

Аберрации волнового фронта и очковые линзы Часть 1

Д.Мейстер, специалист Carl Zeiss Vision

Волновой фронт и коррекция аберраций волнового фронта высших порядков — одна из наиболее актуальных тем в современной оптике. Ведущие мировые производители очковых линз при разработке своих лучших однофокальных и прогрессивных дизайнов в той или иной степени минимизируют аберрации высших порядков, вызываемые несовершенством оптики глаза и/или очковых линз. Анализ волнового фронта позволяет создавать наиболее совершенные индивидуальные очковые линзы, обеспечивающие самое высокое на сегодняшний день качество зрения. Аберрации высших порядков глаза учитывают и в дизайне некоторых контактных линз, обеспечивающих их пользователям улучшенную четкость зрения.

Яркий пример использования метода анализа волнового фронта — индивидуальные очковые линзы Carl Zeiss, изготавливаемые по технологии i.Scription, дающей возможность учесть при изготовлении линз аберрации высших порядков глаза пользователя очками (подробнее о технологии см. статью Н.Кузнецовой в журнале «Вестник оптометрии», №5, 2012). Анализ искажений волнового фронта при прохождении через очковые линзы световых лучей, формирующих изображение на сетчатке, широко применяется при расчете дизайнов «топовых» прогрессивных линз, отличающихся минимальным уровнем периферических искажений и практически мгновенной адаптацией пользователей к новым прогрессивным очкам.

Чтобы лучше понимать особенности современных очковых линз экстра-класса, которые в значительной степени определяют их высокую себестоимость, необходимо иметь базовые представления о методе анализа волнового фронта, применяемом для устранения аберраций высших порядков глаза и линз. Полагаем, что публикуемая ниже статья Д.Мейстера позволит нашим читателям более свободно ориентироваться в этой непростой, но важной теме.

Хотя оценка аберраций волнового фронта линз и оптических систем уже давно широко распространена в астрономии, в которой адаптивные оптические системы применяются для минимизации вызванных турбулентностью атмосферы оптических аберраций в телескопах, сегодня к этой технологии возник повышенный интерес и в офтальмологической индустрии. Этот интерес в значительной мере объясняется последними успехами лазерной рефракционной хирургии, которая теоретически позволяет хирургам с помощью метода абляции с контролем волнового фронта уменьшить аберрации высших порядков глаза. Устранение аберраций высших порядков глаза может обеспечить нам «суперзрение» с более высокими остротой зрения и контрастной чувствительностью по сравнению с нормой.¹

Аберрации волнового фронта

Распространение света описывают как перемещение энергетических частиц (фотонов), движущихся подобно волнам. Распространение света от точечного объекта теоретически представляют как испускание объектом световых лучей или волн, исходящих из объекта и колеблющихся в перпендикулярных к этим лучам направлениях. Световые волны распространяются от точечного объекта подобно тому, как расходятся волны от брошенного в воду камня. На любом расстоянии от точки происхождения световой волны существует волновой фронт, который представляет собой поверхность,

соединяющую точки волн, ушедших от источника волн на одинаковое расстояние (имеющих равные оптические пути).

По мере удаления от источника волн кривизна волнового фронта уменьшается, и на «оптической бесконечности» форма фронта приближается к плоскости. Источник волн является общим центром кривизны для всех волновых фронтов (рис.1). Для световых лучей, фокусирующихся в точку, мы имеем обратную ситуацию. Волновой фронт этих лучей сферический, и по мере приближения к фокусу их радиус кривизны уменьшается, стремясь к нулю. Причем световые лучи остаются перпендикулярными волновому фронту на всем своем пути: как при распространении от объекта, так и при фокусировании изображения.

Аберрациями называют ошибки фокусирования, не позволяющие сформировать четкое изображение. Существует несколько способов для описания аберраций, индуцированных линзой или оптической системой. В геометрической оптике часто применяют трассировку лучей для расчета траектории исходящего от точечного объекта светового пучка, преломляющегося при пересечении поверхностей линзы или оптического элемента. Аберрации в этом случае определяют, рассчитывая расстояние от того места, куда лучи попали после преломления, до требуемой точки их фокусирования. Альтернативный путь — определение деформации волнового фронта преломленных лучей.

