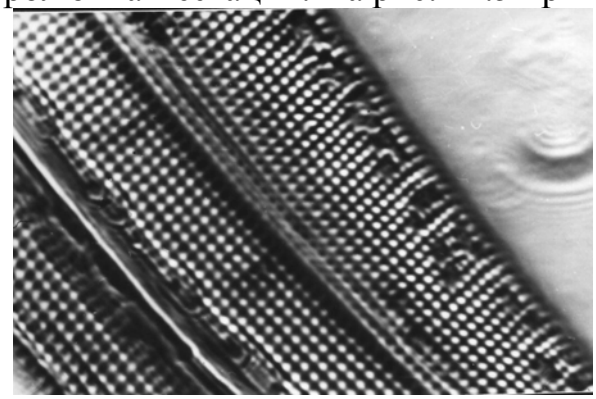


Рис. 24.5

фрагмента диатомовой водоросли при работе с иммерсионным микрообъективом 100х1,3, полученное на микроскопе МБИ-15.

На рис. 24. 6 приведены два изображения одного и того же тест-объекта типа "звездное небо", расфокусированных в разные стороны относительно плоскости объекта, по характеру светораспределения в дифракционном изображении точки, в роли которой выступают микроотверстия в отражательном серебряном покрытии, по окраске дифракционных колец и их форме судят о качестве изготовления микрообъектива.

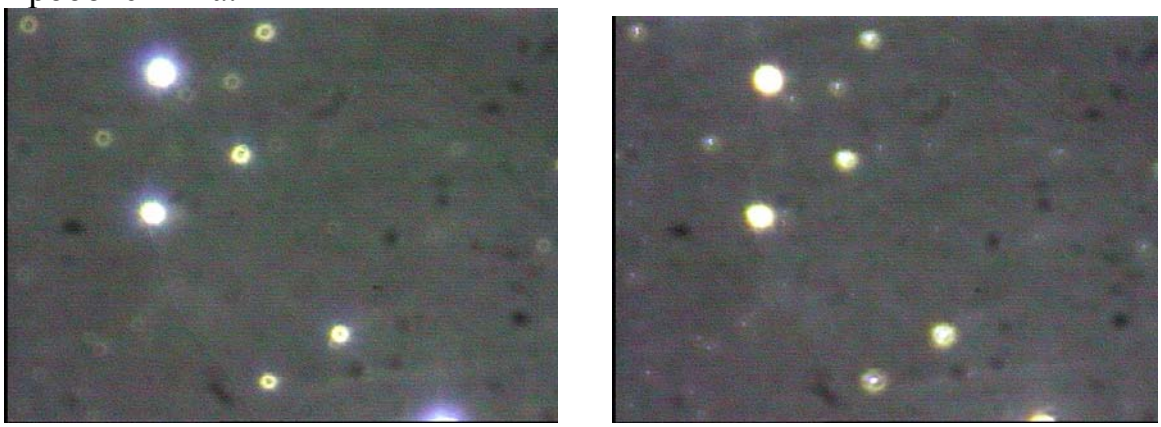


Рис. 24.6

На рис. 24.7 представлены изображения тест-объекта типа "рвань", полученные на микроскопе "Полам – 312Р" с микрообъективом ахроматом ОМ – 13П 9×0,2 при темнопольном освещении (рис. 24. 7 а) и с микрообъективом ахроматом ОМ–9П 40×0,65 при светлопольном освещении. Оба изображения получены в проходящем свете (рис. 24. 7 б).

Тест-объект "рвань" представляет систему параллельных полос на серебряном слое с сугубо не ровными краями, "шаг" неровностей должен хаотически изменяться в пределах значений величин, определяемых разрешающей способностью контролируемого объектива 0,2-0,5 мкм. По расфокусировке по полю изображения не ровного края полосы судят о степени коррекции аберраций микрообъектива.

При аттестации такого тест-объекта можно выполнить серию замеров по полю тест-объекта, например, с помощью окуляр-микрометра МОВ - 1-

16^{x}, имеющего цену деления неподвижной шкалы 1 мм и 0,01 мм шкалы барабана винтового механизма. Это достаточно трудоемкий процесс.

а б

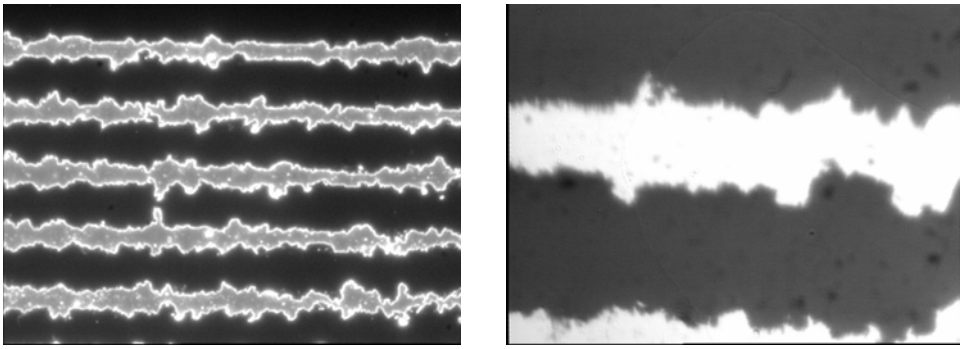


Рис. 24.7

Упростить процесс аттестации и повысить точность контроля "шага" "рвани" можно при работе с его телевизионным изображением, полученным с помощью телекамеры с ПЗС-матрицей. ПЗС-матрица имеет шаг в два и более раз меньший 0,01 мм. Изображение целесообразно брать при темнопольном освещении с последующей его бинаризацией. На рис. 24. 8 (а) приведено такое изображение фрагмента тест-объекта. Это изображение может быть подвергнуто математической обработке на компьютере с выдачей протокола измерений, а как более зримо можно наложить на исходное изображение объект-микрометра (рис. 24.8 б) или наложить на исходное изображение программно-измерительную сетку.

а б

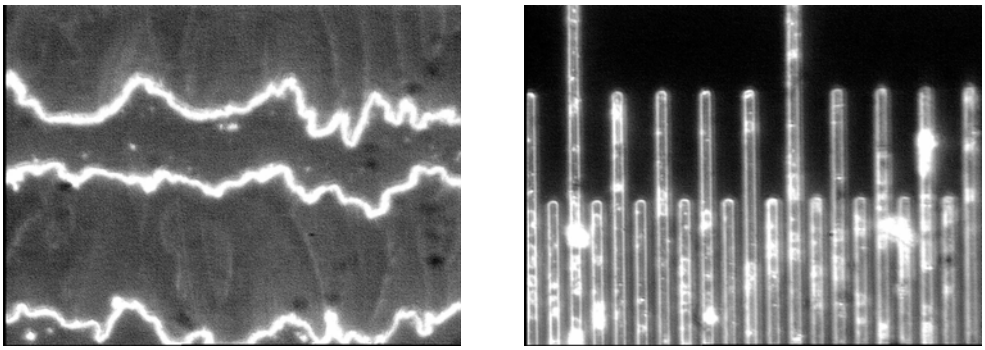


Рис. 24. 8

Перечисленные методы количественной оценки как качества изображения, так и качества изготовления изделия дать не могут, носят субъективный характер. Для количественной оценки необходимы методы, например, интерферометрические, позволяющие оценить отклонение реального волнового фронта от опорного и из этой оценки получить дополнительную информацию, например, о числе Штреля и пр.

25. КОНТРОЛЬ МИКРООПТИКИ ПО ПОГРАНИЧНОЙ КРИВОЙ.

Метод определения функции передачи контраста в изображении шпальной миры по пограничной (градиентной) кривой основан на способе описанным в трудах профессора Русинова М.М. Суть способа заключается в сдвиге градиентной кривой на ширину шпалы, ″а″ миры Фуко. Меняя

значения величины сдвига, можно, не имея реальных шпальных мир, построить их изображения с последующим вычислением контраста в их изображении и построением кривой, определяющей передачу контраста в полосе частот в соответствии с шагом указанных мир. Этот метод по сравнению с использованием дифракционных изображений точки (ФРТ) или линии (ФРЛ) с энергетической точки зрения более выгоден. Энергетическое преимущество позволяет в телеканале иметь более высокое отношение сигнал/шум и, следовательно, обеспечивает более высокие метрологические характеристики, кроме того, ″точка″ и ″линия″ на тест-объекте должны иметь такой размер, чтобы дифрагирующие на них пучки полностью заполняли апертуру испытуемой системы. Такой проблемы нет при использовании полуплоскости.

Схема измерения. ИС – источник света, К – конденсор, О – объект, ПИ – плоскость изображения объекта, М – вспомогательный микроскоп, ТК – телекамера. Исследование системы проводилось на установке, представленной на рис. 25.1.

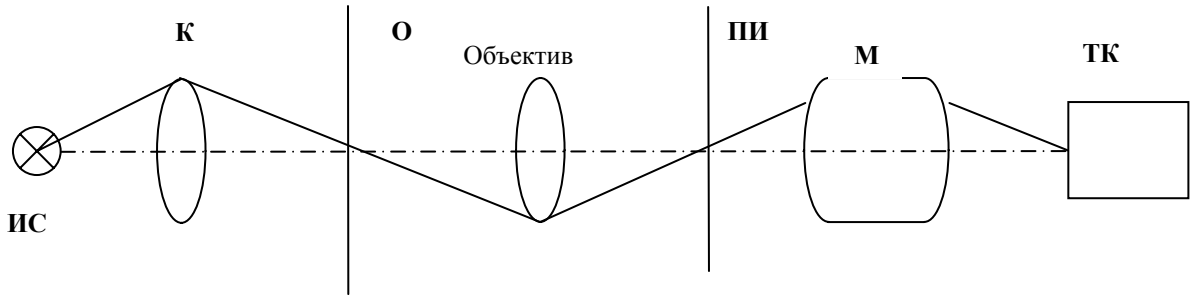


Рис. 25.1

Установка включала в себя осветительное устройство (источник света - лампа накаливания), испытуемый объектив и дополнительный микроскоп для передачи изображения края полуплоскости (нож спектральной щели) в плоскость матрицы телекамеры VNC-743.

При выборе характеристик дополнительного микроскопа: его увеличения β_1 и передней апертуры $A_в$ следует руководствоваться тем, чтобы его участие в схеме не отразилось на результатах измерения. Для реализации этого условия воспользуемся таблицами Л.Джонса, согласно которым для уверенного восприятия структуры изображения телевизионного канала, на минимальный элемент указанной структуры должно приходиться 12 ÷ 15 телевизионных линий или пикселов. В нашем случае минимальным элементом структуры является расстояние между двумя дифракционными максимумами ФРЛ - $\Delta\rho$, значение величины которого в нашем случае определится как одна оптическая единица, равная $\lambda/2A'$. В итоге для вычисления значения задней апертуры измерительной установки A_y' мы будем иметь формулу

$$A_y' = \frac{\lambda}{30\delta} \qquad (25.1)$$

где λ- длина волны, δ - ширина телевизионной линии или размер пиксела.

Общее увеличение β всей установки определяется по формуле $\beta=\beta_и\,\beta_в$, где $\beta_и$ – увеличение испытуемой системы. Одновременно для β - справедлива формула $\beta=A/A'$, где A – передняя апертура испытуемой системы, откуда, если принять λ=600нм, δ=6мкм получим, что $\beta=300A$. Для определения значения передней апертуры вспомогательного микроскопа введем условие, что его действия не должно изменять значение модуляционной передаточной функции (МПФ) испытуемой системы **T** более чем на **ΔT**, например на 5%. Для **ΔT** можем написать

$$\Delta T=\frac{T_и-T_и T_в}{T_и}=1-T_в \qquad (25.2)$$

где $T_и$, $T_В$ – МПФ испытуемой системы и вспомогательного микроскопа.

