

СУБЪЕКТИВНАЯ АДАПТИВНАЯ КОРРЕКЦИЯ АБЕРРАЦИЙ ГЛАЗА ЧЕЛОВЕКА

© 2005 г. Г. В. Вдовин*, М. Ю. Локтев*, А. Н. Симонов*, В. В. Кийко**, С. А. Волков***

* Electronic Instrumentation Laboratory, TU Delft, The Netherlands
E-mail.: gleb@okotech.com

** Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва

*** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий механики и оптики, Санкт-Петербург

Показано, что острота зрительного восприятия человека может быть увеличена путем коррекции до 12 первых aberrаций глаза с помощью адаптивной оптической системы с обратной связью, основанной на субъективной оценке четкости восприятия рассматриваемого объекта. Испытуемые субъекты имели возможность корректировать четкость видения, изменяя амплитуду ортогональных мод деформируемого зеркала. Участники экспериментов с сильными aberrациями высоких порядков сообщали об умеренном или даже значительном улучшении остроты зрения при наблюдении тестовой таблицы USAF1951.

Коды OCIS: 330.1070.

Поступила в редакцию 02.11.2004.

Недавно было показано, что aberrации глаза человека можно измерить с помощью датчика волнового фронта [1], а разрешающая способность и острота зрения могут быть улучшены путем коррекции уже известных aberrаций [2–4].

Традиционный метод коррекции зрения с использованием очков дает хорошие результаты для исправления aberrаций глаза типа дефокусировки и астигматизма. Эффективность коррекции aberrаций глаза высших порядков оказывается очень чувствительной к рассогласованию оптических осей глаза и корректирующей оптики [5, 6]. Для успешной компенсации aberrаций (мод) высокого порядка корректор должен быть оптически сопряжен с глазным зрачком, а корректирующая оптика должна точно следовать за движениями глаза.

Технически такой корректор может быть реализован, например, как имплантируемая многоканальная жидкокристаллическая линза с несколькими степенями свободы [7]. Для управления несколькими корректирующими модами требуется многоканальная обратная связь.

Одним из способов реализации многоканальной обратной связи может стать метод “проб и ошибок” в ходе субъективной коррекции различных aberrаций низкого и высокого порядков. Метод предполагает субъективное улучшение четкости зрительного восприятия.

Для экспериментального исследования эффективности данного подхода была собрана установка, представленная на рис. 1. Установка содержит два контура обратной связи:

1. Контур “субъективной” обратной связи. Контур состоит из адаптивного деформируемого зеркала, оптически сопряженного со зрачком глаза человека, и тестового объекта – таблицы USAF1951, по-

мещенной “на бесконечности” перед телескопом. Участники эксперимента могли корректировать aberrации собственного глаза, изменяя амплитуду ортогональных мод деформируемого зеркала. Управление реализовано с помощью клавиатуры компьютера. Клавиша “UP” служила для увеличения амплитуды выбранной моды, “DOWN” – для уменьшения. Клавиши “LEFT” и “RIGHT” использовались для переключения корректируемых мод aberrации.

2. Второй контур обратной связи содержит также деформируемое зеркало (общее для обоих контуров) и датчик волнового фронта Гартмана, расположенный в сопряженной к зеркалу плоскости P_2 . Контур обратной связи работает с частотой обновления кадров 30 Гц и компенсирует нелинейность, гистерезис и ползучесть деформируемого зеркала. Система второго контура используется также и для формирования ортогональных мод поверхности зеркала.

По окончании цикла субъективной коррекции с ручной обратной связью форма поверхности дефор-

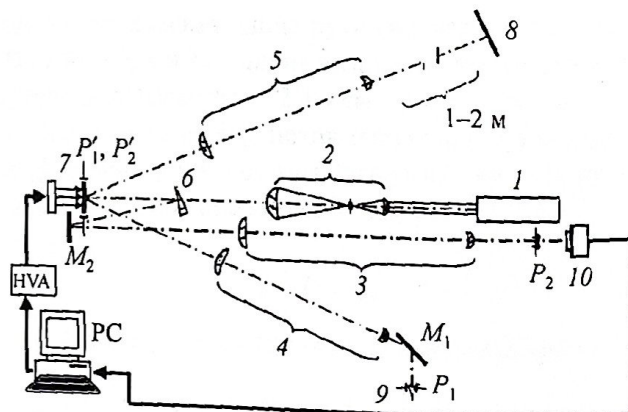


Рис. 1. Экспериментальная установка. 1 – He-Ne-лазер (543 нм), 2–5 – телескопы, 6 – клин, 7 – адаптивное зеркало, 8 – объектная плоскость, 9 – глаз, 10 – датчик ВФ, M_1 , M_2 – зеркала, PC – компьютер.

