

## Аберрации волнового фронта и очковые линзы Часть 1 (окончание)

Д.Мейстер, специалист Carl Zeiss Vision

### Волновые аберрации глаза

В офтальмологической оптике полиномы Цернике разных радиальных порядков разделяют на две группы – аберрации низших порядков и аберрации высших порядков. Аберрации низших порядков – это моды Цернике второго порядка и ниже ( $n \leq 2$ ). Аберрации высших порядков – моды третьего и выше порядков ( $n > 3$ ):

- Аберрации низших порядков включают дефокус ( $Z_0^0$ ) и астигматизм ( $Z_2^{-2}$ ) и ( $Z_2^{+2}$ ), которые связаны с силой сферы и цилиндра глаза или линзы, соответственно.

- Аберрации высших порядков включают вертикальную и горизонтальную кому ( $Z_3^{-1}$ ) и ( $Z_3^{+1}$ ), трилистник ( $Z_3^{-3}$  и ( $Z_3^{+3}$ ), сферическую аберрацию ( $Z_4^0$ ) и др.

- Аберрации первого порядка  $Z_1^{-1}$  и  $Z_1^{+1}$  (вертикальная и горизонтальная призмы) формально также относятся к аберрациям низших порядков (как и нулевая мода  $Z_0^0$ ). Однако при измерении качества сфокусированного изображения их обычно игнорируют.

Хотя порядок полиномов Цернике неограниченно возрастает, аберрации волнового фронта нормального глаза человека обычно достаточно полно описываются первыми 6 или 7 порядками. Аберрации низших порядков характеризуют значительное отличие аберрационного волнового фронта от идеальной формы, требующее размещения фокуса в нужном месте. Такие аберрации обычно значительно ухудшают качество зрения нормальным глазом. Аберрации низших порядков традиционно корректируют очковыми или контактными линзами.

Аберрации высших порядков характеризуют более тонкие отличия волнового фронта от идеальной формы. Для большинства глаз аберрации высших порядков обычно менее значимы по сравнению с аберрациями низших порядков. Хотя при некоторых состояниях глаза, например при кератоконусе, могут быть значительные аберрации высших порядков (например, нерегулярный астигматизм). Отметим также, что влияние аберраций высших порядков на зрение обычно нельзя почувствовать, пока не скорректированы аберрации низших порядков (дефокус и астигматизм).

Исследования показали, что аберрации низших порядков составляют более 90% всех аберраций волнового фронта, почти 80% из них – это дефокус (миопия и гиперметропия). Эти исследования также установили, что RMS ошибки волнового фронта для аберраций высших порядков составляет в среднем приблизительно

0,30–0,35 мкм для зрачка 6 мм, что эквивалентно дефокусу второго порядка 0,25–0,30 D.<sup>5,6</sup> Аберрации высших порядков обычно меньше остаточной величины дефокуса и астигматизма после коррекции зрения линзами с шагом 0,25 D. Аберрации высших порядков обычно уменьшаются с увеличением радиального порядка моды и сильно колеблются от индивидуума к индивидууму. Более того, они изменяются в течение дня и зависят от аккомодации.

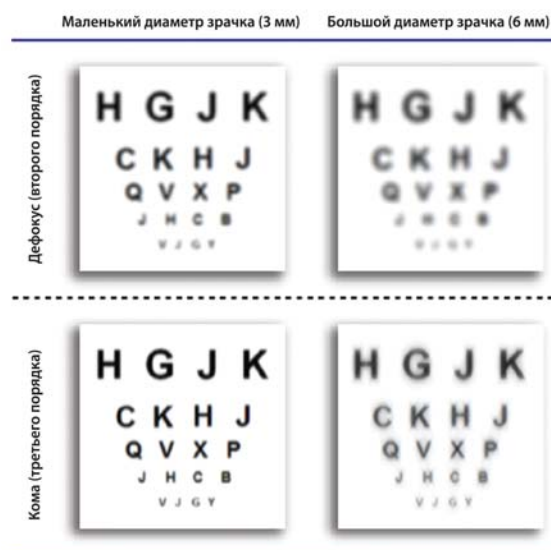
Поскольку аберрации высших порядков возрастают с увеличением зрачка, то они сильнее влияют на качество зрения при низких уровнях освещенности, когда зрачок расширен (рис.8). Аберрации высших порядков ухудшают качество изображения в результате ухудшения контраста изображения и приводят к образованию гало и подобных ему эффектов вокруг ярких источников света ночью. Они также усиливают ночную миопию. Более того, поскольку при вождении ночью максимальное качество зрения особенно важно, чтобы свести к минимуму время для принятия правильного решения, то дополнительные аберрации высших порядков в этих условиях могут повлиять даже на безопасность вождения.

Обычно офтальмологи и оптометристы хорошо знакомы с проявлением аберраций волнового фронта низших порядков. Некорректированные аберрации второго порядка, такие как дефокус и астигматизм, вызывают размытие изображения и снижение остроты зрения, которые зависят от величины рефракционной ошибки. Только коэффициенты мод Цернике второго порядка имеют прямую связь с оптической силой сферы и цилиндра в диоптриях. Интерпретировать влияние аберраций высших порядков на зрение более сложно. Если предположить, что моды Цернике с одинаковыми ошибками волнового фронта RMS в равной степени ухудшают зрение, то можно связать любую моду Цернике с дефокусом второго порядка. Это позволяет выразить любую аберрационную моду в «сферическом эквиваленте» (SE) в диоптриях с помощью выражения:

$$SE = \frac{-4\sqrt{3}}{\rho^2} C_n^m$$

где  $C_n^m$  – коэффициент интересующей моды Цернике в мкм, а  $\rho$  – радиус зрачка (мм), при котором этот коэффициент был получен.

