ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Лекция 2.1 «Классификация аберраций. Монохроматические аберрации»

Такие погрешности изображений присущи всякой реальной оптической системе, и принципиально неустранимы. Их возникновение объясняется тем, что преломляющие поверхности неспособны собрать в точку сколько-нибудь широкие пучки лучей, падающие на них под большими углами.

Эти аберрации приводят к тому, что изображением точки является некоторая размытая фигура (фигура рассеяния), а не точка, что, в свою очередь, отрицательно влияет на чёткость изображения и нарушает подобие изображения и предмета.

Теория аберраций

Теория геометрических аберраций устанавливает функциональную зависимость аберраций от координат падающего луча и конструктивных элементов оптической системы — от радиусов её поверхностей, толщин, показателей преломления линз и т. д.

Теория аберраций ограничивается приближённым представлением составляющих аберраций ($\delta g'$ и $\delta G'$) в виде ряда, члены которого содержат некие коэффициенты (суммы переменных) a_1, a_2,…a_k, зависящие только от конструктивных элементов оптической системы и от положения плоскостей объекта и входного зрачка, но не зависящие от координат луча. Так, например, меридиональная составляющая аберрации третьего порядка может быть представлена формулой:

$$\delta g' = a'_1 m^3 + a'_2 l m^2 + a'_3 l^2 m + a'_4 l^3$$

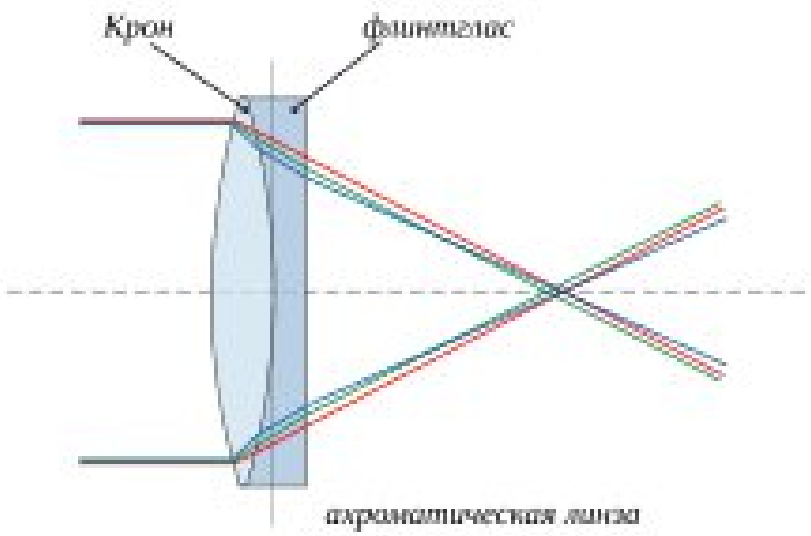
где l и m — координаты луча, входящие в качестве сомножителей членов ряда.

Число таких коэффициентов аберраций третьего порядка равно пяти и, как правило, они обозначаются буквами S_I, S_{II}, S_{III}, S_{IV}, S_V.

Причём, в целях упрощения анализа, предполагают, что в формулах только один из коэффициентов не равен нулю, и определяет соответствующую аберрацию.

Каждым из пяти коэффициентов определяется одна из так называемых пяти аберраций Зейделя:

1. S_I — сферическая аберрация;
2. S_{II} — кома;
3. S_{III} — астигматизм;
4. S_{IV} — кривизна поля (поверхности) изображения;
5. S_V — дисторсия.



В реальных системах отдельные виды монохроматических аберраций почти никогда не встречаются. В действительности наблюдается сочетание всех аберраций, а исследование сложной аберрационной фигуры рассеяния методом выделения отдельных видов аберраций (любого порядка) — не более чем искусственный приём, облегчающий анализ явления.

Монохроматические аберрации высших порядков

Как правило, картину распределения лучей в фигурах рассеяния заметно осложняет то, что на комбинацию всех аберраций третьего порядка налагаются аберрации высших порядков. Это распределение заметно меняется с изменением положения точки объекта и отверстия системы. Так, например, сферическая аберрация пятого порядка, в отличие от сферической аберрации третьего порядка, отсутствует в точке на оптической оси, но при этом растёт пропорционально квадрату удаления от неё.

Влияние аберраций высших порядков возрастает, по мере роста относительного отверстия объектива, причём настолько быстро, что, на практике, оптические свойства светосильных объективов определяются именно высшими порядками аберраций.

