

# Определение aberrаций глаза в присутствии спекл-поля

А.В.Ларичев\*, П.В.Иванов\*\*, Н.Г.Ирошников\*\*\*, В.И.Шмальгаузен\*\*\*

*Исследовано влияние спеклов на работу датчика волнового фронта Шарка–Гартмана при определении aberrаций глаза. Экспериментально определена зависимость погрешности измерения фазовых искажений от характерного размера спеклов. Для подавления спекл-структуры лазерного пучка, рассеянного сетчаткой, использовалось сканирование опорного источника. Разработанная методика позволяет исследовать зависимость aberrаций человеческого глаза от времени с разрешением 30 мс.*

**Ключевые слова:** aberrации глаза, датчик волнового фронта Шарка–Гартмана, спеклы.

## 1. Введение

Спекл-поле, возникающее при рассеянии лазерного пучка в случайной среде, часто является одним из основных факторов, ограничивающих качество работы датчиков волнового фронта [1–3]. Задачи исследования влияния спеклов на работу датчиков волнового фронта можно разделить на две основные группы. К первой группе относится определение фазы самого спекл-поля, а ко второй – определение крупномасштабных фазовых искажений в присутствии спеклов. Такая проблема возникает, например, при измерении aberrаций человеческого глаза с использованием когерентной подсветки. Для этой цели излучение лазера фокусируется на сетчатке, образуя виртуальный опорный источник. Рассеянное излучение, вышедшее из глаза, направляется на датчик волнового фронта. Вследствие микроструктуры сетчатки (мозаика фоторецепторов, микрососуды и капилляры) образуется спекл-поле, которое существенно понижает точность определения aberrаций. В задачах такого рода случайную модуляцию фазы и интенсивности спекл-поля можно рассматривать как помеху при определении крупномасштабных фазовых искажений.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование влияния спекл-поля на точность измерения aberrаций человеческого глаза с помощью датчика волнового фронта Шарка–Гартмана [4].

## 2. Экспериментальная установка

В работах [5–8] было показано, что амплитуда aberrаций человеческого глаза обычно резко уменьшается с увеличением их порядка. Это позволяет использовать

для определения этих aberrаций датчик Шарка–Гартмана.

Для определения aberrаций глаза и исследования влияния спеклов на работу датчика волнового фронта была создана экспериментальная установка, показанная на рис.1. Пучок полупроводникового лазера 1 ( $\lambda = 0.67$  мкм) проходит диафрагму (на схеме не показана) диаметром 0.8 мм. Диафрагма, во-первых, понижает мощность излучения, падающего в глаз, и, во-вторых, уменьшает фазовые искажения, приобретаемые пучком до падения на сетчатку, что позволяет выполнить условия измерения по однопроходной схеме. После прохождения поляризационного делительного кубика 2, конфокально расположенных линз 3, 5, 8 и зеркал 4, 6, 7 пучок падает в глаз 9 и фокусируется на сетчатке, образуя опорный источник света. Мощность излучения, попадающего в глаз, составляет 30 мкВт, что на порядок меньше предельно допустимой [9, 10].

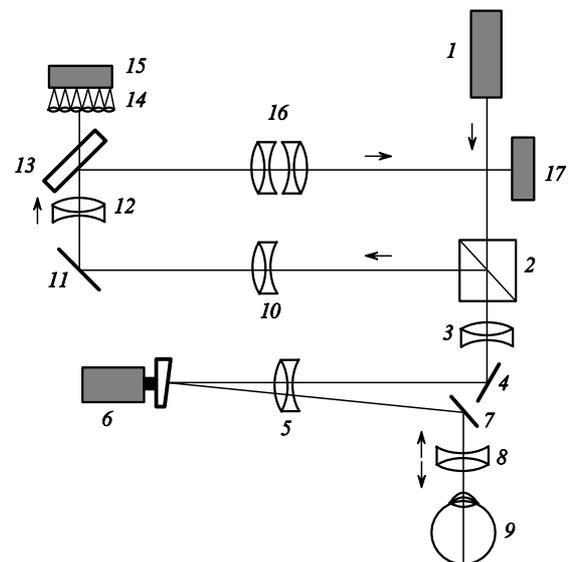


Рис.1. Схема экспериментальной установки: 1 – лазер; 2 – делительный кубик; 3, 5, 8, 10, 12, 16 – линзы; 4, 7, 11 – зеркала; 6 – зеркало-сканер; 9 – глаз; 13 – делительная пластинка; 14 – датчик волнового фронта Шарка–Гартмана; 15, 17 – ПЗС-камеры.