Примем для $T_В$ треугольную аппроксимацию, тогда

$$T_в=1-\frac{|N|}{N_0} \qquad (25.3)$$

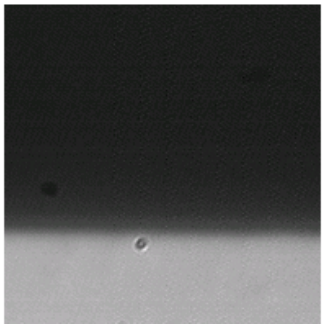
откуда

$$\Delta T=\frac{|N|}{N_0}, \qquad (25.4)$$

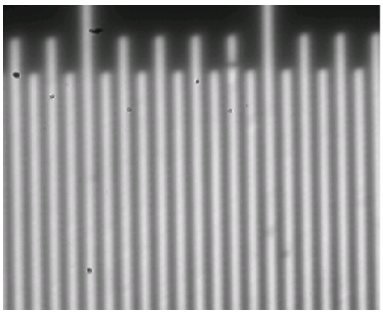
где N, N_0 – пространственная частота и предельная пространственная частота.

Например, для объектива $\beta_и$=5, A=0,1 получим значение β=30, $\beta_В$=6, $A_В$=0,4, $A_В'$ = 0,083, где $A_В$ и $A_В'$ апертуры вспомогательного микрообъектива.

На рис. 25. 2 (а) приведен фрагмент изображения полуплоскости и на рис. 25. 2 (б) изображение тест-объекта, необходимого для определения цены деления, контроля увеличения и других характеристик измеряемой установки.



а) Изображение края полуплоскости



б) Изображения тест объекта (цена деления 5мкм).

Рис. 25.2

На рис. 25. 3 проиллюстрирована реализация способа, описанного профессором Русиновым М.М., построения изображения шпальной миры

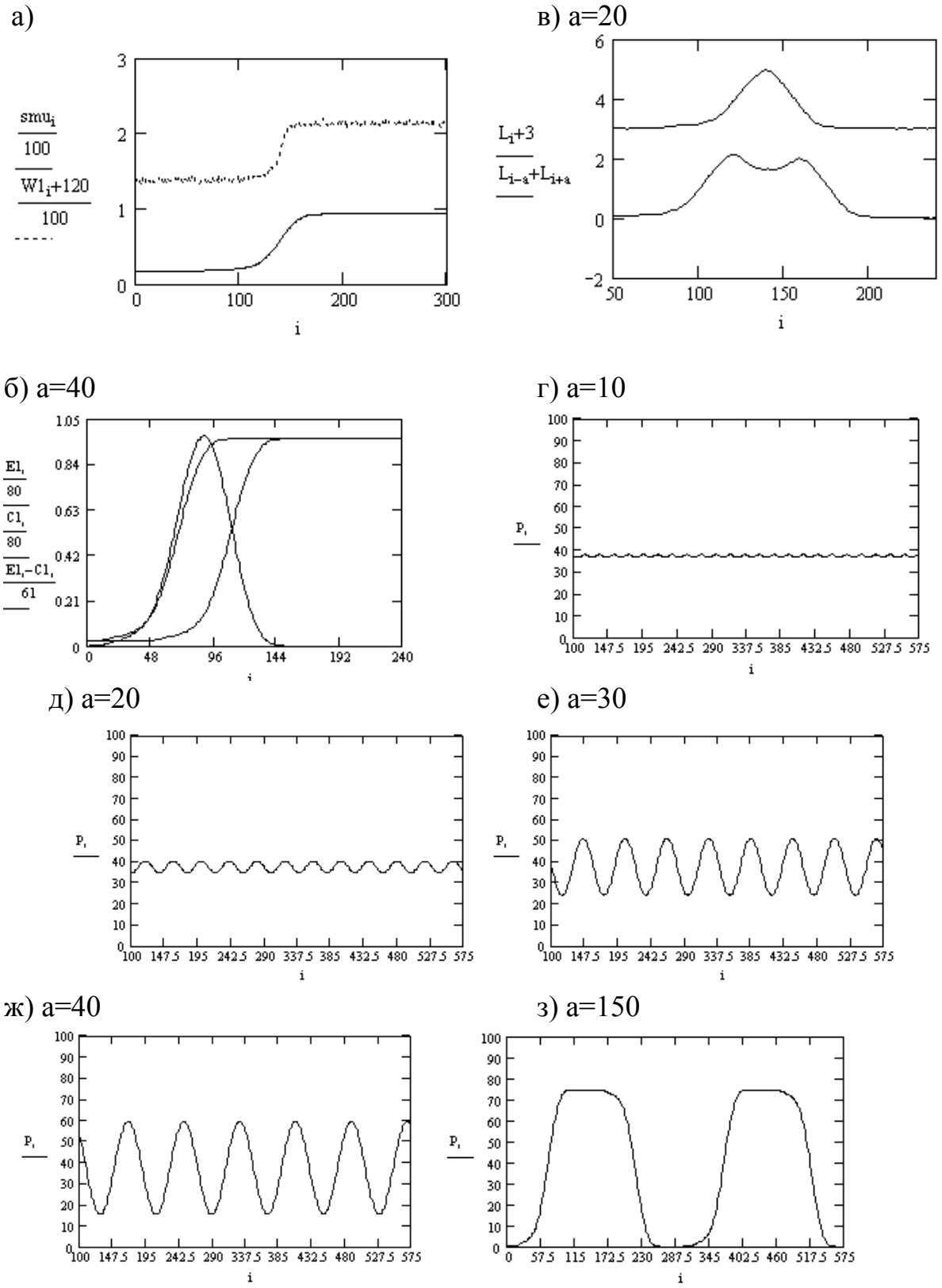


Рис. 25.3

по пограничной кривой. На рис. 25. 3 (а) приведены две пограничные кривые, полученные фотометрированием телевизионного изображения края полуплоскости по рис. 25. 2 (а). Кривая 1 является результатом прямого фотометрирования, а кривая 2 – является результатом сглаживания шумовой компоненты кривой 1. На рис. 25. 3 (б) приведены две сглаженные градиентные кривые 1 и 2 сдвинутые друг относительно

друга на величину ширины шпалы а, а также приведена кривая 3, определяемая разностью указанных кривых 1 и 2 и дающая изображение шпалы шириной ***a***. Для того, чтобы определить минимальную ширину сдвига 1 и 2 было выполнено дифференцирование функции ***y(x)*** определяющей ход пограничной кривой. Результат дифференцирования дает функцию рассеяния линии (ФРЛ) ***h(x),*** т.е.:

$$h(x)=\frac{dy(x)}{d(x)} \qquad (25.5)$$

На рис. 25. 3 (в) кривая 1 описывает ФРЛ ***h*(*x*)**. Для определения минимального сдвига кривых было получено суммарное изображение двух сдвинутых ФРЛ – кривая 2 на рис. 25. 3 (в). При этом использовалась формула для вычисления суммарного светораспределения в изображениях двух сдвинутых ФРЛ

$$f(x)=h^2(x+\Delta)+h^2(x-\Delta)+2\cdot|\mu|\sqrt{h(x+\Delta)\cdot h(x-\Delta)} \qquad (25.6)$$

где Δ - величина сдвига ФРЛ от нулевого положения, μ - степень когерентности освещения объекта, которая определяется нормированным спектром Фурье распределения интенсивности в зрачке испытуемой системы.

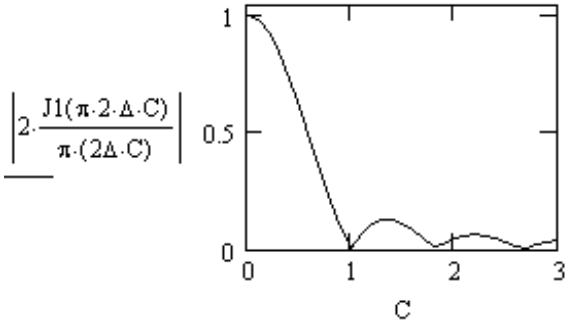


Рис. 25.4

Для круглой равномерно освещенной апертуры значение μ определится по формуле

$$|\mu|=\left|2\frac{J1(\pi 2\Delta C)}{\pi 2\Delta C}\right|, \qquad (25.7)$$

где $C=A_0/A$ – множитель некогерентности Д.С. Рождественского, A_0 – апертура конденсора.

При настройке измерительной установки апертура освещающих пучков и апертура испытуемой системы в пространстве объекта A_o и A выбирались одинаковыми, что приводит к тому, что значение величины $|\mu|$ для минимального сдвига градиентных кривых будет принимать нулевое значение или близкое к нему. Это позволяет нам третьим слагаемым в формуле (25.6) пренебречь и ограничиться при определении ***f*(*x*)** сложением реально полученных телевизионным способом сигналов, определяющих интенсивность изображения.

Задаваясь некоторым провалом в светораспределении ***f*(*x*)** руководствуясь каким-либо критерием, мы определяем минимальное

значение сдвига **Δ,** который в свою очередь определяет величину сдвига двух градиентных кривых по рис. 25.3 (в).

Предельная пространственная частота ***N*=1/*b*** (***b*=2Δ** - шаг миры) определялся автоматически по суммарному светораспределению в

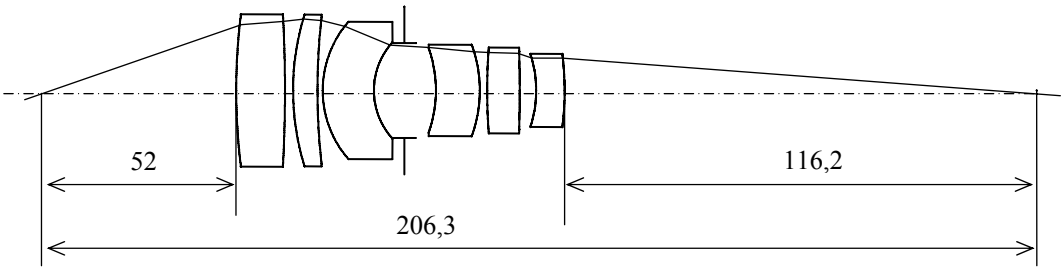


Рис. 25.5

изображении двух ФРЛ (рис. 25. 3 б) при задании значения величины провала в этом светораспределении. Если мы работаем, используя критерий Вадсворта, то указанный провал составит 0,19 в относительных единицах. Укажем, что имеются и другие критерии разрешения для тест–объектов в виде двух линий, например, Классена (провал 0,05), Спарроу-Мурашкинского (провал 0,00).

После определения предельной пространственной частоты весь частотный интервал делится на несколько интервалов, для которых мы можем вычислить светораспределение изображения шпальной миры, имеющей шаг в соответствии с пространственной частотой этого интервала, а именно: **1/*b*, 1/2*b*, 1/3*b*** и т.д., до нулевой частоты (10 точек).

На рис. 25. 3 (г, д, е, ж, з) приведены кривые светораспределения в изображениях шпальной миры: для предельной пространственной частоты - (г), для частоты вдвое меньше предельной - (д), втрое меньше предельной - (е), вчетверо и в пятнадцать раз меньше предельной - (ж), (з). Отметим, что только на рис. 25. 3 (з) в изображении имеет место несинусоидальный характер светораспределения, а изображение уже стало похоже на объект. Имея серию таких кривых, можно вычислить контраст ***K*** и построить МПФ испытуемой системы. Для вычисления ***K*** справедлива формула:

$$K = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} \qquad (25.8)$$

При экспериментальной проверке описанной методики использовались микрообъективы и объективы телевизионных камер, работающих с конечного расстояния на конечное. В качестве примера рассмотрим результаты контроля качества изображения объектива телекамеры, имеющего увеличение $\beta_и$=-4х и переднюю апертуру ***A***=0.3.

На рис. 25. 5 представлена его оптическая схема.

На рис. 25. 6 приведены теоретические кривые, полученные в результате расчета по программе OPAL, и экспериментальные кривые: пограничные кривые (а), (б), функция рассеяния линии (в), (г) и светораспределение в изображении двух линий, рассчитанных по формуле

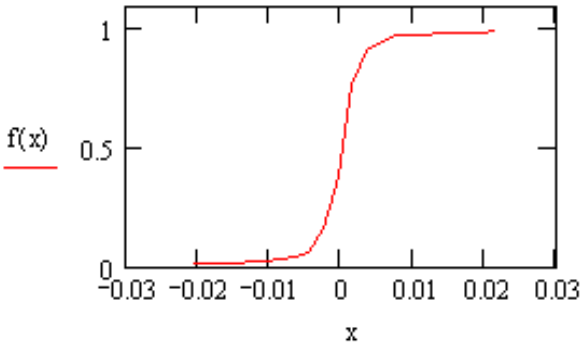
25.6. Для сравнения кривых на рис. 25. 6 (ж, з), и приведены теоретические и экспериментальные кривые, наложенные друг на друга. Кривые с достаточной степенью точностью идентичны, что позволяет судить о верности описываемой методики.