Величины аберраций высших порядков учитываются на основании точного расчёта хода лучей через оптическую систему (трассировки). Как правило, с применением специализированных программ для оптического моделирования (Code V, OSLO, ZEMAX и пр.)

Монохроматические аберрации оптических систем. Объектив анастигмат, планар , ортоскопический объектив.

Планар — тип фотографического (киносъёмочного) объектива. Рассчитан Паулем Рудольфом (нем. *Paul Rudolph*) для Carl Zeiss Jena и запатентован в 1897 году.

Базовая схема состоит из 6 линз в 4 группах. Современные объективы этой схемы могут включать в себя до 9 линз в 9 же группах.

Согласно классификации, принятой, как в западноевропейской, так и в американской оптической литературе (включая патентную), этот тип объектива именуется Double-Gauss lens (двойной объективГаусса). Планары же рассматриваются, как одна из модификаций этой схемы.

Следует также отметить, что название Planar® до сих пор является собственностью фирмы Carl Zeiss AG.

Особенности конструкции

Конструктивно, планар относится к менисковым анастигматам. Первоначально, схема строилось на основе объектива предложенного Карлом Гауссом ещё в начале XIXв, в качестве объектива телескопа, и состоящего из двух менисков — «силового» положительного и отрицательного корректирующего. Двойной же объектив Гаусса представляет собой симметричную конструкцию из двух таких объективов, с диафрагмой посередине. Подобный вариант был рассчитан Элвеном Кларком (Alvan G. Clark), запатентован в 1889 г.[2] и выпускался фирмой Bausch & Lomb.

Из самого принципа симметрии следует, что оптическая сила, как передней, так и задней «половинки», такого объектива — строго положительна. Эта, положительность «половинок» сохраняется и при переходе от строгой симметрии к некоторой пропорциональности. Таким образом, сила отрицательной линзы, в каждой из «половинок», всегда меньше, чем сила положительной, в той же «половинке». Причём, так как обе «половинки» имеют положительную силу, то задний фокальный отрезок планара, как симметричного, так и пропорционального, всегда короче его фокусного расстояния.

Базовая схема двойного объектива Гаусса не обеспечивала его достаточной ахроматизации, поэтому в «Планаре» Рудольфа, простые отрицательные мениски были заменены ахроматическими склейками.

В объективе неплохо исправлены все аберрации 3-го порядка, как монохроматические (сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля изображения и дисторсия), так и хроматические (хроматизм положения и хроматизм увеличения).

В то же время, качество изображения светосильных (с относительным отверстием больше F:2,8) объективов, как правило, определяется аберрациями высших порядков, что требует дополнительной коррекции. Так, например, для ограничения, присущей планарам, положительной меридиональной сферической аберрации, необходимо

введение геометрического виньетирования, которому многие светосильные объективы этой схемы обязаны своим «закручивающим» боке (swirly bokeh).

Угол поля зрения планаров, предназначенных для широкого применения, как правило, не превышает 50°.

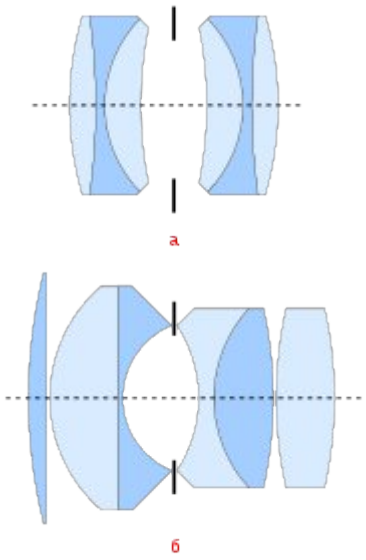
Применение

На сегодняшний день, на основе планара уже разработано несколько сотен объективов, самого разного назначения (фотографические, киносъёмочные, проекционные, аэросъёмочные, телевизионные, репродукционые и т. д.).

Из предназначенных для малоформатной фотографии, это, в основном, нормальные и умеренно-длиннонофокусные объективы, с относительным отверстием от F:1.2 до F:2 (для зеркальных камер), и от F:0,95 до F:2 (для дальномерных камер).

Благодаря хорошему разрешению, контрасту и высокой светосиле такие объективы, с фокусным расстоянием около 50 мм, повсеместно предлагаются в качестве штатных, для плёночных и цифровых фотокамер формата 24 мм х 36 мм, практически вытеснив из этой ниши объективы других оптических схем.

Умеренно-длиннофокусные (85-100мм) объективы Гауссовой схемы, широко применяются в качестве портретных.