\*Международный учебно-научный лазерный центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы; e-mail: larichev@iname.ru

\*\*Институт проблем лазерных информационных технологий РАН, Россия, 140700 Шатура, Московская обл., Святозерская ул., 1; e-mail: ivpavel@iname.ru

\*\*\*Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119899 Москва, Воробьевы горы

Определение aberrаций глаза сводится к определению крупномасштабных фазовых искажений в плоскости зрачка глаза. Излучение, вышедшее из глаза, проходит в обратном направлении линзы 8, 5, 3, отражается от зеркал 7, 6, 4 и падает на поляризационный кубик 2. Кубик установлен так, что устраняет поляризованные блики и направляет на датчик только часть деполаризованного излучения, рассеянного сетчаткой. Далее свет проходит через конфокально расположенные линзы 10, 12, отражается от зеркала 11 и падает на линзовый растр датчика волнового фронта Шарка – Гартмана 14, который расположен в плоскости, оптически сопряженной с плоскостью зрачка глаза.

Каждая линза растра (субапертура) имеет размер  $A_{\text{sub}} = 0.5$  мм и фокусное расстояние  $F_{\text{sub}} = 25$  мм. При диаметре зрачка, равном 6 мм, излучение, вышедшее из глаза, освещает порядка 80 субапертур растра. Линзы датчика разделяют исследуемый волновой фронт, образуя в фокальной плоскости массив пятен (гартманограмму). Каждое пятно гартманограммы является изображением опорного источника на сетчатке. Полученная гартманограмма регистрируется ПЗС-камерой 15, находящейся в фокальной плоскости линзового растра, и заносится в память компьютера с частотой 30 кадр./с и разрешением  $640 \times 480$  точек. Время обработки гартманограммы составляет 8 мс. Волновой фронт восстанавливается методом наименьших квадратов [4] в виде разложения по 36 полиномам Цернике [11].

Свет, отклоненный делительной пластинкой 13, проходит через линзу 16 и регистрируется второй ПЗС-камерой 17, которая расположена в плоскости, оптически сопряженной с плоскостью зрачка глаза. Эта камера используется для наблюдения спекл-поля.

Спекл-структура поля, рассеянного сетчаткой, понижает точность определения aberrаций. В работе [7] показано, что благодаря движениям глаза временное интегрирование позволяет существенно подавить спеклы. Однако такой режим работы системы не позволяет измерять aberrации глаза с высокой скоростью. В нашей системе используется другой метод подавления спеклов – сканирование положения опорного источника. Для этой цели зеркало 6 было закреплено на оси вращения электромотора под небольшим углом, равным  $0.5^\circ$ . При вращении зеркала отраженный лазерный пучок описывает конус, вызывая смещение опорного источника на сетчатке, и вследствие этого изменение спекл-структуры.

В общем случае наклон волнового фронта, вносимый зеркалом сканера, может вызывать нежелательное смещение пятен гартманограммы. Для устранения этого эффекта оптическая схема организована так, что пучок, вышедший из глаза, вторично отражается от зеркала сканера, поэтому вносимые этим зеркалом наклоны компенсируются. В нашем случае опорный источник описывает на сетчатке окружность диаметром 150 мкм, при этом пятна гартманограммы остаются неподвижными. При частоте вращения электромотора 50 об./с характерное время изменения спеклов было много меньше времени интегрирования ПЗС-камеры (30 мс) и спеклы эффективно усреднялись.

### 3. Методика обработки гартманограммы

При подаче на вход датчика пучка с искаженным волновым фронтом каждое пятно гартманограммы сдвигается относительно оси субапертуры.

В приближении геометрической оптики локальные наклоны волнового фронта  $\varphi_x, \varphi_y$  в пределах данной субапертуры пропорциональны смещениям пятна  $\Delta x, \Delta y$ :  $\varphi_x = \Delta x / F_{\text{sub}}, \varphi_y = \Delta y / F_{\text{sub}}$ .