В идеальной оптической системе сферический волновой фронт световых лучей, исходящих из точечного объекта,

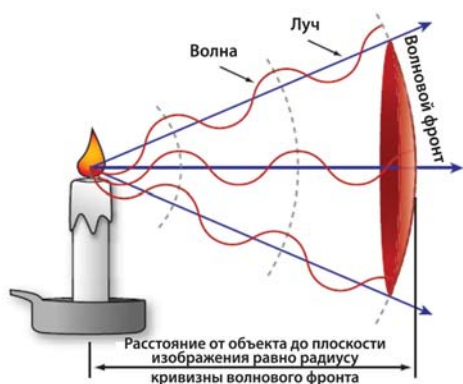


Рис. 1. Волновой фронт представляет собой поверхность, связывающую световые волны, ушедшие на одинаковое расстояние от точечного объекта

должен сойтись в один точечный фокус в нужном месте расположения изображения (сетчатке глаза). Однако из-за оптических aberrаций волновой фронт становится либо слишком плоским, либо слишком крутым, либо его форма становится отличной от идеальной (рис.2). Поэтому световые лучи, соответствующие такому фронту, не могут сфокусироваться в одну точку на плоскости изображения и формируют размытый фокус.

Аберрации волнового фронта — это удобный способ для характеристики сложных оптических ошибок фокусирования, присущих оптическим системам. В любой точке апертуры оптической системы (зрачка глаза) ошибка волнового фронта — это разница между длиной оптического пути реального волнового фронта и соответствующего идеального фронта. Эту разницу обычно выражают в микронах ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$).

Аберрации волнового фронта, претерпевшего преломление в оптической системе, могут быть математически смоделированы и количественно описаны, если было выполнено достаточное число измерений ошибок волнового фронта по апертуре системы. Форма искаженного аберрациями волнового фронта может быть математически описана на основе результатов измерений ошибок волнового фронта с помощью полиномов (т.е. многочленов). Применяя математические методы оптимизации, подбирают полином, который наиболее точно соответствует результатам измерений. Чем выше степень подобранного многочлена, тем точнее будет математическая аппроксимация имеющегося волнового фронта. Наиболее часто в офтальмологии для аппроксимации волнового фронта применяют полиномы Цернике (Зернике), которые эффективно характеризуют аберрации волнового фронта.²

Полиномы Цернике

Полиномы Цернике используются для математического описания волнового фронта в виде суммы одночленов разных степеней, называемых модами. Такой подход позволяет представить волновой фронт любой сложности в виде композиции некоторых основных форм. Аналогично тому, как модель дома можно собрать путем комбинирования различных более простых элементов, имеющих форму треугольника и прямоугольника, так и определенный волновой фронт можно составить из более простых форм или мод (рис.3).

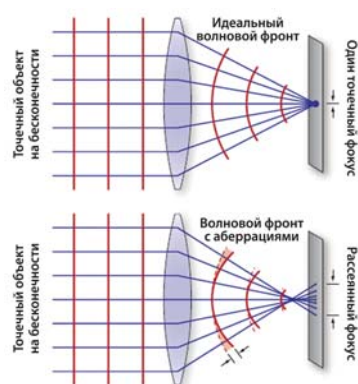


Рис. 2. Из-за aberrаций волновой фронт не сходится в точечный фокус на плоскости изображения

При этом каждая мода полинома Цернике (одночлен) связан с определенным типом aberrаций волнового фронта. Это позволяет количественно представить ошибки волнового фронта в виде набора более простых оптических aberrаций, некоторые из которых уже хорошо знакомы офтальмологам. Каждая мода (одночлен) полинома Цернике включает два компонента:

1. Радиальный компонент — расстояние от центра зрачка, стоящее в одночлене в определенной степени ($n = 0, 1, 2, \dots$). Он показывает, как много пиков и впадин имеет волновой фронт на определенном расстоянии от центра.
2. Меридионально-частотный компонент определяет, как часто повторяются пики и впадины вокруг зрачка.