Оптическая схема анастигматов: а – симметричная конструкция, б – пропорциональная конструкция

Анастигма́т — наиболее совершенный тип фотографического объектива, характеризующийся исправлением аберраций в пределах всего поля изображения. Существенным признаком анастигмата является исправление астигматизма и кривизны

поля изображения. Анастигматы при большом значении максимального относительного отверстия дают хорошее качество изображения по всему полю.

Анастигмат состоит не менее чем из трёх линз (если он не содержит оптических элементов другого типа и асферических линз). Простейший анастигмат — триплет. Подавляющее большинство выпускаемых сменных фотографических объективов — анастигматы.

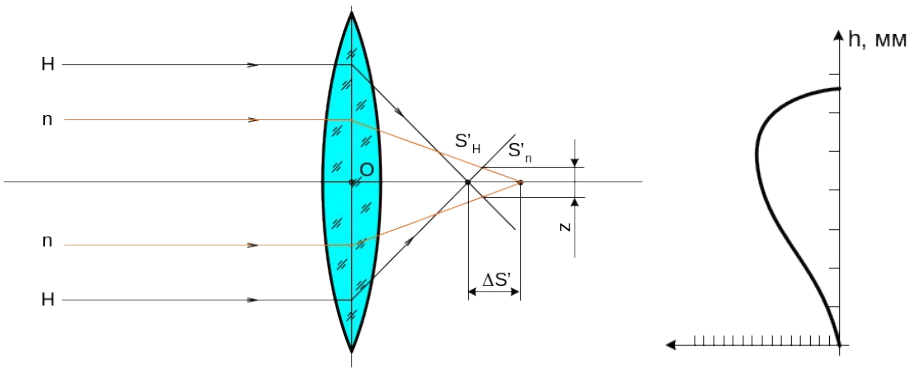
Ортоскопи́ческое изображе́ние — изображение, которое точно подобно объекту. У такого изображения отсутствует искривление прямых линий. Ортоскопическое изображение даётобъектив, у которого устранена дисторсия — такой объектив называется ортоскопическим.

В голографии ортоскопическим изображением называется такое, в котором распределение разности фаз на поверхности изображения объекта соответствует распределению разности фаз на поверхности объекта. Наблюдатель видит при этом «обычное» изображение объекта (в «необычном» выпуклости изображения могут соответствовать вогнутостям объекта и наоборот).

Сферическая аберрация.

Сферическая аберрация – это погрешность изображения, являющаяся следствием того, что лучи пучка монохроматического света, исходящего из точки, лежащей на оптической оси, пройдя через оптическую систему не пересекутся в одной точке, а создадут ряд изображений этой точки, расположенных друг за другом на некотором участке оптической оси. В случае простой положительной линзы дальше всех пересекутся лучи, входящие в линзу непосредственно вблизи ее оси, так называемые параксиальные лучи, а ближе всех – краевые, вошедшие в линзу на ее краях. На рис. 1. показано положение изображений некоторой точки, находящейся в бесконечности на оси объектива, построенных параксиальными лучами S'_n и краевыми $S'_к$. Изображения точки, построенные всеми остальными промежуточными зонами линзы, расположатся между ними. Расстояние $\Delta S'$ по оси между точками S'_n и $S'_к$ является величиной, продольной сферической аберрации при полном действующем отверстии. Если оно уменьшается диафрагмированием, то положение точки, построенной новыми краевыми лучами, соответственно приближается к точке S'_n для параксиальных лучей.

После пересечения на оси все лучи, построившие на различных расстояниях изображения точки, прямолинейно распространяются дальше, пока не встретят на своем пути преграды в виде эмульсионного слоя пленки или CCD-матрицы.



Таким образом, в рассматриваемом случае лучи, прошедшие на различном расстоянии от центра линзы, распространяются. Из него видно, что, где бы ни была установлена плоскость построения изображения между S'_n и $S'_к$, на ней не будет получено общее изображение в виде точки. Даже если эта плоскость пройдет через самый узкий участок аберрационного пучка лучей, то и в этом случае изображением точки будет кружок, равный минимальному диаметру z пучка всех лучей. При этом z тем больше, чем больше действующее отверстие. Эту величину, характеризующую размер изображения точки в результате наличия сферической аберрации, называют поперечной сферической аберрацией. Из сказанного следует, что продольная и поперечная сферические аберрации не два разных вида погрешности, а только два способа выражения одной и той же сферической аберрации. В паспортах объективов данные о величине сферической аберрации обычно приводятся в виде графика, где вертикали соответствуют радиусы входной линзы, а по горизонтали отложены соответствующие значения разности $\Delta S'$, т. е. разности в положении изображения, построенного параксиальными лучами и лучами, прошедшими на соответствующем расстоянии от центра объектива h.