На практике смещения пятен определяются относительно опорной гартманограммы, соответствующей плоскому волновому фронту. Широкое распространение получили два алгоритма определения положения пятен: метод центра масс и метод, основанный на аппроксимации распределения интенсивности в пятне поверхностью второго порядка [12]. В методе центра масс координаты пятна  $x, y$  в пределах субапертуры определяются по формулам

$$x = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{ij} x_i}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{ij}}, \quad y = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{ij} y_j}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n I_{ij}}, \quad (1)$$

где суммирование проводится по области гартманограммы, соответствующей одной субапертуре линзового растра;  $I_{ij}$  – интенсивность в точке с координатами  $x_i, y_j$ . В отсутствие шума смещение центра масс пятна пропорционально среднему по субапертуре наклону волнового фронта.

Во втором алгоритме профиль интенсивности пятна аппроксимируется поверхностью

$$S(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + g, \quad (2)$$

где  $a, b, c, d, e, g$  – неизвестные параметры, которые определяются из условия минимума среднеквадратичной невязки. Координаты максимума функции  $S(x, y)$  принимаются за истинное положение центра пятна.

В общем случае координаты центров пятен, найденных с помощью этих алгоритмов, не совпадают. Второй метод менее чувствителен к шуму, однако для его применения необходимо, чтобы распределение интенсивности в пятне не имело ярко выраженных локальных экстремумов. При наличии спеклов форма пятен теряет симметричность и становится нерегулярной. В этом случае предпочтительнее использовать метод центра масс. В нашей программе для определения положения пятен были реализованы оба алгоритма. В случае пятен с монотонным, близким к дифракционно-ограниченному распределением интенсивности использовалась аппроксимация поверхностью второго порядка, дающая высокую точность определения положения пятен. В противном случае применялся алгоритм центра масс.

### 4. Калибровка системы

Оптическая схема (см. рис.1) отображает плоскость зрачка глаза в плоскость линзового растра с некоторым увеличением  $q$ , что приводит к изменению локальных наклонов волнового фронта. Таким образом, для определения волнового фронта в плоскости зрачка глаза локальные наклоны, измеренные в плоскости датчика, нужно разделить на  $q$ . В общем случае, зная фокусные расстояния линз и их положение, можно вычислить увеличение системы. Однако на практике следует учитывать неидеальность оптической системы, производственные

допуски на фокусные расстояния линз и неточность их установки. Это приводит к возникновению поправочного калибровочного множителя  $\delta$ , который нужно определять экспериментально.

Для определения поправки  $\delta$  использовалась модель глаза, состоящая из линзы с фокусным расстоянием  $f = 25$  мм и рассеивателя (стекловолоконной шайбы с диаметром волокна 6 мкм), имитирующего сетчатку глаза. Лазерный пучок фокусировался линзой на передней плоской грани шайбы. Далее свет распространялся вдоль волокон, отражался от задней грани шайбы, распространялся в обратном направлении и создавал опорный источник на передней поверхности шайбы. Фазы излучения, вышедшего из различных волокон, практически не коррелированы. Для уменьшения мощности излучения, вышедшего из модели глаза, перед шайбой располагался фильтр. Стекловолоконная шайба крепилась на микрометрическом столике, что позволяло перемещать ее с погрешностью 10 мкм. На рис.2 изображены распределения интенсивности в плоскости зрачка модели глаза и гартманогаммы при выключенном и включенном сканере. Видно, что сканер позволяет эффективно подавить спекл-структуру и повысить качество гартманогаммы.

Калибровка системы проводилась при включенном сканере. Для получения опорной гартманогаммы стекловолоконная шайба располагалась строго в фокальной плоскости линзы. Волновой фронт в плоскости зрачка глаза в этом случае был плоским. Следует отметить, что при регистрации опорной гартманогаммы свет распространялся по всему оптическому тракту и первоначально плоский пучок приобретал фазовые искажения, обусловленные aberrациями системы. Поскольку смещения пятен определялись относительно опорной гартманогаммы, дальнейшие измерения были нечувствительны к собственным aberrациям системы.