Моды Цернике обычно записывают в виде:

$$Z_n^m$$

где n — целое число, показывающее степень, в которой находится расстояние в одночлене Цернике, а m — положительное или отрицательное число, характеризующее меридиональную частоту моды. Например, мода Z_3^1 — это третья степень расстояния от центра зрачка ($n=3$) и однократное синусоидальное изменение вокруг зрачка ($m=1$).

Обычно моды (одночлены) Цернике группируют по степени расстояния от центра зрачка (n). Каждая радиальная мода (члены степени n) состоит из одной или нескольких aberrационных мод с определенной меридиональной частотой (m). Полиномы Цернике представляют графически в виде пирамиды (рис.3), каждый уровень которой соответствует определенной степени радиального компонента (n).

Моды Цернике являются также функциями угла, образуемого меридианами зрачка, — синуса (если m отрицательное) или косинуса (если m положительное). Соответственно моды Z_n^m и Z_n^{-m} описывают одну и ту же форму aberrаций, но повернутые друг относительно друга. Это позволяет однозначно представлять aberrационные моды с вертикальным и горизонтальным компонентами (например, призму) или астигматизмом (с косыми осями, прямым и обратным). Моды с $m = 0$ содержат одночлены, которые не изменяются с углом вращения (зависят только от расстояния), и поэтому соответствуют aberrациям, имеющим ротационно-симметричную форму.

Особый интерес представляют три aberrационные моды второго порядка ($n = 2$), известные как aberrации второго

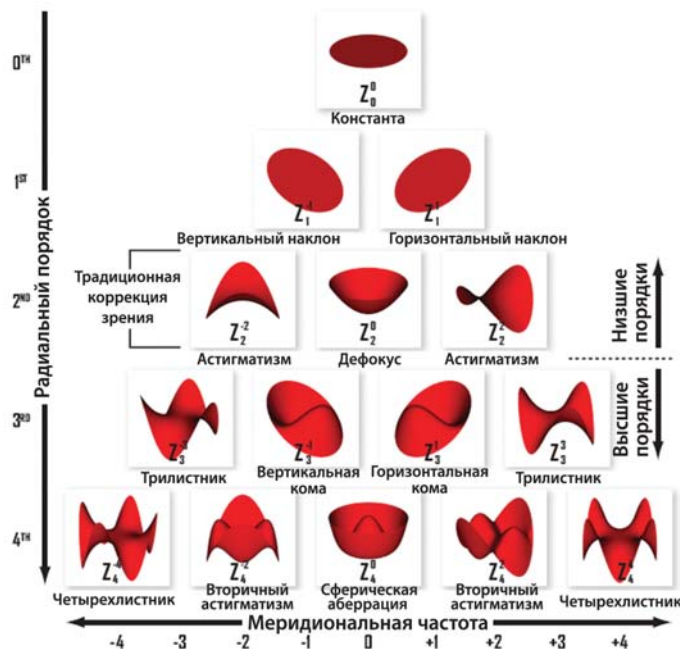


Рис. 3. Пирамида абберационных мод Цернике (показаны первые 4 порядка)

порядка. Это радиальный порядок соответствует привычному для офтальмологов искривлению (вергенции) волнового фронта. Центральная мода Z_0^0 – дефокус; она имеет форму параболоида и соответствует средней ошибке сферической силы волнового фронта. Две крайние моды второго порядка (Z_2^2 – и Z_2^{-2}), характеризующие астигматизм, имеют форму торической поверхности и определяют ошибку цилиндрической силы волнового фронта. Эта форма имеет положительную оптическую силу по одному главному меридиану, и отрицательную той же величины по другому главному меридиану, что дает нулевой сферический эквивалент (как и в случае кросс-цилиндра Джексона). Ось цилиндра прямо не указывается, поэтому для определения величины и ориентации цилиндра необходимо иметь два цилиндрических компонента (указывающих силу цилиндра между осями 45 или 135 градусов и 180 (прямой) или 90 (обратный)). Полная сила цилиндра определяется как векторная сумма этих двух компонентов.