Несовпадение кривых, например сдвиг их друг относительно друга может быть критерием качества не только изображения, но и качества изготовления изделия. Пограничная кривая использовалась нами при оценке качества сборки бинокуляров и тринокуляров микроскопа.

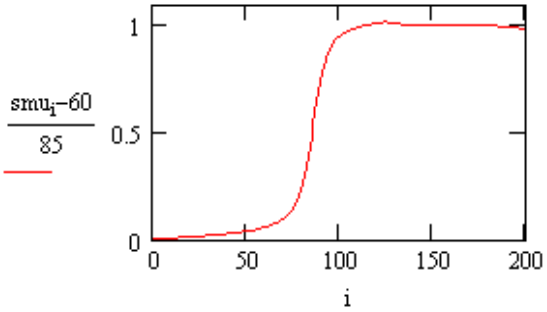
Расчетные кривые

Экспериментальные кривые

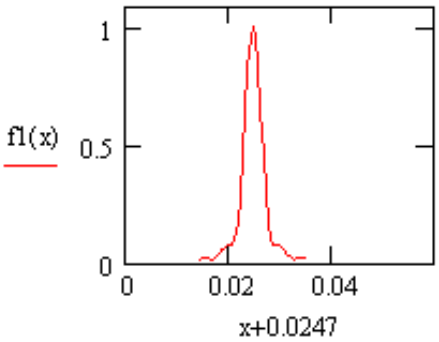
а)



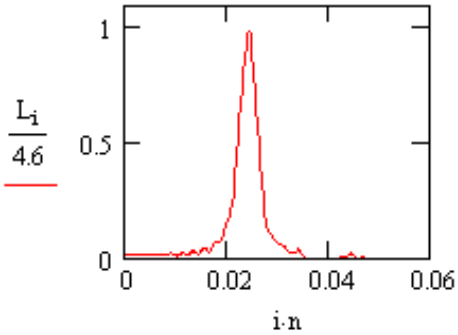
б)



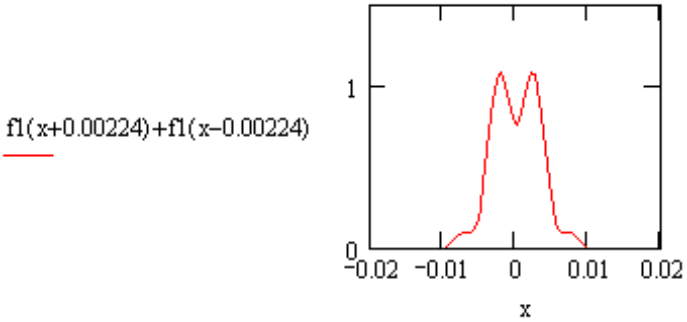
в)



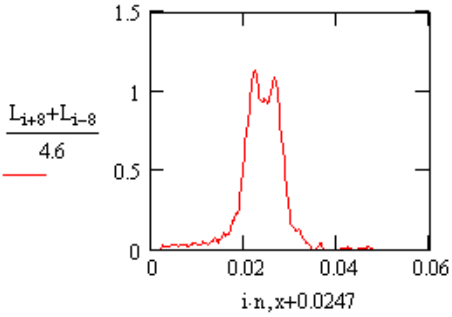
г)



д)



е)



ж) з) и)

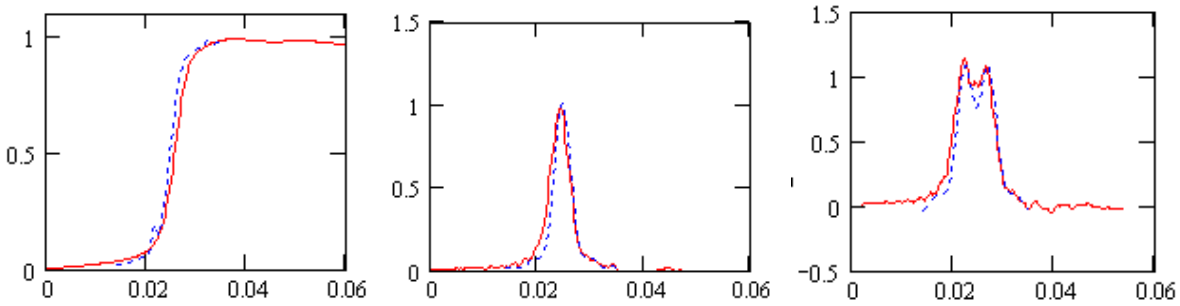
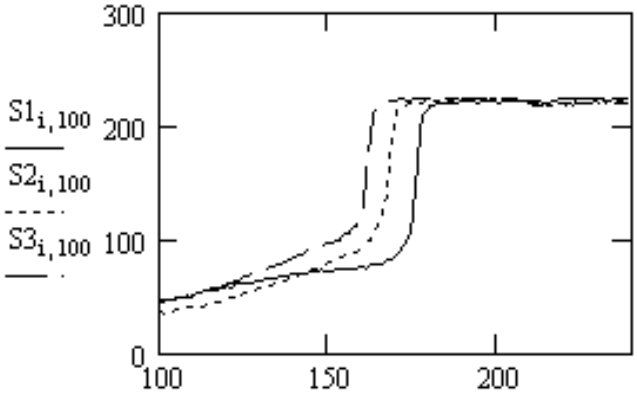


Рис. 25.6

На рис. 25. 7 приведены пограничные кривые для тринокуляра микроскопа серии 402 и бинокуляров двух китайских микроскопов серии 136 (б, в) и микроскопов ПОЛАМ–312Р (г). Кривые по рис. 25. 7 (б), в практически наложены друг на друга, что говорит о хорошей сборке бинокуляра, а кривые по рис. 25. 7 (г) сдвинуты друг относительно друга и величина этого сдвига может быть мерой качества сборки, что также относится и к сдвинутым кривым по рис. 25. 7 (а).

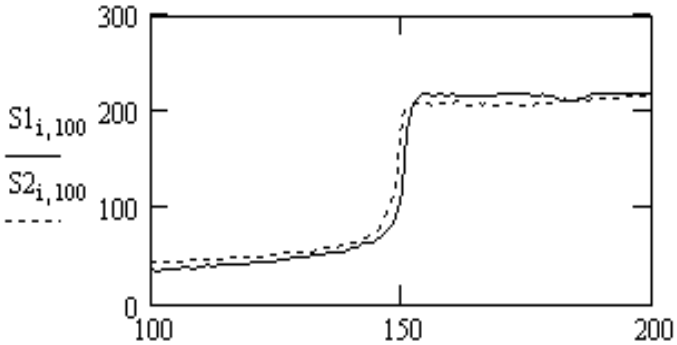
Китай-402, объектив 40×0,65, S1 - правый канал, S2 - левый канал, S3 – телеканал

а)



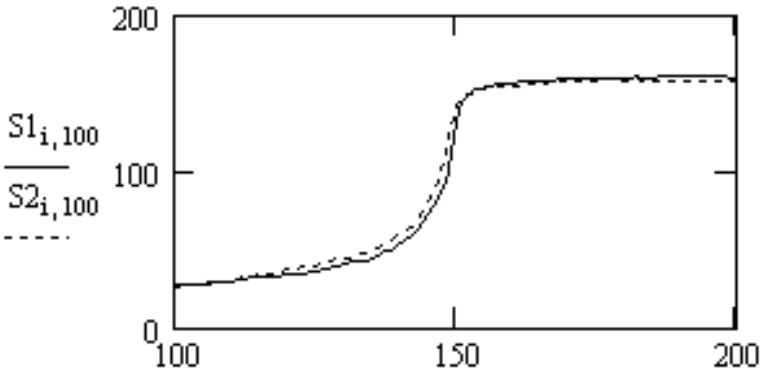
Китай – 136, объектив 40×0,65 , S1 - правый канал, S2 - левый канал

б)



Китай – 136, объектив 40×0,65 , S1 - правый канал, S2 - левый канал

в)



Микроскоп – ПОЛАМ Р-312, объектив 21×40, 190-П (СКБ №017-17)
S1 - правый канал, S2 - левый канал

г)

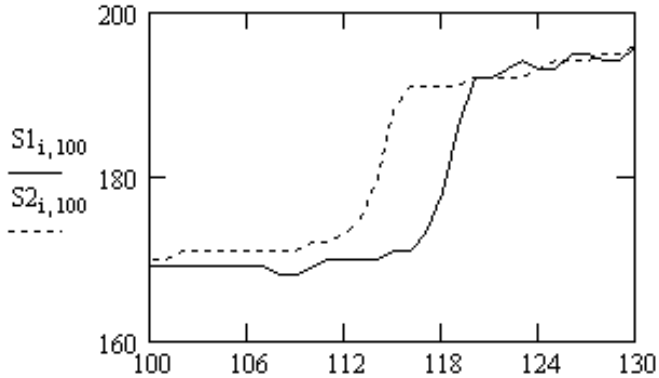


Рис. 25.7

Приведенные кривые были получены с использованием адаптера АОТ-1С, который последовательно вставлялся в левый и правый канал бинокуляра или в телеканал. При развороте адаптера вокруг своей оси могут быть получены пограничные кривые, например, для двух взаимно перпендикулярных направлений и тогда появляется возможность оценивать пространственное смещение осей трубок бинокуляра.

26. ОСОБЕННОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА.

Связь между яркостью объекта $\boldsymbol{B}$ и его изображения $\boldsymbol{B}'$ устанавливается законом Кирхгофа

$$\boldsymbol{B}' = \tau\left(\frac{\boldsymbol{n}}{\boldsymbol{n}'}\right)^2 \boldsymbol{B}, \qquad (26.1)$$

где $\boldsymbol{\tau}$ – коэффициент пропускания оптической системы, $\boldsymbol{n}, \boldsymbol{n}'$ – показатели преломления сред в пространстве объектов и изображений.

Закон справедлив для визуальных систем при отсутствии в них рассеивателей. Если таковой имеется, например, матовый экран, на который проецируется изображение, как это имеет место в проекционных установках, то

$$\boldsymbol{B}' = \frac{\rho \boldsymbol{E}}{\pi}, \qquad (26.2)$$

где **ρ** – коэффициент диффузного рассеяния экрана, ***E*** – освещенность на экране. Освещенность элементарной площадки на изображении ***ds***', сопряженной с элементарной площадкой на объекте ds, определится по формуле:

$$E = \tau\pi B\left(\frac{ds}{ds'}\right)\left(\frac{n'}{n}\right)^2 Sin^2\sigma .$$

Для "площадного" объекта имеем
ds'/***ds*** = β^2, где **β** – линейное увеличение в сопряженных плоскостях. И далее с учетом закона синусов получим:

$$E = \tau\pi B\left(\frac{n'}{n}\right)^2 \frac{Sin^2\sigma'}{\beta^2} \quad \text{или} \quad E = \tau\pi B\left(\frac{n'}{n}\right)^2 Sin^2\sigma . \qquad (26.3)$$

Если объект тонкая линия, то ***ds'/ds*** = **β** и для расчета освещенности будем иметь формулу:

$$E = \tau\pi B\left(\frac{n'}{n}\right)^2 \frac{Sin^2\sigma'}{\beta} \quad \text{или} \quad E = \tau\pi B\beta\left(\frac{n'}{n}\right)^2 Sin^2\sigma . \qquad (26.4)$$

В случае точечного объекта – звезда ***ds'/ds*** = 1 и в итоге получаем расчетную формулу

$$E = \tau\pi B\beta^2\left(\frac{n'}{n}\right)^2 Sin^2\sigma . \qquad (26.5)$$

Рассмотрим частный случай площадного объекта – полуплоскость (половина поля белая половина черная). На рис. 26.1 приведено светораспределение в ее изображении ***E(x).***

Там же приведена функция рассеяния линии ***h(x)***, свертка с которой идеального изображения края полуплоскости и дает светораспределение ***E(x).*** При фотометрировании этого изображения получим временную зависимость тока i(t), который связан с интегральной чувствительностью детектора ***S*** и падающим на него световым потоком ***F*** простым выражением:

$$i = SF. \qquad (26.6)$$

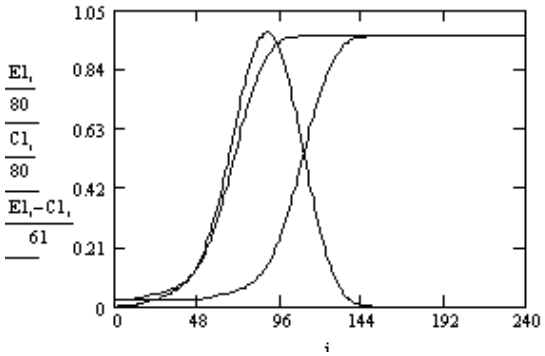


Рис. 26.1

Если детектор твердотельная телекамера, то для потока имеем

$$F = E_0 S_p, \qquad (26.7)$$

где E_0 – освещенность на матрице, S_p – площадь пикселя. .