Дефокусировка модели глаза  $D$ , выраженная в диоптриях, определяется следующим выражением:

$$D = \frac{A_{\text{rel}}}{(1 + A_{\text{rel}})}, \quad A_{\text{rel}} = \frac{\Delta}{f}, \quad (3)$$

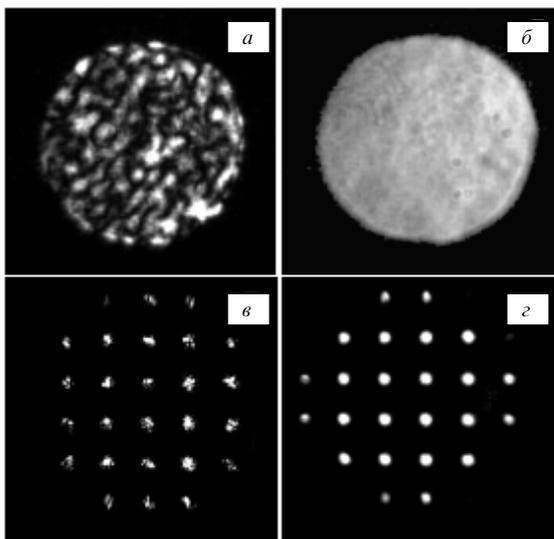


Рис.2. Распределения интенсивности в плоскости зрачка модели глаза (а, б) и гартманогаммы (в, г) при выключенном (а, в) и включенном (б, г) сканере.

где  $\Delta$  – смещение передней грани стекловолоконной шайбы от фокальной плоскости линзы. Для калибровки системы экспериментально и теоретически (по формуле (3)) определялась зависимость  $D$  от расстояния между линзой и рассеивателем. Калибровочный коэффициент  $\delta$  подбирался так, чтобы различие между экспериментальной и теоретической кривыми было минимальным. Дефокусировка, измеренная на нашей установке, отличалась от теоретической не больше чем на 2%. При этом стандартное отклонение экспериментальных значений (каждая точка получена при усреднении по 20 реализациям) не превышало 0.002 диоптрии.

## 5. Исследование влияния спекл-поля на точность восстановления волнового фронта

Статистика спекл-поля зависит от диаметра засвеченного пятна на рассеивателе – например, размер спеклов максимален, когда передняя грань стекловолоконной шайбы расположена в фокальной плоскости линзы. Смещение линзы вдоль оптической оси приводит к изменению размера засвеченного пятна и вследствие этого к изменению размеров спеклов.

Корреляционный радиус спекл-поля  $r_{\text{cor}}$  определялся по уровню  $1/e$  структурной функции интенсивности:

$$G(\Delta r) = \left\langle [I(r + \Delta r) - I(r)]^2 \right\rangle,$$

где  $I(r)$  – распределение интенсивности в спекл-поле;  $\Delta r$  – поперечный сдвиг; угловые скобки обозначают усреднение по пространству. В случае статистически-однородного поля усреднение по пространству эквивалентно усреднению по ансамблю различных реализаций спеклов. Это свойство использовалось при вычислении структурной функции и погрешности восстановления волнового фронта.

В экспериментах стекловолоконная шайба смещалась в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Таким образом набиралась статистика различных реализаций спекл-поля. Характерный масштаб спеклов, определяемый расстоянием между линзой и рассеивателем, при этом не менялся. Для различных реализаций спекл-поля при выключенном сканере измерялся волновой фронт. По набранному ансамблю коэффициентов Цернике находилось их среднее квадратичное отклонение  $\sigma_i = \langle (a_i - \langle a_i \rangle)^2 \rangle$  ( $a_i$  –  $i$ -й коэффициент Цернике), характеризующее погрешность восстановления фазы, связанную с наличием спеклов. Затем стекловолоконная шайба перемещалась в продольном направлении, размер спеклов при этом менялся и процедура определения погрешности повторялась.

На рис.3 показаны распределения интенсивности в спекл-поле и гартманогаммы для двух отношений корреляционного радиуса к размеру субапертуры:  $r_{\text{cor}}/A_{\text{sub}} = 0.3$  (крупные спеклы, рис.3,а,в) и  $r_{\text{cor}}/A_{\text{sub}} = 0.07$  (мелкие спеклы, рис.3,б,г), а также структурные функции модуляции интенсивности (рис.3,д). Следует отметить, что визуальный размер спеклов в несколько раз превышает корреляционный радиус  $r_{\text{cor}}$ .