Каждая мода Цернике имеет коэффициент C_n^m , который определяет вклад этой конкретной моды в общий волновой фронт для конкретного размера зрачка. Т.е. каждый коэффициент определяет величину (высоту пиков и впадин) конкретной абберационной моды (одночлена) в полиноме Цернике. Это позволяет представить волновой фронт сложной формы в виде набора абберационных мод



Рис. 4. Волновой фронт сложной формы может быть представлен в виде суммы базовых аббераций

определенной величины (рис.4). Эти коэффициенты находят, подгоняя полиномы Цернике под результаты измерений с помощью метода наименьших квадратов.

Полиномиальные функции Цернике ортогональны (независимы друг от друга) относительно вращения вокруг зрачка. Однако каждый полином «сбалансирован» с членами более низких степеней или того же порядка, чтобы минимизировать вариабельность полиномов Цернике. Эти особенности определяют следующие важные свойства³:

- Вклад каждой абберационной моды Цернике в суммарную ошибку волнового фронта определяется коэффициентом этой моды.
- Ошибка каждой абберационной моды задается квадратом соответствующего коэффициента.
- Полная ошибка волнового фронта равна сумме ошибок отдельных мод.
- Дополнительные абберационные моды Цернике могут только увеличить ошибку волнового фронта.
- Добавление абберационных мод более высоких порядков не влияет на моды более низких порядков.
- Исключение абберационных мод до определенного радиального порядка будет минимизировать полную ошибку волнового фронта до этого же порядка.

Абберации волнового фронта и качество изображения

Если нет оптических аббераций, то качество изображения, создаваемого оптической системой, ограничивается только *дифракцией* света, в результате которой свет слабо отклоняется или рассеивается на краю апертуры (отверстия оптической системы). Из-за дифракции изображение точечного источника света будет не таким четким и ярким как оригинал, а слегка размытым. Если апертура круглая, каким является зрачок глаза, то дифракция приводит к образованию изображения точечного источника света, получившего название картина Эйри (Airy), которая характеризуется ярким центральным диском максимальной яркости (диск Эйри), окруженным кольцами значительно менее яркими (рис.5). Дифракция находится в обратной зависимости от размера зрачка – она увеличивается с уменьшением зрачка.

Острота зрения – это наиболее распространенное субъективное измерение качества изображения в офтальмологии. Острота зрения представляет разрешающую силу глаза или его способность видеть два точечных объекта как отдельные. Остроту зрения часто выражают в виде дроби Снеллена, в числителе которых стоит расстояние, на котором обследуемый видит два мелких объекта отдельными (буквенные оптопеты Снеллена), а в знаменателе – расстояние, на котором два объекта будут видны глазом, соединенными дугой в одну угловую минуту. Этот угол считается минимальным угловым разрешением глаза с «нормальной» остротой зрения. Поскольку обследуемому предлагают узнавать оптопеты с прогрессивно убывающими размерами на фиксированном расстоянии, обычно на 6 метрах (В России острота зрения обычно оценивается по таблицам Сивцева или Головина, находящимся на расстоянии 5 метров), то это расстояние и является знаменателем дроби Снеллена.

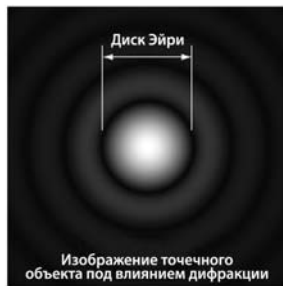


Рис.5. Дифракция на краю круглой апертуры света, исходящего от точечного источника света, приводит к образованию колец Эйри (на рисунке увеличен масштаб) – центральный яркий диск окружен кольцами с уменьшающейся яркостью.