Площадь под кривой ***i(t)*** определит световой поток $\boldsymbol{F_и}$, падающий на отдельную строку (столбец) матрицы, умноженный на ***S***.

Для $\boldsymbol{F_и}$ будет так же справедлива формула:

$$\boldsymbol{F_и = FN},$$

где ***N*** число пикселей в строке (столбце).

В (7) $\boldsymbol{E_0}$ определяет значение освещенности в центре поля зрения, поэтому для внеосевых точек поля зрения применяется другая формула:

$$\boldsymbol{E = E_0 Cos^4 wK}\ , \qquad (26.8)$$

где ***w*** – угол поля зрения, ***K*** – коэффициент, учитывающий виньетирование.

В общем случае ***S*** и ***F*** зависят от длины волны падающего излучения λ, поэтому в случае сложного спектрального состава излучения правая часть (6) должна быть проинтегрирована по длине волны.

$$\boldsymbol{i = \int S(\lambda) F(\lambda) d\lambda} \qquad (26.9)$$

При разработке оптической системы прибора важной характеристикой качества изображения является радиус кружка рассеяния, являющимся геометрическим параметром. Если в геометрической теории аберраций этот радиус имеет конечный размер, то в дифракционной теории аберраций этот размер может быть определен бесконечно большим значением. Естественно, что с такими значениями иметь дело на практике неудобно, поэтому принято определять это значение по какому то уровню энергии. Например, в лазерной технике принято определять размер лазерного пучка по уровню энергии 0,5 или $\boldsymbol{e^2}$, в спектроскопии при определении ширины спектра излучения используется понятие полуширина спектральной линии, что соответствует уровню энергии 0,5 и т.д. Отсюда появляется необходимость определения энергетического содержания по указанным уровням энергии, появляется понятие функции концентрации энергии (ФКЭ), под которой понимается значение интеграла следующего вида

$$\boldsymbol{ФКЭ = E_0 \cdot к \cdot \iint h^2(x,y) dxdy} \qquad (26.10)$$

где $\boldsymbol{E_0}$ и к некоторые масштабные коэффициенты, $\boldsymbol{h^2(x,y)}$ функция, например, ФРТ, энергетическое содержание которой определяется в некоторой области ее существования ***s(x,y)***, по которой и проводится интегрирование. Если оптическая система обладает осевой симметрией, то используются полярные координаты и для идеальной оптической системы ФКЭ может быть определено по формуле Рэлея

$$\boldsymbol{ФКЭ = 1 - J_0^2(kaw_0) - J_1^2(kaw_0),} \qquad (26.11)$$

где $\boldsymbol{J_0}$( ) и $\boldsymbol{J_1}$( ) – функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков, $\boldsymbol{k = 2\pi/\lambda}$– волновое число, **a** – радиус зрачка оптической системы, $\boldsymbol{w_0}$ – радиус области, по которой ведется интегрирование.

ФКЭ это число, но довольно часто при расчетах приводят функцию ФКЭ($\boldsymbol{w_0}$), что позволяет разработчику определиться с окончательным значением w_0, определяющим эффективный размер пятна рассеяния, по

которому можно определить разрешающую способность системы. На рис. 26.2 приведен график зависимости ФКЭ от w_0.

При объекте в виде точечного источника и его регистрации с помощью твердотельной телекамеры область интегрирования в (25.10) $s(x,y)$ может определяться размером пикселя ПЗС матрицы. В этом случае ФКЭ легко увязывается с другой энергетической характеристикой – отношение сигнал/шум Ψ, определяемым по формуле:

$$\Psi = 20 \cdot log(E/E_{min}), \qquad (26.12)$$

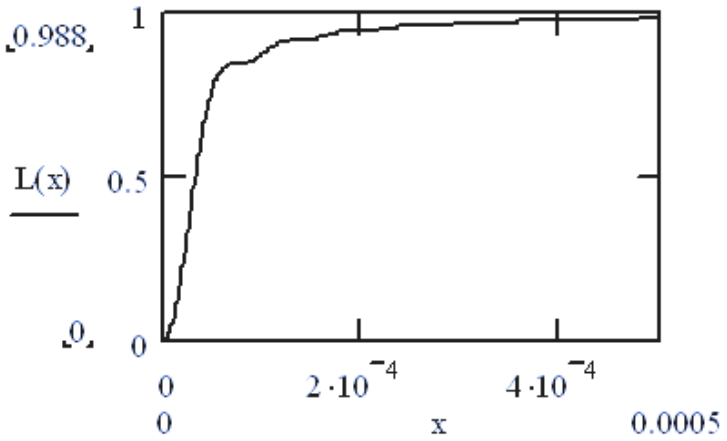


Рис. 26.2

где значение величины E может быть определено из (10), а E_{min} определится шумами матрицы. Тогда можем написать

$$\Psi = 20 \cdot log(E_0 \cdot \kappa \cdot \iint h^2(x,y)dxdy/E_{min}), \qquad (26.13)$$

где для E_{min} может быть применена формула

$$E_{min} = Kn_ш q\Psi/CS \qquad (26.14)$$

K – коэффициент передачи, $n_ш$ – шум ПЗС, q – заряд электрона, Ψ – паспортное отношение сигнал/шум, C – емкость выходного устройства, S – интегральная чувствительность.

Значение E_{min} может быть получено так же из паспортных характеристик телекамеры, где указывается минимальное значение падающего светового потока с использованием формул (26.6) и (26.7), значение E_0 вычисляется с использованием формулы (26.5).

27. СВЕТ И ЦВЕТ В МИКРОСКОПИИ.

Начнем с простого примера, связанного со значением освещенности E в плоскости микрообъекта, которое вычисляется по формуле: $E=\tau\pi B(Sin\sigma')^2$, где τ - коэффициент пропускания, B - яркость источника света, σ'- задний апертурный угол конденсора. Для простоты возьмем не самый выгодный для нас случай $\tau\pi=1$, тогда $E = B(Sin\sigma')^2$. Примем интервал значений для $Sin\sigma'$ от 0,05 до 0,9 (работа с сухими микрообъективами), а значение яркости B определим для "усредненной" галогенной лампы через коэффициент светоотдачи z = 25лм/Вт чему будет соответствовать значение яркости $B=10^7$нт. Тогда для освещенности E получим интервал значений от $5 \cdot 10^3$ лк до $8{,}1 \cdot 10^5$ лк. Напомним, что на

рабочем столе необходимая освещенность составляет 100-200 лк, на киноэкране 200 лк. Много это или мало?

Для операционных медицинских светильников важной характеристикой является отношение энергия (***P***)/свет (***F***)[Вт/Клм]. Это величина обратная коэффициенту светоотдачи и может быть вычислена по формуле:

$$\frac{P}{F}=\frac{\int S(\lambda)d\lambda}{683\int K(\lambda)S(\lambda)d\lambda}$$

где $S(\lambda)$ – спектральная плотность освещающего излучения, К(λ) – относительная видность, λ – длина волны излучения. Интегрирование ведется в пределах рабочего спектрального интервала ($\lambda_1 - \lambda_2$). Интервал значений длин волн обычно берется от 400 нм до 700 нм. Отметим, что в операционных светильниках ИК составляющая спектра излучения отсекается фильтрами. Было определено, что для медицинских светильников целесообразно, чтобы значение отношения энергия/свет лежало в интервале от 3,5 до 4,1. Выбор связан с минимизацией нагрева живой ткани в операционном поле. Этим значениям указанного отношения соответствуют лампы накаливания при цветовой температуре от 2500^0К до 3200^0К, т.е. обычные и галогенные. Для микроскопии подобные исследования не проводились, но приведенные результаты будут справедливы и здесь при установке в схеме освещения теплофильтра (фильтр типа СЗС) или переходе на светодиодные источники света, у которых ИК составляющая в спектре излучения отсутствует, что будет препятствовать быстрому выцветанию (и даже гибели) микрообъектов.

При переходе на светодиодные источники света неизбежно (помимо прочего) проявление явления метамерии, суть которого в том, что два или более объекта при одном источнике света имеют одинаковый цвет, а при другом разные цвета.

Например, при освещении "зеленым" светом элементы объекта красного и синего цвета будут казаться черными. При освещении объектов дневным (холодным) светом разница между ними обычно мала, а при освещении светом (теплый) лампы накаливания ($T=2856^0$ К) эта разница усиливается и довольно резко.

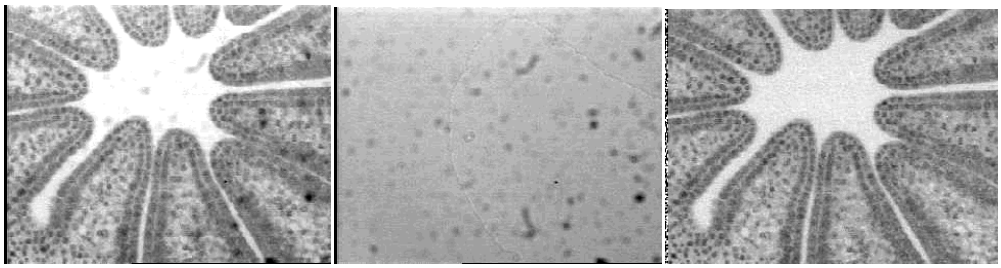
Вернемся к (помимо прочего). При проведении медико-биологических исследований с помощью микроскопа для контрастирования изображения широко используются методы окрашивания, разработанные с учетом того, что микрообъект освещается лампой накаливания. Этого как и явление метамерии мы отменить не сможем пока не предложим альтернативные решения. И они уже есть в медицинской практике, где используются компьютеризированные микроскопы, которые позволяют, используя методы цифровой обработки, контрастируют изображение весьма разнообразными методами (в том числе используя "ложные цвета"). И это важно, т.к. при окрашивании живое в объекте погибает.

Относительно явления метамерии следует сказать, что оно определяется не сколько самим объектом, сколько внешними факторами, поэтому, исключив их воздействие, можно получить факсимильное изображение объекта. Как это сделать? Рассмотрим эскиз решения.

Сигнал i с отдельного пикселя ПЗС (КМОП) матрицы может быть описан формулой: $i_1 = \int S(\lambda)\tau(\lambda)F(\lambda)d\lambda$, где $S(\lambda)$ – спектральная характеристика оптического канала, включая детектор – пиксел, $\tau(\lambda)$ – спектральное пропускание (отражение) объекта, F(λ) – спектр излучения источника света.

Интегрирование ведется в пределах рабочего спектрального интервала (λ_1–λ_2). Множество сигналов i_1 определяет массив электронного изображения, которое после квантования можно называть цифровым. При отсутствии в ходе лучей объекта для сигнала с пикселя будем иметь $i_2 = \int S(\lambda)F(\lambda)d\lambda$.