Из рис.3,г видно, что пятна гартманогаммы расщепляются, когда характерный размер спеклов меньше размера субапертуры, а это приводит к возникновению дополнительных экстремумов. В данном случае необходимо использовать метод центра масс, который в отсут-

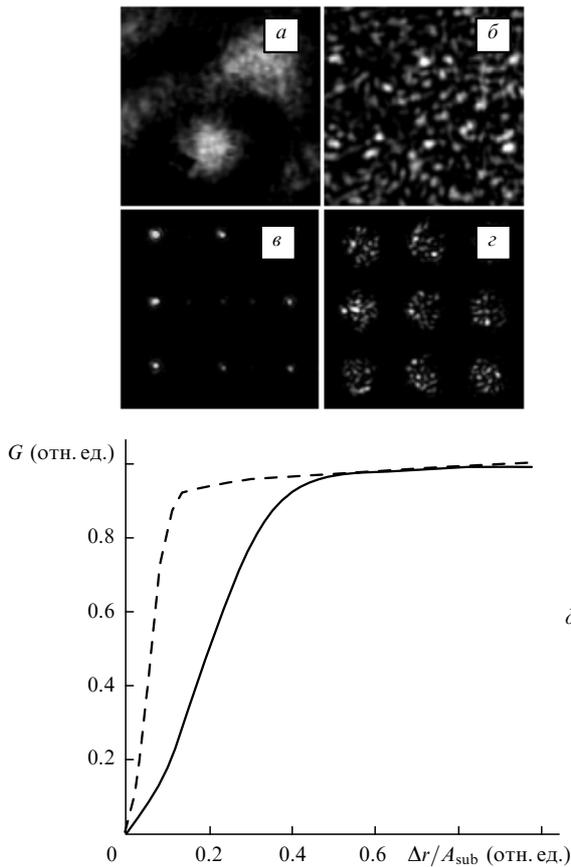


Рис.3. Распределения интенсивности в спекл-поле (*a, b*) и гартманогаммы (*e, z*) в случае крупных (*a, e*) и мелких (*b, z*) спеклов, а также структурные функции модуляции интенсивности *G*, соответствующие крупным (сплошная линия) и мелким (штриховая линия) спеклам (*d*).

ствие шума дает средний по субапертуре наклон волнового фронта независимо от размера фазовых неоднородностей. Когда характерный размер спеклов превышает размер субапертуры, распределение интенсивности внутри каждого пятна стремится к дифракционно-ограниченному. Однако, как видно из рис.3,*e*, часть пятен, соответствующих субапертурам, на которые попали темные спеклы, имеют низкую интенсивность, сравнимую с шумом. Точность определения центров таких пятен невысока, поэтому, обрабатывая гартманогамму, их необходимо отбрасывать, что приводит к понижению точности определения фазы.

На рис.4 представлены зависимости средней погрешности  $\sigma$  определения коэффициентов Цернике различных порядков (в данном случае порядок полинома определяется наивысшей степенью его радиального аргумента  $r$ ) (рис.4,*a*) и относительной погрешности определения дефокусировки  $\sigma_{rel} = \sigma_3/a_3$  (рис.4,*b*) от отношения радиуса корреляции спекл-поля к размеру субапертуры датчика Шарка – Гартмана  $r_{cor}/A_{sub}$ . Экспериментальные зависимости усреднялись по 20 различным реализациям спекл-поля. Как видно из рис.4, для полинома каждого порядка при уменьшении размера спеклов погрешность  $\sigma$  увеличивается, что объясняется понижением точности определения положения пятен. При крупных спеклах основной вклад в погрешность восстановления волнового фронта вносят случайные плавные фазовые искажения самого спекл-поля. Кроме того, к увеличению погрешности при-