Различные моды Цернике оказывают разное влияние на зрение. Поэтому результат, полученный по

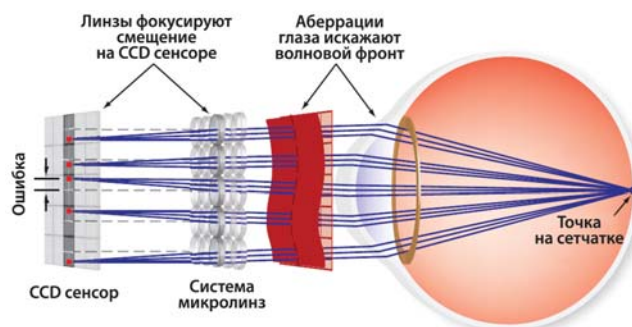


**Рис. 8.** Аберрации низших порядков значительно ухудшают качество изображения даже при небольших размерах зрачка, в то время как аберрации высших порядков сказываются при больших диаметрах зрачка

приведенному выше уравнению, следует интерпретировать с осторожностью. Аберрационные моды с большими меридианными частотами, расположенные далеко от центральной оси пирамиды Цернике, часто оказывают меньшее влияние на качество зрения, чем моды с меньшей частотой. Кроме того, моды Цернике с одинаковыми меридианными частотами, но с разными радианными порядками, могут взаимодействовать друг с другом, ухудшая или улучшая качество зрения.<sup>7</sup>

С помощью сферических и цилиндрических линз в ходе обследования зрения пациента определяется приблизительная коррекция аберраций второго порядка (дефокус и астигматизм). Однако эта рефракция зависит от аберраций высших порядков глаза. При объективном исследовании рефракции на основе измерений волнового фронта следует принимать во внимание сложное взаимодействие между аберрациями низших и высших порядков, которое, в конечном счете, приводит к субъективному определению наилучшего положения фокуса. Для измерения аберраций высших порядков глаза применяется специальное оборудование с сенсором волнового фронта, обычно называемое аберрометром. Так же как корнеотопограф обеспечивает более точную информацию о форме роговицы по сравнению с традиционным кератометром, так и аберрометры предоставляют больше информации об оптике глаза, чем обычный авторефрактометр.

Многие аберрометры работают на основе принципа Шака-Хартмана. Точечный источник света в аберрометре, являющийся для глаза удаленным на бесконечность объектом, проецируется на сетчатку. Изображение этого источника далее для прибора является точечным объектом. Свет, исходящий из этого точечного изображения на сетчатке, после выхода из глаза проходит через систему микролинз. Эти линзы



**Рис. 9.** Многие аберрометры используют сенсор волнового фронта, работающего на основе принципа Шака-Хартмана (измеряется отклонение волнового фронта, проходящего через большой массив маленьких линз)

воспринимают оптику глаза по всему зрачку. Далее каждая линза фокусирует свет на CCD (ПЗС) сенсоре. В идеальном случае свет, отраженный от сетчатки, должен после выхода из глаза при расслабленной аккомодации формировать плоский волновой фронт. Любое отличие реального волнового фронта от идеального вызывает отклонение лучей, проходящих через систему микролинз. Отклонение для каждой такой линзочки измеряется и используется для моделирования ошибок волнового фронта глаза (рис. 9).

## Выводы

- Аберрации волнового фронта – это один из имеющихся способов для описания ошибок фокусирования оптической системы.
- Полиномы Цернике – это удобное для практических целей описание аберраций волнового фронта, представляющее ряд полезных возможностей.
- Аберрации низших порядков прямо связаны с традиционными силой сферы и цилиндра корригирующих линз, и они в основном определяют качество зрения.
- Аберрации высших порядков влияют сильнее при больших размерах зрачка или когда аберрации низших порядков полностью корригированы.

*2-я часть статьи будет напечатана в следующем номере.*

## Список литературы

1. MacRae S (2000). Supernormal vision, hypervision, and customised corneal ablation. J Cataract Refract Surg, 26(2), 154-157.
2. Thibos L, Hong X, Bradley A, and Cheng X (2002) Statistical variation of aberration structure and image quality in a normal population of healthy eyes. J Opt Soc Am A 19(12), 2329-2348.
3. Atchison D (2005) Recent advances in the measurement of monochromatic aberrations of human eyes. Clin Exp Optom 88(1), 5-27.
4. Marsack J, Thibos L, and Applegate R (2004) Metrics of optical quality derived from wave aberrations predict visual performance. Vis 4(8), 322-328.
5. Porter J, Guirao A, Cox I. and Williams D (2001) Monochromatic aberrations of the human eye in a large sample population. J Opt Soc Am A 18(8), 1793-1803.
6. Castejon-Mochon J, Lopez-Gil N, Benito A, Artal P (2002) Ocular wavefront aberration statistics in a normal young population. Vis Res 42(13), 1611-1617.
7. Applegate R, Marsack J, Ramos R, and Sarver E (2003). Interactions between aberrations can improve or reduce visual performance. J Cataract Refract Surg 29(8), 1487-1495.