Если бы объект не обладал селективными свойствами, иначе $\tau(\lambda)$ = **const,** то отношение i_1/i_2 дало бы точное значение $\tau(\lambda)$**.** Однако, такого обычно нет, но тем не менее есть основания полагать, что сигнал после деления в большей мере отражает селективные свойства объекта $\tau(\lambda)$ нежели без проведения указанной операции (см. рис.27.1). Эти основания связаны с одной стороны с тем, что функция $\tau(\lambda)$ чаще всего монотонна и в системах RGB или RGG'B делится на три или четыре спектральные части, где монотонность "усиливается". Израильские ученые с целью улучшения цветопередачи предложили шестицветный пиксел, что в еще большей мере делает такую операцию приемлемой (спектрозональный метод). В купе с другими цифровыми развитыми, например, в полиграфии методами цветокоррекции можно получить достойное решение для микроскопии.



M3 M4 M7

Рис. 27.1

M3 – исходное изображение, M4 – фон, M7 – частное от деления M3 на M4.

Различают четыре вида явления метамерии: метаметризм излучения (о нем мы говорили выше), метаметризм наблюдателя, метаметризм углового поля зрения и метаметризм геометрический.

Метаметризм наблюдателя связан со способность разных людей по разному воспринимать цвет, метаметризм углового поля зрения связан с тем, что равенство цветов пропадает когда угол, под которым виден объект, меняется с 2° на 10°. Напомним, что существует две системы основных цветов МКО 1931 г. и 1964 г. Первая оперирует с углом поля зрения 2°, а вторая с углам в10^o.

Геометрический метаметризм связан с геометрией наблюдения, иначе в зависимости от положения наблюдателя зависит и цвет. Это не то же самое, что имеет место при рассматривании изображения под разным ракурсом на экране ЖК-дисплея, хотя похоже. Метаметризм по разному проявляется в разных областях спектра.

Все перечисленные выше проблемы цвета и пр. легко разрешаются при за счет калибровки (МСФУ-К) или использования двухлучевой схемы, одна из которых эталонная. Однако, при этом работа идет не со всем объектом, а с его небольшой зоной. Тем не менее и здесь возможно альтернативное решение задачи правильной цветопередачи в телеизображении.

Отметим еще один момент, связанный с выбором спектральных характеристик компонентов системы. Допустим, что удалось их подобрать такими, что $\boldsymbol{S(\lambda)F(\lambda) = const}$ во всем рабочем спектральном интервале, что позволяет это произведение вынести за знак интегрирования и для отношения $\mathbf{i_1/i_2}$ получим

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{\int \tau(\lambda) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1},$$

иначе отношение и, следовательно, интенсивность электронного изображения определится средним значением $\boldsymbol{\tau(\lambda)}$ на единицу рабочего спектрального интервала. Ниже мы к этой возможности вернемся.

По сравнению со сказанным влияние аберраций оптической системы на цветопередачу на первый взгляд не существенно. В п.11 показано, что даже при отсутствии аберраций за счет дифракции на зрачке происходит нарушение цветопередачи в изображении точки. Следует сказать о сильном влиянии сферической аберрации на отношение сигнал/шум ψ, являющимся важнейшей качественной характеристики любой телевизионной системы.

$$\psi = 20 \cdot log\left(\frac{E}{E_{min}}\right),$$

где $\boldsymbol{E}$ и $\boldsymbol{E_{min}}$ – соответственно освещенность изображения и минимально допустимая освещенность пикселя матрицы.

Легко получить выражение, связывающее $\boldsymbol{\psi}$ с ФРТ (функцией рассеяния точки) оптической системы $\boldsymbol{h(x,y)}$

$$\psi = 20 \cdot log\left(\frac{E_0 K}{E_{min}} \iint h^2(x,y) dxdy\right),$$

где $\boldsymbol{E_0}$ и $\boldsymbol{K}$– масштабные множители.

Выражение, стоящее в числителе, определяет ФКЭ (функцию концентрации энергии), которая всегда вычисляется при расчете оптических систем, что так же относится и к ФРТ.

При ψ меньше 20 Дб (децибел) систему следует признать не удовлетворительной. Обычное значение для ψ телекамеры 50 Дб (не менее 40 Дб).

Отсюда понятна необходимость коррекции не только хроматизма увеличения, на который в последнее время обращено особое внимание, но и хроматизма положения. И главное следует обращать внимание, чтобы числа Штреля для различных спектральных составляющих не сильно различались.

Отметим, что в микроспектрофотометре МСФУ-К значение ψ существенно меняется при сканировании спектра, но за счет калибровки отрицательное влияние этого факта сглаживается.

Относительно аберрации кривизны изображения следует сказать, что микроскописты при разработке объективов типа "план" ее всегда правят и ОАО "ЛОМО" располагает такими объективами, но они были рассчитаны на работу с тубусной линзой 160 мм, поэтому при переходе к тубусной линзе с меньшим фокусным расстоянием растет угол поля зрения в пространстве изображений и комбинация объектив – тубусная линза уже не будет относиться к системам типа "план", для которых волновая аберрация по полю не должна превышать 0,05λ. Здесь возможно несколько решений. В первом следует сохранить фокусное расстояние тубусной линзы равным 160 мм, что потребует перехода на формат матрицы 1 дюйм, во втором, сохранив тубусную линзу, ввести адаптер (их много у ОАО "ЛОМО"), в третьем провести расчет новых микрообъективов с новой тубусной линзой и в четвертом случае воспользоваться таки возможностями цифровой обработки изображений. Суть решения проблемы цифровыми методами заключается в использовании адаптивного кодирования по полю при этом необходимо использовать опцию "четкость (резкость)", "увеличивающуюся" по радиусу от центра поля к краю.

Можно добавить, что хроматизм увеличения и дисторсия правятся цифровыми методами, а также есть сообщение из 70-х годов 20 века об успешном исправлении аберрации комы.

И о главном. На сегодняшний день телевизионное изображение на порядок хуже изображения в визуальном канале, что следует хотя бы из теоремы выборки (Котельникова), согласно которой разрешающая способность оптической системы телеканала должна быть в два раза ниже значения величины $1/\delta$, где δ шаг матрицы телекамеры. . А в соответствии с результатами из разрешение оптической системы зачастую должно быть более, чем в 10 раз "хуже" значения $1/\delta$. Есть мнение, что критерий Найквиста редко выполняется на практике, но это не следует воспринимать буквально. В конце концов, Д.С.Волосов и Н.К.Игнатьев имели в виду систему вещательного телевидения, а не систему

технического зрения. Напомним, что в классической фотографии были режимы художественной и технической съемки. В последней использовалась пленка "Микрат-300" и т.п., в голографической съемке применялись уникальные по разрешению материалы. Основной вклад в ухудшение в качества телевизионного изображения делает не оптическая система, а телекамера.

Обратим внимание на классическую ошибку при определении разрешения оптической системы телеканала микроскопа в соответствии с критерием Найквиста, связанную с тем, что при расчетах используется основная длина волны, лежащая в середине рабочего спектрального интервала ($\lambda_1 - \lambda_2$), а необходимо использовать наименьшую. Иначе критерий будет выполняться лишь для длинноволновой части интервала, что может привести к цветному муару.

Следует разобраться с приоритетами – хотим мы видеть красивое изображение на экране дисплея или хотим получить достоверный результат обработки электронного изображения. Конечно, хотелось бы и то и другое.

Для получения достоверного результата мы обязаны соблюсти критерий Найквиста, носящий не телевизионный, а математический характер и позволяющий восстановить любое истинное значение функции, заданной таблично, каковым является электронное изображение. С математической точки зрения критерий Найквиста позволяет избежать негативных последствий (артефактов), связанных с понятием мимикрии (наложения) частот вызванных усечением разложения функции в ряд и неудачным выбором шага дискретизации.

Компьютеризация микроскопа позволяет поднять интеллект изделия не только за счет возможной цифровой обработки изображения, но и за счет возможного управления работой микроскопа через компьютер, дать микроскопу возможности адаптивной системы, чем устранить последствия неумелых действий оператора, например, по настройке освещения, выбору увеличения и пр. Это дает эффект на стадии эксплуатации микроскопа и заводу- изготовителю напрямую не нужно, но повышает конкурентоспособность продукции и здесь появляются экономические выгоды. Тем не менее, компьютеризация микроскопа даст заводу-изготовителю выгоду на стадии производства, **если** использовать цифровые методы реставрации изображения и тем самым переложить часть ответственности на качество изделия с оптики и механики на электронику по коррекции геометрических искажений и цветопередачи, фокусировке, энергетике и пр.. Такой подход осуществлен в цифровых фотоаппаратах, ранее и сейчас он осуществляется в полиграфии, автономных системах технического зрения. Эти меры позволят упростить конструкцию микроскопа и его составных частей, упростить технологические процессы, удешевить изделие. В этом суть развития современной световой микроскопии и зарубежные фирмы этим занимаются плотно.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Рассмотрим вопросы, касающиеся спектральных характеристик компонентов телевизионной системы видеонаблюдения, к которым относятся и телевизионные микроскопы. На рис. П1 приведена блок – схема такой системы.

Рис. П1.1 Блок-схема работы телеканала

Оптическая система определена одним квадратиком, тогда как на наших блок-схемах одним квадратиком определится телекамера и пр. Тем не менее, приведенная схема, верно отражает содержание системы видеонаблюдения. Пунктиром обведены блоки, относящиеся к телекамере.

Для нашего рассмотрения следует расшифровать квадратик "оптика", который должен включать объект, систему освещения и систему, строящую изображение. Их селективные свойства будут влиять на цветопередачу в изображении. Главное, что об этих свойствах у нас имеется информация. Таковая отсутствует о квадратике "фильтрация цвета" внутри камеры. Квадратики "Интерполяция цвета" и "Цветокоррекции" понятны и их значение велико. Квадратик "Отображение на экране пользователя" так же мало понятен. Известно, что дисплей, изготовленный одним и тем же предприятием в одном и том же году, будет иметь свои специфические особенности. Нужна индивидуальная калибровка (настройка). То, что не понятно должно быть исследовано.

На рис. П1.2, и П1.3 приведены типичные характеристики спектров излучения лампы накаливания.

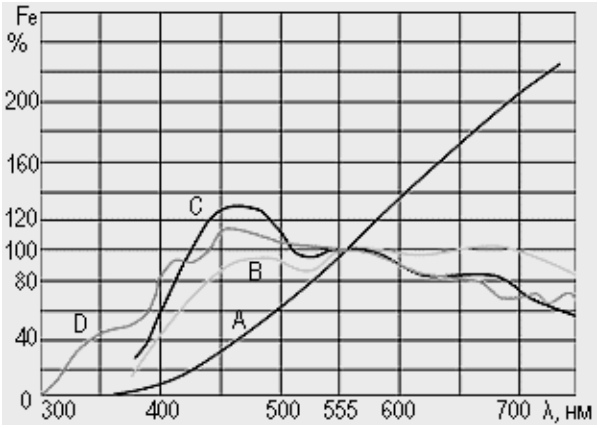


Рис. П1.2. Спектральное распределение лучистого потока Fe для источников света A, B, C, и D

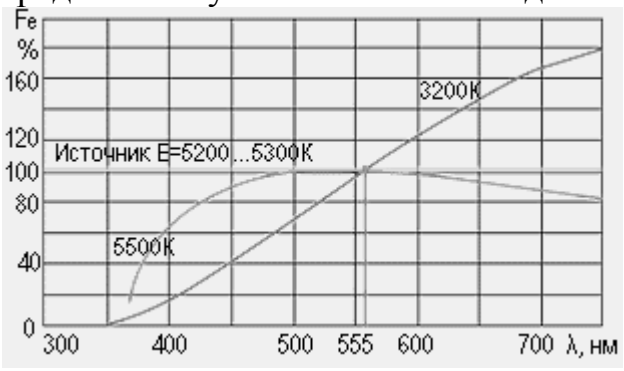


Рис. П1.3. Спектральное распределение лучистого потока Fe для источников света с цветовой температурой 3200 К, 5500 К и 5200К.