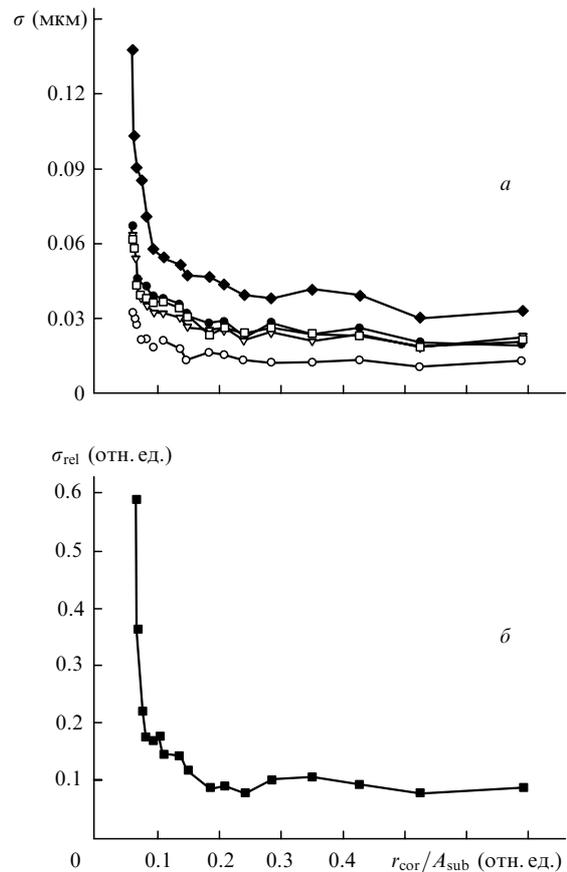


Рис.4. Зависимости среднестатистического отклонения коэффициентов Цернике  $\sigma$  первого ( $\blacklozenge$ ), второго ( $\bullet$ ), третьего ( $\nabla$ ), четвертого ( $\square$ ) и пятого ( $\circ$ ) порядков (*a*) и относительной погрешности определения дефокусировки  $\sigma_{rel}$  (*b*) от отношения корреляционного радиуса спекл-поля к размеру субапертуры  $r_{cor}/A_{sub}$ .

водит уменьшение числа пятен, обладающих достаточной для их обработки интенсивностью. Из рис.4 видно, что существует диапазон изменения  $r_{cor}/A_{sub} = 0.2 - 0.7$ , в котором погрешность определения коэффициентов Цернике меняется слабо и не превышает 0.05 мкм, а относительная погрешность определения дефокуса не превышает 10 %.

### 6. Измерения aberrаций человеческого глаза

Аберрации реального человеческого глаза измерялись при включенной системе сканирования. При этом волновой фронт регистрировался с частотой 30 Гц. Следует отметить, что сканирование позволяло не только подавить спекл-структуру, но и уменьшить примерно в 30 раз среднюю интенсивность лазерного излучения на сетчатке глаза.

В отличие от модельного глаза, в реальном глазу человека могут наблюдаться временные флуктуации aberrаций, связанные с аккомодацией, микродвижениями глаза (саккадами) и т. д. Мы наблюдали изменения aberrаций глаза во времени. На рис.5 представлены амплитуды aberrаций  $a_i$ , измеренные в течение 20 с. Зрачок глаза был расширен до 6 мм с помощью мидриатических глазных капель (Phenylephrine Hydrochloride 2.5 %), непарализующих аккомодацию. Из рис.5 видно, что в исследуемом глазу основными aberrациями являются дефокусировка и астигматизм. Резкий рост амплитуды aberrаций на

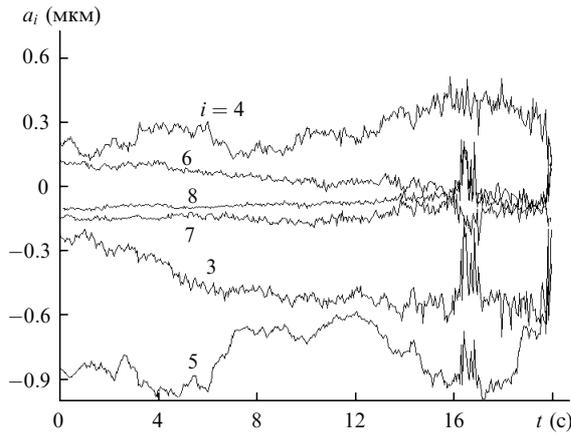


Рис.5. Зависимости амплитуд  $a_i$  дефокусировки ( $i = 3$ ), астигматизма ( $i = 4, 5$  по  $x, y$ ), комы ( $i = 6, 7$  по  $x, y$ ) и сферической aberrации ( $i = 8$ ) глаза от времени.

отрезке времени с 16-й по 18-ю секунду связан с появлением слезы.

На рис.6 приведены усредненная по 10 первым коэффициентам Цернике нормированная спектральная плотность флуктуаций aberrаций  $S(\nu)$ , а также ее линейная аппроксимация. В области частот ниже 5 Гц спектр aberrаций спадает со скоростью приблизительно 4 дБ/октава. При более высоких частотах спектральная плотность флуктуаций aberrаций глаза сравнима с шумами усановки.

