

## Аберрации волнового фронта и очковые линзы Часть 2

Д.Мейстер, специалист Carl Zeiss Vision

В первой части статьи были рассмотрены фундаментальные оптические и математические понятия, связанные с аберрациями волнового фронта и качеством изображения, и показана роль полиномов Цернике для их описания. Во второй части статьи описано применение метода волнового фронта для анализа аберраций глаза и корректирующих очковых линз. Сегодня некоторые производители корректирующих очковых линз предлагают дизайны, которые минимизируют в линзах аберрации высших порядков. Такие очковые линзы, как правило, бывают двух типов, предоставляющих пользователям разные потенциальные зрительные преимущества:

1. Очковые линзы, которые характеризуют как «уменьшающие аберрации высших порядков линз», в большинстве случаев – прогрессивных.

2. Очковые линзы, которые характеризуют как «уменьшающие аберрации высших порядков глаза пользователя линзами».

### Аберрации волнового фронта очковых линз

Оптическая сила корректирующей линзы в действительности рассчитывается на основе некоторого математического приближения, которое строго выполняется только для параксиальной области линзы, т.е. в непосредственной близости от оптической оси линзы. На практике обычно используется именно эта аппроксимация. Так, сила «тонкой» линзы вдоль оптической оси определяется уравнением:

$$F = \frac{n-1}{r_1} + \frac{1-n}{r_2}$$

где  $r_1$  – радиус передней поверхности линзы в метрах,  $r_2$  – радиус задней поверхности в метрах, а  $n$  – показатель преломления материала линзы. Это относительно простое уравнение получается в случае аппроксимации малых углов из закона преломления Снеллена при малых углах падения световых лучей на линзу. В случае малых значений угла падения синус угла можно заменить на само значение угла в радианах. Однако точность этого приближения быстро убывает для точек на линзе, расположенных на значительном расстоянии от ее оптической оси, приводя к аберрациям волнового фронта как низших, так и высших порядков. Таким образом, приведенное выше уравнение при больших углах падения световых лучей на линзу или на

значительном расстоянии от оптической оси будет не точно описывать преломление световых лучей при их прохождении через линзу.

Многие специалисты-оптики хорошо знакомы с традиционными оптическими аберрациями, ухудшающими качество зрения через обычные очковые линзы, которые впервые были описаны немецким математиком и астрономом Людвигом Зейделем для ротационно-симметричных оптических систем. Волновой фронт, искаженный аберрациями Зейделя оптической системы для определенной точки на линзе или для определенного угла зрения через линзу, можно представить в виде суммы полиномов Цернике (абerrационных мод Цернике). Существует пять первичных оптических аберраций Зейделя (рис.1):

1. Кривизна поля возникает, когда световой пучок, проходящий через линзу, фокусируется вне пределов нужной поверхности изображения. Эта аберрация описывается в основном модой дефокуса ( $Z_2^0$ ).

2. Радиальный астигматизм возникает, когда пучок световых лучей, проходящий через линзу наклонно, фокусируется не в точку, а формирует астигматический фокус. Эта аберрация описывается в основном астигматическими модами Цернике ( $Z_2^{-2}$  и  $Z_2^2$ ), хотя и дефокус может быть включен в описание.

3. Сферическая аберрация Зейделя возникает, когда наружные лучи светового пучка преломляются сильнее или слабее, чем внутренние, параксиальные лучи, проходящие рядом с оптической осью. Эта аберрация описывается в основном сферической модой Цернике ( $Z_4^0$ ).

4. Аберрация кома появляется, когда внешние лучи косо падающего на линзу пучка, преломляются сильнее, чем внутренние. Эта аберрация характеризуется модами комы ( $Z_3^{-1}$  и  $Z_3^1$ ).

5. Аберрация сдвига возникает, когда степень увеличения изображений протяженных объектов увеличивается или уменьшается по мере удаления от оптической оси. Эта аберрация описывается в основном модами ( $Z_1^{-1}$  и  $Z_1^1$ ), хотя это искажение можно игнорировать в данном контексте, поскольку оно не сказывается на четкости изображения.

Функция, описывающая аберрации Зейделя, содержит члены, которые зависят от угла зрения, причем с увеличением угла зрения их величина обычно возрастает. Полиномы Цернике, с другой стороны, рассчитаны

тываются для одного значения угла зрения. Следовательно, для того, чтобы характеризовать aberrации волнового фронта линзы или оптической системы для широкого поля зрения с помощью полиномов Цернике, моды Цернике должны быть рассчитаны для многих углов зрения, соответствующих изменению направления линии взгляда через линзу.

Аберрации волнового фронта низших порядков, связанные с кривизной поля и радиальным астигматизмом, обычно наиболее значимы для качества зрения через обычные однофокальные или бифокальные очки линзы. Эти aberrации обычно уменьшают или исключают для достаточно широкого поля зрения, выбирая разумную базовую кривизну для передней поверхности или применяя асферический дизайн. Если очковая линза соответствует основным принципам оптических дизайнов, то aberrации низших порядков будут незначительными.