На рис. П1.4, П1.5, П1.6 приведены кривые спектральной чувствительности ч/б ПЗС матриц.

Спектральная чувствительность ПЗС камер

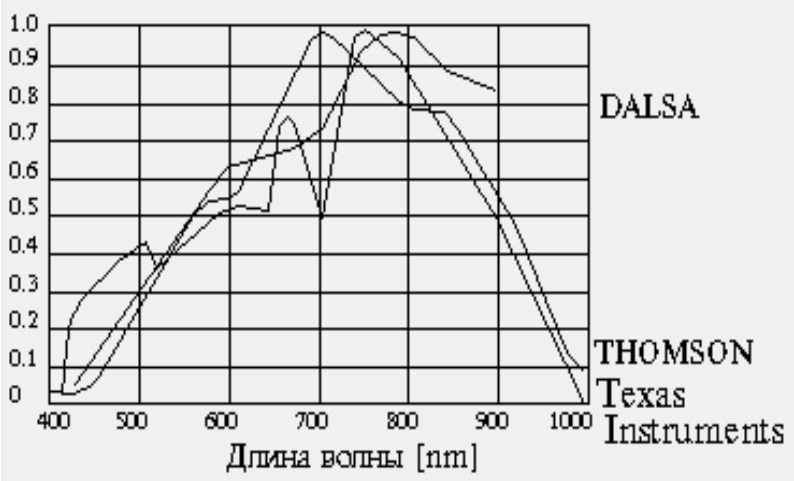


Рис. П1.4 Спектральные характеристики различных матриц.

Поскольку все ПЗС изготавливаются на основе кремния, то в "голом" виде спектральная чувствительность ПЗС соответствует этому параметру у кремния (см. рис. П1.4).

ПЗС матрицы обладают максимумом чувствительности в красном и ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне и совершенно ничего "не видят" в сине-фиолетовой части спектра. Чувствительность ПЗС в ближнем ИК

используется в системах скрытного наблюдения с подсветкой ИК источниками света, а также при измерении тепловых полей высокотемпературных объектов.

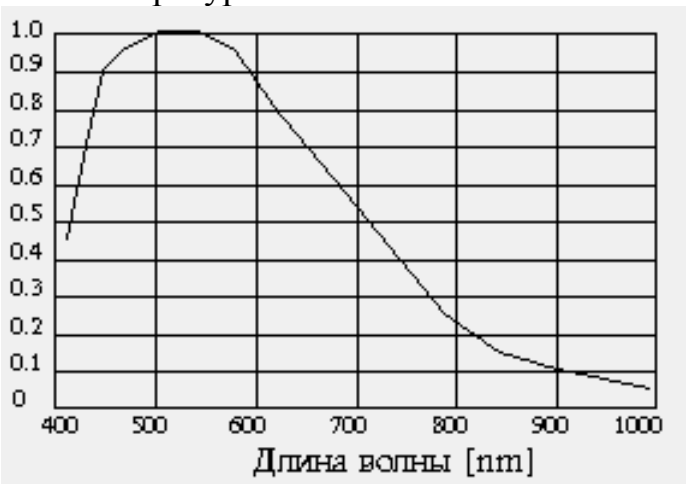


Рис. П1.5 Типичная спектральная характеристика черно-белых матриц SONY.

Фирма SONY все свои черно-белые матрицы выпускает со следующей спектральной характеристикой (см. рис. П1.5). Как видно их этого рисунка чувствительность ПЗС в ближнем ИК значительно уменьшена, но зато матрица стала воспринимать синюю область

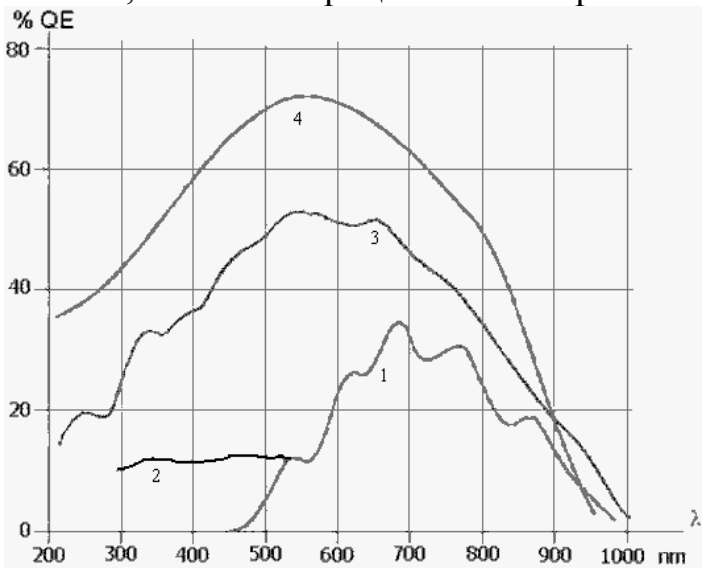


Рис. П1.6 Спектральные характеристики абсолютного квантового выхода:
обычного **ПЗС - 1, ПЗС** с люминофорным покрытием - 2, с освещением с обратной стороны подложки -3 , с виртуальной фазой - 3

На рис. П1,6 показано, как изменяется кривая спектральной чувствительности матрицы при некоторых "доработках".

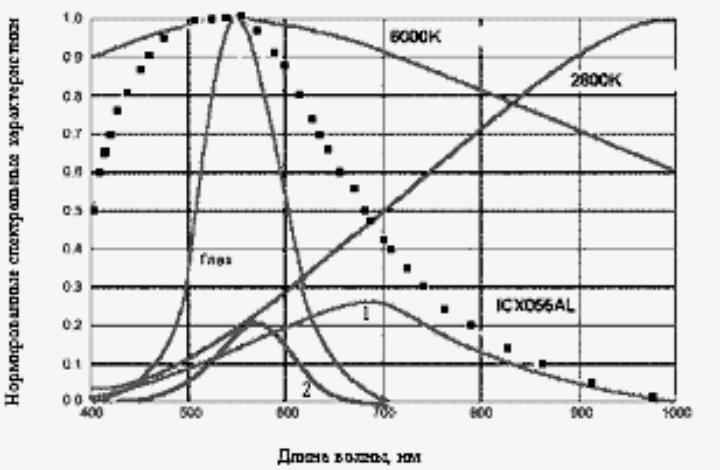


Рис. П1.7 – Спектральная характеристика фотоприемников и излучателей

Кривая 1 результат перемножения графиков спектральной чувствительности телекамеры ICX055AL и спектра излучения источника света типа А (2800^0К) – лампа накаливания. Кривая 2 результат перемножения кривой видности глаза и спектра излучения источника света типа А (2800^0К) – обычная лампа накаливания.

Фирма SONY, например, выпускает совершенно одинаковые ПЗС матрицы для черно-белого (см. рис.5) и цветного варианта, которые отличаются только наличием у цветной матрицы сетки светофильтров, нанесенных непосредственно на чувствительные площадки. Существуют несколько схем раскраски матриц. Вот одна из них – схема Байера.

Здесь используются 4 разных светофильтра

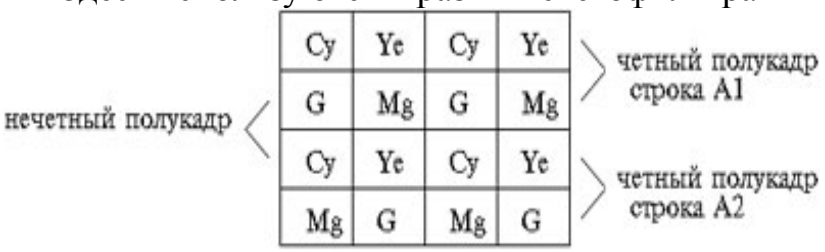


Рис. П1.8 Распредение светофильтров на элементах ПЗС матрицы.

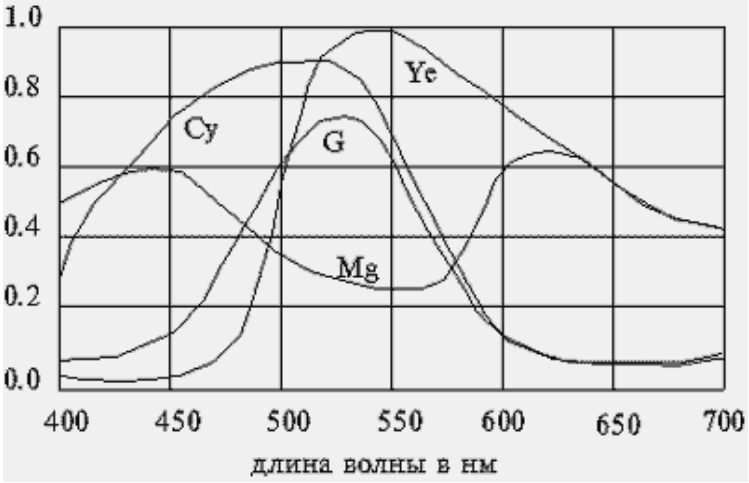


Рис. П1.9. Спектральная чувствительность элементов ПЗС с различными светофильтрами

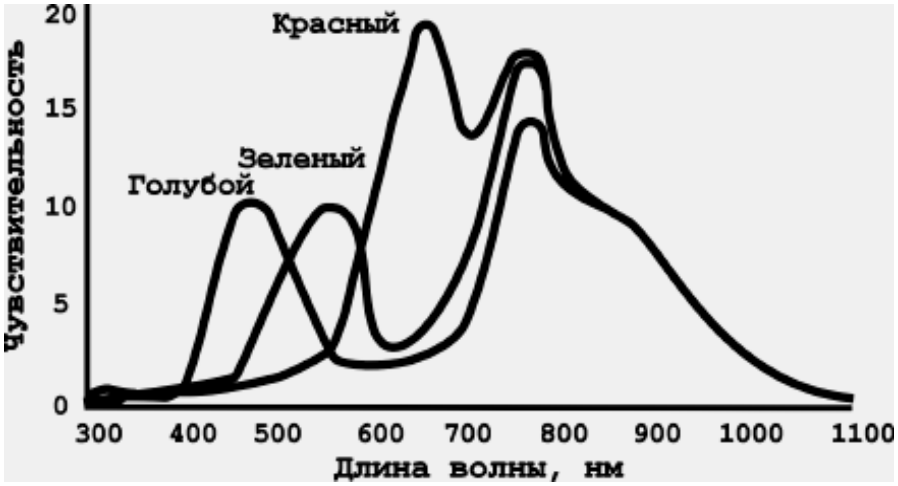


Рис. П1.10. Пример спектральной чувствительности цветной ПЗС-матрицы с RGB стандартными

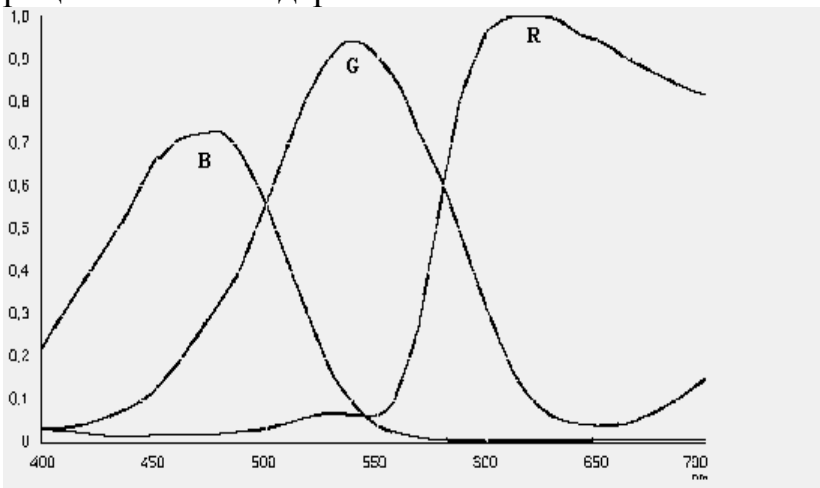


Рис. П1.11. Пример спектральной чувствительности цветной ПЗС-матрицы с RGB стандартными

Обратим внимание на рис.П1.10 и П1.11, где просматривается их разница. Мы отдаем предпочтение кривым по рис.11, но одновременно отдаем отчет себе в том, что , наверняка, есть камеры, у которых эти кривые будут иными. Тем более, что хотелось бы, чтобы они были похожи на кривые координат цветности монохроматических излучений в системах RGB или XYZ (см. рис. П1.13, П1.14).