## 7. Обсуждение результатов

Исследование влияния спеклов на работу датчика волнового фронта Шарка–Гартмана показало, что погрешность восстановления фазы связана с ухудшением качества регистрируемой гартманогаммы. Когда размер спеклов превышает размер субапертуры датчика, основной вклад в погрешность определения фазы вносит случайная фазовая модуляция самого спекл-поля. Кроме того, некоторые пятна гартманогаммы, обладающие низкой интенсивностью, при обработке сигнала приходится исключать. В данном случае использование ПЗС-камеры с широким динамическим диапазоном позволит увеличить число пятен, доступных для анализа. При мелких спеклах пятна гартманогаммы расщепляются, что тоже приводит к возрастанию погрешности определения их центров. Метод центра масс позволяет усреднить мелкомасштабную структуру внутри субапертуры и выделить плавно изменяющийся локальный наклон волнового фронта, связанный с aberrациями глаза.

При известной статистике спекл-поля подбором размера субапертур датчика можно минимизировать погрешность определения крупномасштабных фазовых искажений. Измерения, проведенные на модели глаза, показали, что в интервале отношений корреляционного радиуса к субапертуре  $r_{\text{cor}}/A_{\text{sub}} = 0.2 - 0.7$  погрешность определения коэффициентов Цернике с использованием алгоритма центра масс мало изменяется и не превышает  $\lambda/15$ .

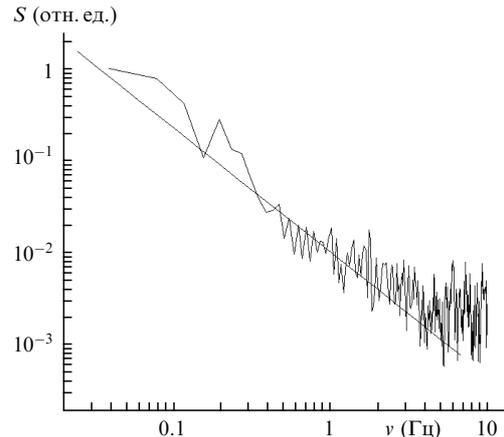


Рис.6. Нормированная спектральная плотность флуктуаций aberrаций, усредненная по десяти первым aberrациям, и ее линейная аппроксимация функцией  $\lg S = -2.0 - 1.35\nu$ .

Измерения, проведенные на реальном человеческом глазу, показали, что спекл-структура, образующаяся при рассеянии лазерного излучения на сетчатке, является основным фактором, ограничивающим точность восстановления волнового фронта. Сканирование опорного источника по сетчатке позволило эффективно подавить спекл-структуру, не понижая быстродействия системы. Следует отметить, что при сканировании опорный источник не должен выходить из области изопланатизма оптической системы глаза.

В эксперименте была обнаружена сильная зависимость aberrаций глаза от времени. Этот фактор, на наш взгляд, должен быть принят во внимание при хирургической коррекции зрения. Возможно, медицинские заключения должны быть основаны на средних по времени aberrациях глаза.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы НАТО «Наука во имя мира» (код проекта SFR 974292). Авторы благодарны К.С.Нестеруку за помощь в разработке программного обеспечения, а также А.Ю.Реснянскому за помощь в создании аппаратуры.

1. Strohbehn J.W. *Laser beam propagation in the atmosphere* (Berlin, Heidelberg, N.Y., Springer-Verlag, 1978).
2. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. *Принципы адаптивной оптики* (М., Наука, 1985).
3. Larichev A.V., Iroshnikov N.G., Nikolaev I.P., Nesterouk K.S., Kudryashov A.V. *Proc. SPIE*, **4162**, 158 (2000).
4. Воронцов М.А., Корябин А.В., Шмальгаузен В.И. *Управляемые оптические системы* (М., Наука, 1988).
5. Liang J., Williams D.R. *J.Opt.Soc.Amer.A*, **14**, 2873 (1997).
6. Liang J., Williams D.R., Miller D.T. *J.Opt.Soc.Amer.A*, **14**, 2884 (1997).
7. Liang J., Grimm B., Goels S., Bille J. *J.Opt.Soc.Amer.A*, **11**, 1949 (1994).
8. Haro L.D.S., Dainty J.C. *Optics Letts*, **24**, 61 (1999).
9. *American national standard for the safe use of lasers, ANSI Z136.1* (Orlando, FL, Laser Institute of America, 1993).
10. *Нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров, № 5804-91*.
11. Борн М., Вольф Э. *Основы оптики* (М., Наука, 1973).
12. Корябин А.В., Полежаев В.И., Шмальгаузен В.И. *Квантовая электроника*, **20**, 1031 (1993).