Положение очковой линзы в оправе также может индуцировать радиальный астигматизм, который приведет к нежелательным изменениям указанной в рецепте оптической силы, следствием чего станет ухудшение качества зрения. Увеличение силы сферы и силы индуцированного цилиндра происходит, когда очковая линза наклонена. Наклон линзы вызывает aberrации волнового фронта, которые характеризуются модами дефокус и астигматизм. Эти ошибки оптической силы являются функцией силы линзы и угла наклона. Для линз большой оптической силы aberrации низших порядков, вызванные изменением положения линзы в оправе относительно глаз пользователя очками, могут быть значительно больше, чем некорригированные aberrации высших порядков глаза или линзы.

Для тонкой очковой линзы с оптической силой  $F$  и пантоскопическим углом или углом изгиба плоскости оправы коэффициенты Цернике для дефокуса и прямого астигматизма ( $C_2^0$  и  $C_2^2$ ) описываются формулами:

$$F_H = F \left( 1 + \frac{\sin^2 \theta}{2n} \right) \quad C_2^0 = \frac{F_v + F_H}{-8\sqrt{3}} \rho^2$$

$$F_v = \frac{F_H}{\cos^2 \theta} \quad C_2^2 = \frac{F_v - F_H}{4\sqrt{6}} \rho^2$$

где  $F_H$  – оптическая сила по горизонтальному меридиану,  $F_v$  – по вертикальному меридиану,  $n$  – показатель преломления материала линзы,  $\rho$  – радиус зрачка в мм, а  $\theta$  – угол наклона линзы. Для изгиба плоскости оправы знак  $C_2^2$  должен быть изменен с плюса на минус или наоборот. В этом упрощенном случае мода наклонного астигматизма ( $C_2^{-2}$ ) равна нулю.

Очковые линзы могут также индуцировать aberrации волнового фронта высших порядков, такие как сферическая aberrация и кома, особенно для линз большой оптической силы. Сферическая aberrация возникает из-за увеличения силы рефракции в зонах на поверхности линзы, лежащих далеко от ее оптической оси (лучи, проходящие через периферию линзы, преломляются сильнее и фокусируются ближе к

линзе, чем лучи, проходящие рядом с оптической осью). Кома возникает из-за изменений рефракционной силы, которые влияют на формирование изображения точек протяженного объекта, расположенных вдали от оптической оси. К счастью, относительно малые размеры зрачка глаза ограничивают область линзы, используемую для фокусирования световых лучей от точек объекта, и значительно уменьшают влияние этих двух типов aberrаций (рис.2).

Однофокальные и бифокальные линзы правильных дизайнов обычно индуцируют лишь незначительную величину aberrаций низших и высших порядков для большинства значительных уровней оптической силы линз. Оптические ограничения прогрессивных линз, с другой стороны, индуцируют значительные уровни aberrаций как низших, так и высших порядков. В любом случае минимизация aberrаций волнового фронта, индуцированных очковой линзой, не обеспечит пользователю очками зрение лучше, чем его наилучшая острота зрения с коррекцией.

*(Окончание в следующем номере)*

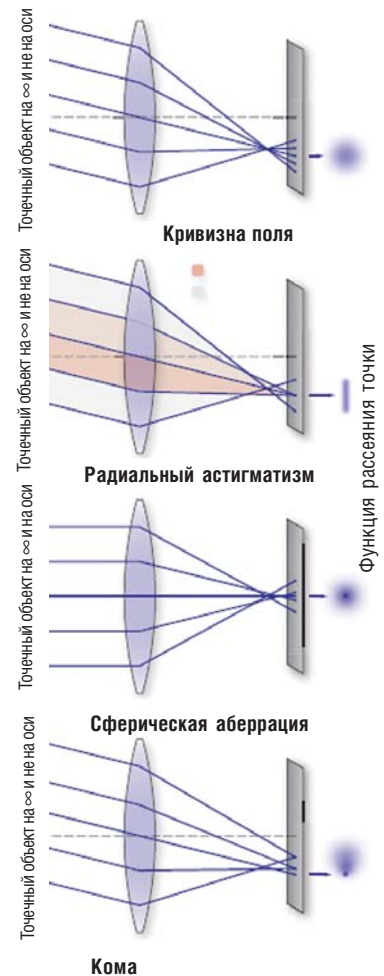


Рис. 1. Первичные aberrации Зейделя, ухудшающие четкость изображения, включают кривизну поля, радиальный астигматизм, сферическую aberrацию и кому.

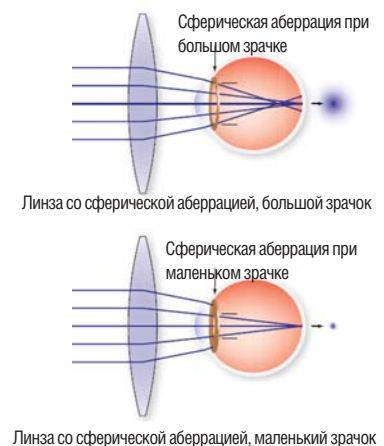


Рис.2. Небольшая апертура глаза (диаметр зрачка) эффективно ограничивает величину сферической aberrации и комы, индуцируемых очковыми линзами.