Рис.6. Функция рассеяния точки для оптической системы с одной только дифракцией (слева) и системы со значительными aberrациями

Качество изображения, создаваемого оптической системой, в том числе и глаза, может быть измерено объективно, если определить aberrации волнового фронта.⁴ Существует 3 наиболее распространенных измерения качества изображения:

- Среднеквадратичная ошибка (RMS)
- Коэффициент Штреля для функции рассеяния точки (ФРТ)
- Функция передачи модуляции (MTF)

Среднеквадратичная ошибка показывает отличие волнового фронта с aberrациями от идеального волнового фронта в одной и той же плоскости. RMS эквивалентна стандартному отклонению ошибки измерений волнового

фронта в узлах стандартной матрицы измерений. В то же время RMS может быть вычислена по коэффициентам полиномов Цернике. Вклад aberrационных мод в полную RMS определяется векторной суммой соответствующих коэффициентов Цернике:

$$RMS = \sqrt{\sum (C_n^m)^2}$$

где каждый коэффициент Цернике C_n^m – коэффициент определенной моды. Ошибка RMS волнового фронта определенного радиального порядка может быть получена по коэффициентам Цернике мод вплоть до этого радиального порядка. ФРТ характеризует распределение интенсивности изображения точечного объекта в плоскости изображения, формируемого оптической системой. Из-за aberrаций и дифракции изображение точечного объекта получается размытым (рис.6). Изображение конечного объекта представляет собой совокупность изображений всех его точек, и таким образом по ФРТ для точек объекта можно оценить качество изображения всего объекта.

Коэффициент Штреля показывает отношение пика интенсивности aberrационной ФРТ к пику интенсивности ФРТ, полученной только из-за дифракции. Этот коэффициент изменяется в пределах от 0 до 100%. При этом 100% означает, что оптическая система лишена aberrаций. Aberrации вызывают размытие ФРТ – максимум функции уменьшается, и пик становится шире. В результате коэффициент Штреля становится меньше 100%.

Функция передачи модуляции показывает способность оптической системы воспроизводить контрастную модуляцию тестового изображения синусоидальной формы. Контраст тестового изображения – это отношение разницы между максимальным и минимальными уровнями яркости теста к среднему уровню яркости. Aberrации ухудшают способность оптической системы воспроизводить контрастную модуляцию. Поэтому функция MTF обычно уменьшается при увеличении пространственной частоты контраста (число циклов на 1 мм) исходного изображения (рис.7). Частотный порог обрезания функции – это максимальная пространственная частота, которая может быть воспроизведена оптической системой.

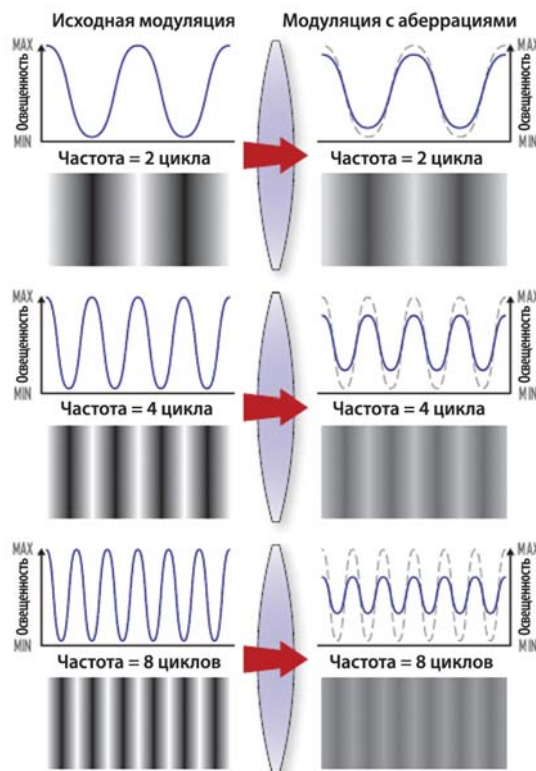


Рис.7. Из-за aberrаций волнового фронта и дифракции модуляция (или контраст), воспроизводимая оптической системой, обычно уменьшается с увеличением пространственной частоты оригинального тестового изображения

Окончание первой части в следующем номере.