Продольная сферическая аберрация положительных линз имеет знак минус, так как отрезок $\Delta S'$ лежит слева от точки F'_0. Сферическая аберрация зависит от формы линзы. Наибольшие аберрации имеют мениски, особенно обращенные выпуклой стороной к объекту, а наименьшие – двояковыпуклые линзы. Причем минимальные значения аберраций у этих двояковыпуклых линз наблюдается при соотношении радиусов кривизны поверхностей линзы 1:6 – 1:7.

Продольная сферическая аберрация отрицательных линз имеет знак плюс. Поэтому для исправления сферической аберрации необходимо сочетание положительных и отрицательных линз, оптимизация формы линз с заменой одной линзы двумя или тремя. Достаточно полное исправление сферической аберрации в съемочных объективах достигается для какой-либо кольцевой зоны, а для других кольцевых зон сферическая аберрация уменьшается, но полностью не устраняется.

Кома.

Устранение сферической аберрации для точек на оси оптической системы еще не значит, что этот дефект устранен для всего поля изображения.

Кома (греческое слово *kome* – волосы) – так называют вторую монохроматическую аберрацию, характерную для широких наклонных световых пучков, для точек, лежащих не на оси линзы или объектива. И в этом случае главная причина аберраций – переменная толщина линзы. Кома связана с нарушением осевой симметрии в плоскости „луч – оптическая ось". Световое пятно, в которое фокусируются наклонные лучи, теряет круглую форму, характерную для сферической аберрации. По мере удаления от оси световое пятно в фокальной плоскости все более походит на запятую или, как давно подметили, на хвост кометы.

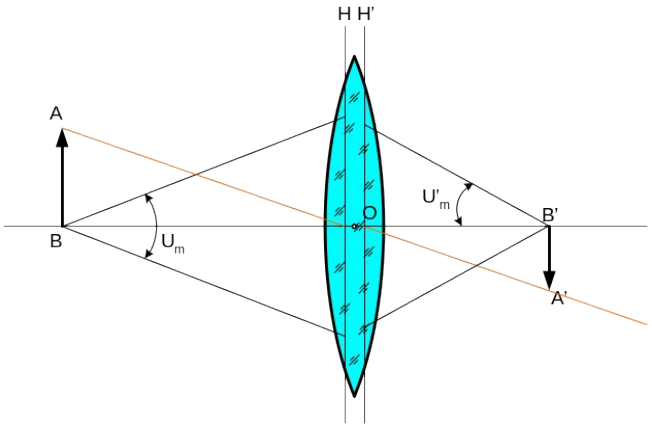
Если точки объекта съемки находятся в стороне от оси системы, т. е. не в центре поля зрения объектива, то оси пучков лучей, идущих от этих точек на переднюю поверхность линзы, наклонены по отношению к ее оптической оси. Такой пучок лучей становится несимметричным уже на первой поверхности линзы. Далее его сечение не имеет круглой формы, а приобретает форму «кометы» с более ярким ядром и тусклым широким «хвостом».

Аберрация комы во всех современных киносъемочных объективах тщательно исправляется, так как ее наличие весьма заметно снижает качество изображения.

Рассматривая аберрацию комы, необходимо остановиться на одном интересном условии, при выполнении которого эта аберрация может быть устранена или существенно уменьшена. Это условие сформулировал немецкий физик, руководитель оптического производства на заводах К. Цейса в Йене, Эрнст Аббе (1840-1905), которое известно под названием условия синусов или закона синусов Аббе. И поэтому для устранения комы в близких к центру участках поля при исправлении сферической аберрации необходимо соблюдение следующего соотношения:

$A'B'/AB=sinU_m/sinU'_m$,

где AB и $A'B'$ – сопряженные элементы предмета и его изображения, расположенные перпендикулярно оптической оси, а U_m и U'_m – апертурные углы соответственно входного и выходного зрачков объектива (рис. 3).



На рисунке показано меридиональное сечение световых пучков в оптической системе, в которой выполнено указанное условие синусов, и, следовательно, для точки *B*, находящейся вне оси и ее изображения *B′*, устранена аберрация комы.

Сопряженные точки на оси оптической системы, для которых устранена сферическая аберрация и выполнено условие синусов, называются апланатическими точками, а системы, в которых устранена сферическая аберрация и выполнено условие синусов, называются апланатическими или *апланатами*.