Отметим, что практика показала преимущества системы RGB перед системой RGGB в отношении цветопередачи и преимущества системы RGGB перед системой RGB в отношении решения задач электронных и программирования.

Из рис. П1.10 видим о существенной составляющей в ИК-области спектра, которую обычно отсекают спецфильтром (см. рис.П1.12).

Все пиксели матрицы имеют чувствительность в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне (от 0.7 до 1 мкм). Поэтому для правильной цветопередачи на камеру устанавливается ИК-отрезающий фильтр. Спектральная характеристика этого фильтра показана на рис. П1.12

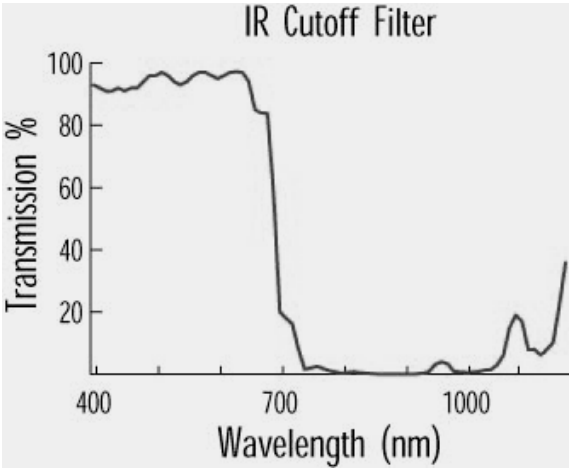


Рис П1.12. Спектральная характеристика ИК-отрезающего фильтра

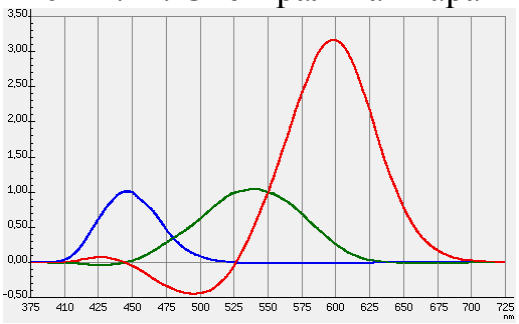


Рис. П1.13 Кривые координат цветности монохроматических излучений в системе RGB.

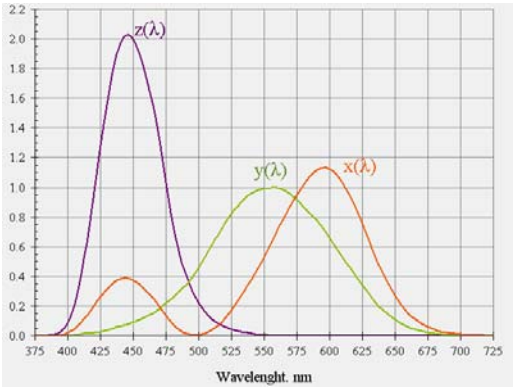


Рис. П1.14 Кривые координат цветности монохроматических излучений в системе XYZ.

Следует обратить внимание на кривые r(λ) и x(λ) (рис. П1.13, П1.14). Необходимо напомнить, что при введении МКО системы XYZ вместо RGB предполагалось, что X=Z=0.

Надо отметить, что при расчете корректирующих светофильтров для получения равносигнального белого цвета теряется до 90% световой энергии. Решение энергетической проблемы связано с уходом от системы КЗС (от трехцветки), что делает задачу цветопередачи не однозначной. Появляется возможность использования алгоритмов оптимизации, связанных с понятием оценочной функции, которую мы сами создаем.

При ссылках на наличие атласов цветных изображений необходимо понимать, что между изображением в визуальном канале (не важно как мы рассматриваем изображение – через окуляры или с экрана) стоит

полиграфическая система передачи цветов (CMYK), но это препятствие преодолимо, тем не менее об этом следует помнить.

Мы здесь не привели спектральных характеристик ЖК-дисплеев, о них практически нет сведений, что может объясняться как их очевидностью, так и иными причинами. Тем не менее эти характеристики могут быть (и должны) быть получены при спектрофотометрировании излучения реальных экранов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

1. КОРРЕКЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОСТЕЙШИХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ.

Технические требования к коррекции аберраций оптической системы прибора расчетчику обычно задает исследователь, конструктор задает допуска на расположение оптических элементов, воздушные и стеклянные толщины на основании результатов работы расчетчика, например, на основании расчета сводки влияния параметров. Именно конструктор определяет воздушные промежутки, позволяющие провести компенсацию ошибок сборки, изготовления отдельных деталей и пр., он определяет поперечные подвижки компонентов схемы для компенсации децентрировок. И никто кроме конструктора не имеет права внести какие-либо изменения в чертеж. Отсюда следует необходимость знаний у конструктора и технолога о коррекционных возможностях простых оптических элементов – линз, зеркал, призм и пр.

Рассмотрим эти вопросы на простых примерах и начнем с простейшей задачи фокусировки, например, лазерного пучка. Известно, что размер пятна фокусирования может быть определен по формуле:

$$2y' = \sqrt{2\lambda R'_{э}/\pi} + \frac{1{,}22a}{D} + 2\Delta y' \quad \text{или}$$

$$w' = k_{м}\sqrt{2\lambda R'_{э}/\pi} + k_{g}\frac{\lambda d'}{2a} + \delta\ell,$$

где λ – длина волны излучения лазера, D – диаметр входного зрачка фокусирующей оптической системы, b – конфокальный параметр лазерного резонатора, d – положения перетяжки лазерного пучка относительно задней главной плоскости оптической системы, $\Delta y'$ – поперечная сферическая аберрация в плоскости перетяжки, k_m – коэффициент моды, k_d – дифракционный коэффициент (и это не обязательно 0,61).

Здесь нас интересует величина $\Delta y'$. Если вспомнить модель лазерного пучка - модель фокального пятна, то формула примет вид:

$$w'_F = k_{м}\sqrt{\lambda d'_{л}/\pi} + k_{g}\frac{\lambda}{2A'} + \Delta y'$$

A' – задняя числовая апертура фокусирующей оптической системы.

Отметим, что в нашем случае значение k_d может не соответствовать значениям из работ Климкова Ю.М., т.к. при разумной реализации случая дифракции на "мягкой" диафрагме второе слагаемое может принять иное значение – дифракционных колец не будет.

В качестве фокусирующей системы в простейшем случае могут выступать одиночные зеркало или линза.

<u>а. Сферическое зеркало.</u>

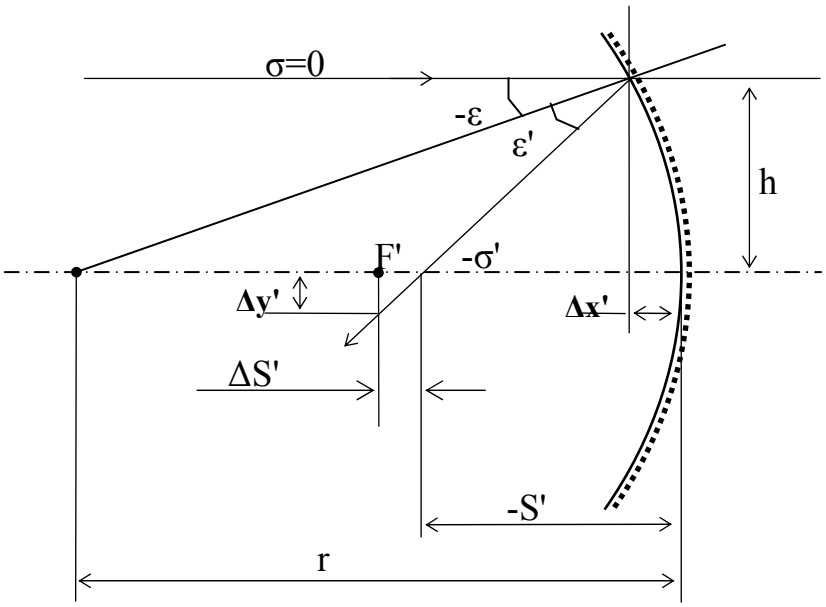


Рис. П2.1

Для этого случая существует точная формула для расчета продольной сферической аберрации $\Delta S'$:

$$\Delta S' = \frac{r}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1-\left(h/r\right)^2}}\right) \qquad (П2.1)$$

Для поперечной сферической аберрации $\Delta y'$ из рис.1 получим

$\Delta y' = \Delta S' \cdot tg\sigma'$, где $\sigma' = -2\varepsilon$ и $\varepsilon = -arcSin\left(\frac{h}{r}\right)$.

При малых значениях апертурного угла σ' может быть применена теория аберраций третьего порядка и для вычисления $\Delta S'$ может быть применена более простая формула:

$$\Delta S'_{III} = -\left(\frac{h^2}{4r}\right) \qquad (П2.2).$$

Для вычисления значения аберрации кома третьего порядка может быть использована формула

$$\Delta y'_{\kappa} = \frac{3h^2}{8r} tg\omega_1 \left(1 = \frac{1}{2} a \right), \qquad (П2.3)$$

где **ω'** угол луча, идущего из вне осевой точки объекта, с оптической осью, а положение входного зрачка (или исходной перетяжки лазерного пучка) относительно вершины зеркала. Согласно модели фокального пятна $h \le w_0$, а значение $\omega_1 \le \Theta_0$.

Отметим, что для параболического зеркала **ΔS' = 0.**

<u>б. Одиночная линза в воздухе.</u>

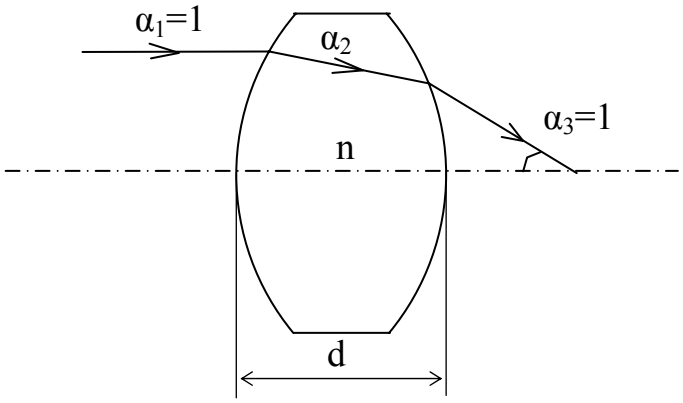


Рис. П2.2

Для одиночной линзы нет такой простой формулы для вычисления точного значения сферической аберрации как формула (П2.1), справедливая для сферического зеркала. Однако формулы в области аберраций третьего порядка так же просты. Например, для одиночной тонкой линзы имеем расчетные формулы:

$$P = \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \left[1 - \left(2 + \frac{1}{n} \right) \alpha_2 + \left(1 + \frac{2}{n} \right) \alpha_2{}^2 \right], \; W = \frac{n}{n-1} \left[1 - \frac{n+1}{n} \alpha_2 \right]$$

для продольной сферической аберрации $\Delta S'_{III} = -\left(\frac{h^2 P}{2f'} \right)$ и для поперечной

$$\Delta y' = \Delta S'_{III} \cdot \frac{h}{f'}. \qquad (П2.4)$$

Для аберрации кома третьего порядка расчетная формула имеет вид:

$$\Delta y'_{\kappa} = -3h^2 tg\omega_1 \left(\frac{aP + W}{2f'} \right), \qquad (П2.5)$$

где ***P*** и ***W*** основные параметры линзы.

n – показатель преломления материала линзы.

Значения P и W для простейших линзовых конструкций приведены в справочниках.

Профессором В.Н.Чуриловским получены формулы для определения конструктивных параметров линз с минимальным значением сферической аберрации:

$$\Delta S'_{min} = -\frac{1}{32}\frac{\nu}{(1-\nu)^2}\cdot\frac{4-\nu}{1-2\nu}\cdot\frac{4h^2}{f'} \qquad \text{при} \quad r_1 = 2(1-\nu)\frac{1+2\nu}{2+\nu}f',$$

$$\frac{1-\nu}{r_2} = \frac{1-\nu}{r_1} - \frac{\nu}{f'} \qquad \text{где} \quad \nu = \frac{1}{n} \quad \text{и}, \ h \text{ – высота нулевого луча.}$$

Для ИК-области спектра при n = 4 (материал линзы германий) может быть рекомендована приближенная формула

$$\Delta y' \approx 0{,}005\left(\frac{1}{k^3}\right)f' \quad , \text{где} \quad k = \frac{f'}{2h}.$$

Введение асферических поверхностей позволяет устранить сферическую аберрацию. Отметим так же, что применение линз целесообразно при значениях ее числовых апертур менее 0,05.

2. РАСЧЕТ КОНДЕНСОРА ОСВЕТИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА.

В конце рассмотрим малоизвестный метод расчета конденсора осветительной системы, который обычно рассчитывается на минимум сферической аберрации. Тем не менее в 1967 г. Успенским М.А. был разработан метод расчета конденсора с полностью исправленной сферической аберрацией для случая работы конденсора с предметом на бесконечности.

В методе было определено значение показателя преломления линз конденсора в зависимости от числа линз в нем.

$$n = (2N+1)/2(N - 1),$$

где N число линз, n показатель преломления материала линз.

Однако по этому методу однолинзовый конденсор с исправленной сферической аберрацией не реализуется. В Таблице приведены необходимые значения показателя преломления в зависимости от значения N.

Таблица

N	2	3	4
n	2.5	1.75	1.5

Оптические материалы с показателем преломления 2,5 существуют для ИК – области спектра. Для стекла ТФ 5 n = 1,7550.

Расчет сводится к вычислению значений четных и нечетных углов нулевого луча с оптической осью α_m, где m номер угла. При m = 0 имеем α_0 = 0.

Таким образом, для нечетных углов имеем

$\alpha_{2m+1} = (m+1)/N$, где $m = 1,2,3,.....(N-1)$

и для четных

$\alpha_{2m} = (2m-1)/(2N-1)$, где $m = 1,2,3,...N$.

Далее вводятся конечные толщины и определяются значения радиусов кривизны, которые могут принимать не технологичные значения (крутые кривизны).

3. К АНАЛИЗУ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ПОГРАНИЧНОЙ КРИВОЙ.

В п. 24 показано применение светораспределение в изображении полуплоскости, позволяющее после математической обработки результатов фотометрирования выполнить комплексную оценку качества изображения в контролируемой оптической системе. Если рассматривать пограничную кривую как функцию распределения вероятности, то ее производная, определяющая ФРЛ системы, будет плотностью вероятности. Не менее важна и вторая производная от пограничной кривой для оценки качества изображения. При вероятностном подходе вторая производная определит коэффициент асимметрии и укажет на присутствие, например, аберрации кома.

а б

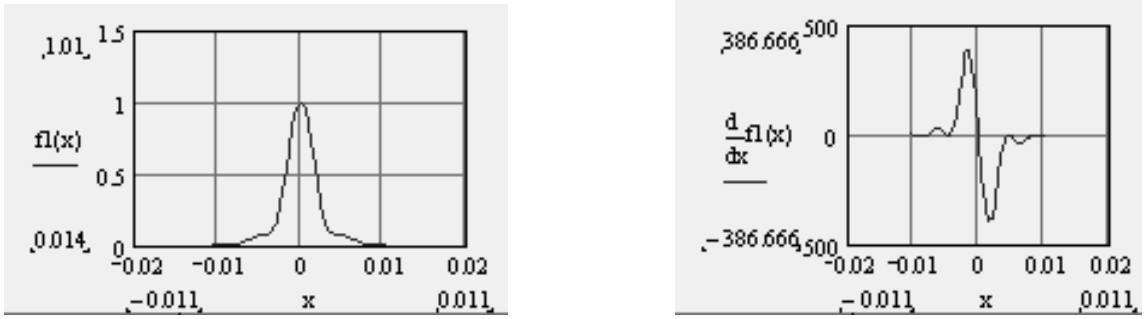


Рис. П2.2

а – ФРТ по интенсивности светового поля, б – коэффициент асимметрии.

На рис. П2.2 приведены ФРТ (а) и коэффициент асимметрии (б) объектива установки для технологического контроля вытяжки стекловолокна ИОФ РАН. Коэффициент асимметрии позволяет оценить степень изопланатической коррекции аберраций оптической системы. Известно, что аберрация кома может быть определена (в первом приближении) из выражения (см. рис. 3 а, б):

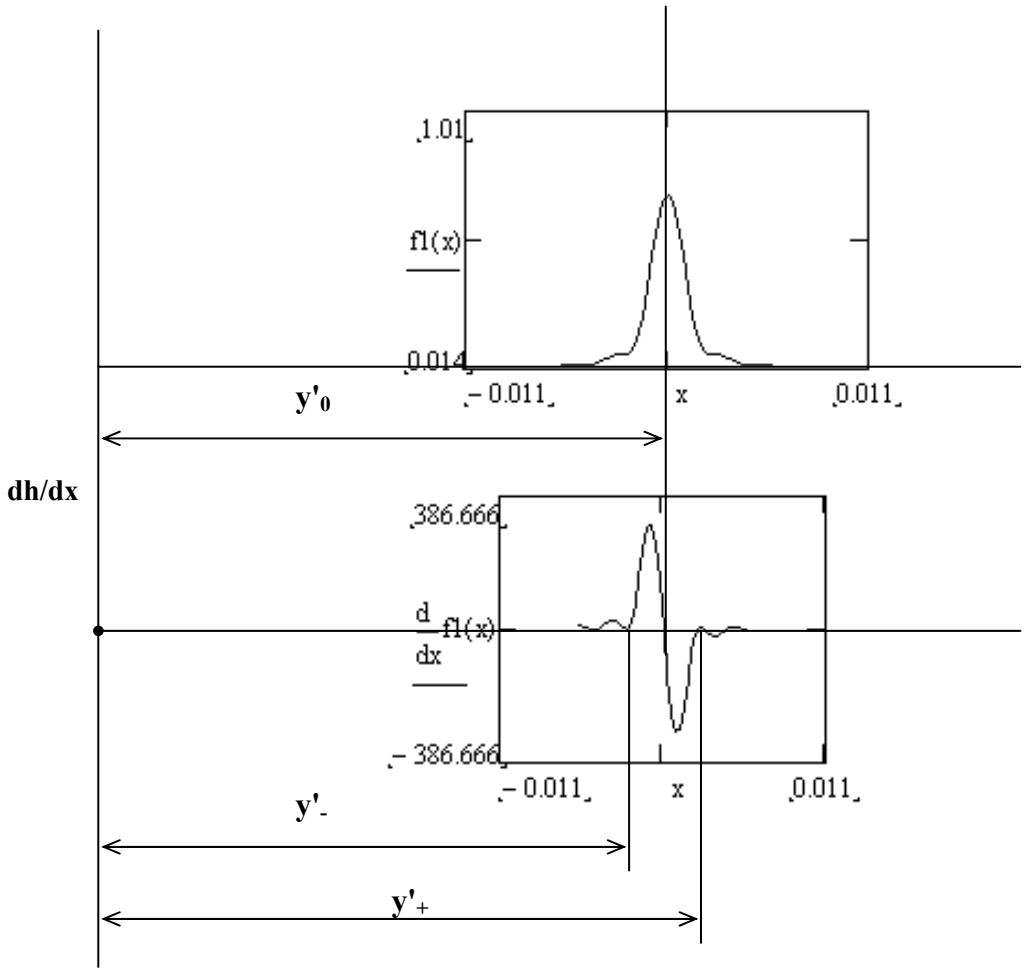
$$K = \frac{(y'_+ + y'_-)}{2} - y'_0 .$$

Одновременно известно, что

$$K = 3y'_0\,\eta ,$$

где η – коэффициент изопланатизма для точки поля с ординатой y'_0.

Кроме того, $h(x) = h_k^2(x)$, где $h_k(x)$ ФРТ в поле амплитуд ($h(x)$ ФРТ в световом поле интенсивностей), которая в свою очередь определяется фурье-образом зрачковой функции, зависящей от значения волновых аберраций оптической системы. Иначе, коэффициент асимметрии весьма информативный параметр.



ЛИТЕРАТУРА

1. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.-Л.: Машиностроение, 1966. 512 с.
2. Вычислительная оптика. Справочник. Л.: Машиностроение, 1984.423 с.
3. Папулис А.Теория систем и преобразований в оптике. М.: Мир, 1971. 495с.
4. Гудмен Дж. Статистическая оптика. М.: Мир, 1988.327 с.
5. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1966. 855 с.
6. Проэктирование оптических систем / Под редакцией Р.Шеннона, Дж.Вайанта. М.: Мир. 1983. С.430.
7. Скворцов Г.Е. и др. Микроскопы.- Л.: Машиностроение, 1969. 511 с.
8. Карпов В.Г., Куприн А.А., Киселев Н.Г., Натаровский С.Н. Расчет растровых оптических систем и оптических элементов Френеля. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО. 1986. 51 с.
9. Климков Ю.М. Прикладная лазерная оптика. М.: Машиностроение, 1985. 124 с.
10. Мешков В.В., Матвеев А.Б. Основы светотехники. ч. 2. М.: Энергоиздат, 1989. 431 с.
11. Котлецов Б.Н. Микроизображения. Оптические методы получения и контроля. Л.: Машиностроение, 1985. 239 с.
12. Коган Л.М. Светодиоды нового поколения для светосигнальных и осветительных приборов. Выпуск 7-8 (34-35). М., 2001. 35 с.
13. Карасик В.Е., Орлов В.М. Лазерные системы видения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 351 с.
14. Русинов М.М. Техническая оптика. М.-Л.: Машгиз, 1961. 328 с.
15. Игнатьев Н.К. Дискретизация и ее приложения. М.: Связь, 1980. 263 с.
16. Хромов Л.И. и др. Видеоинформатика. Передача и компьютерная обработка информации. М.: Радио и связь, 1991. 249 с.
17. Волосов Д.С. Фотографическая оптика.- М.: Искусство, 1978. 543 с.
18. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978. 397 с.

СПбГУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы и успешно реализовал инновационную образовательную программу «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», что позволило выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворять возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях науки. Реализация этой программы создала основу формирования программы дальнейшего развития вуза до 2015 года, включая внедрение современной модели образования.

КАФЕДРА СИСТЕМОТЕХНИКИ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ И КОМПЛЕКСОВ

С 2005 года на базовой кафедре ОАО «ЛОМО» СОПиК начал читаться новый курс «Методы проектирования сложных оптико-электронных систем и комплексов», содержание которого посвящено методом проектирования современных оптических приборов на основе достижений относительно нового класса систем – систем технического зрения (СТЗ), автоматизированных рабочих мест (АРМ).

СТЗ и АРМ относятся к системам с не визуальной регистрацией изображения. Обычно в них используются телевизионные методы регистрации с последующей компьютерной обработкой изображения, которая в итоге обеспечивает объективность результатов, получение «протокола» наблюдений за объектом. Роль оптического прибора в таких системах сводится к системе сбора информации, что предопределяет особенности построения как его оптической системы, так и самого прибора. Эти особенности связаны с необходимостью использования положений теории связи, информации, телевизионной и компьютерной техники, о которых у разработчиков оптических приборов сведения или отсутствуют, или не достаточные.

Заполнению этого пробела и посвящен курс «Методы проектирования сложных оптико-электронных систем и комплексов».

а

Сергей Николаевич Натаровский

Методы проектирования современных оптических систем

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

В авторской редакции С.Н.Натаровского
Компьютерный набор, верстка, дизайн И.И.Иванов
Редакционно-издательский отдел
СПбГУИТМО
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99
Зав. РИО Н.Ф.Гусарова

Подписано к печати 10.04.09
Заказ № 2103 Тираж 150 экз. Отпечатано на ризографе