мируемого зеркала, отвечающая наилучшей коррекцией аберраций, измеряется датчиком волнового фронта Гармана с маской, имеющей 91 субапертуру.

В экспериментах были использованы представления аберраций в виде полиномов Цернике, а также в виде собственных мод системы, полученных при ортогонализации функции отклика зеркала. Результаты коррекции оценивались в терминах субъективного улучшения остроты зрительного восприятия, в то время как оптическая форма поверхности деформируемого зеркала измерялась объективно.

Эксперименты были выполнены с использованием двух типов деформируемых зеркал производства фирмы OKO Technologies (Нидерланды) [8]: 30-миллиметровые, 19-канальное пьезоэлектрическое зеркало и 39-канальное мембранное электростатически деформируемое зеркало (МЭДЗ). По причине большего хода (до 5 мкм на канал) пьезоэлектрическое зеркало позволяло воспроизвести моды низкого порядка с большей амплитудой, однако для устранения эффектов гистерезиса и ползучести зеркала требовалась непрерывная работа цепи обратной связи. МЭДЗ характеризуется меньшими амплитудами коррекции, но может быть применено для коррекции аберраций более высоких порядков. Кроме того, МЭДЗ позволяет реализовать прямое управление, так как зеркало не имеет гистерезиса и ползучести.

Оба типа устройств продемонстрировали хорошую пригодность для задач адаптивной коррекции, тем не менее в некоторых случаях (для пожилых людей с сильными аберрациями) динамический диапазон МЭДЗ являлся недостаточным для полной коррекции аберраций глаз.

Можно предположить, что предложенный подход имеет практическую ценность, если он удовлетворяет следующим критериям:

субъективному – метод приводит к улучшению остроты зрительного восприятия субъекта испытаний;

объективному – форма поверхности корректора, подобранная одним участником в различных испытаниях должна воспроизводиться.

Эксперименты были проведены с привлечением 8 человек в возрасте от 14 до 70 лет. Каждый испытуемый в ходе 6 независимых попыток с помощью ручного управления (клавиатура компьютера) добивался наилучшей четкости зрительного восприятия тестовой таблицы. При этом последовательно подбирались амплитуды от 6 до 12 низших ортогональных мод Цернике. Субъективная оценка четкости видения проводилась по количеству контрастных элементов, ясно различимых на тестовой таблице USAF1951. После каждой попытки проводилось измерение формы поверхности зеркала. Значения коэффициентов Цернике, а также интерфе-

рограммы поверхности зеркала сохранялись для последующего анализа.

Положение оптической оси глаза в процессе измерений специально не стабилизировалось. Положение головы испытуемого субъекта фиксировалось лобовым упором и подбородочной опорой. Участники экспериментов были проинструктированы таким образом, чтобы по возможности сохранять направление взгляда на одну и ту же область испытательной таблицы.

Основные результаты, полученные в ходе экспериментов:

Все испытуемые могли надежно и воспроизводимым образом контролировать качество зрительного восприятия, изменяя амплитуды первых 12 ортогональных мод, включая кому, астигматизм, трилистник и сферическую аберрацию.

Участники экспериментов с хорошим зрением чаще всего не сообщали о существенном улучшении четкости зрительного восприятия в ходе процедуры оптимизации аберраций низкого порядка.

Участники с сильными аберрациями сообщали об умеренном–значительном улучшении остроты зрительного восприятия, соответствующем, как минимум, удвоению зрительного разрешения.

Все участники экспериментов рассматривали процедуру оптимизации как довольно утомительную, приводящую к усталости глаз и снижающую способность к эффективной коррекции аберраций. После ознакомления с методикой оптимизации испытуемые обычно добивались наилучших результатов в 3 или 4-й попытке. Дальнейшие попытки были менее результативны по причине усталости глаз.

Все участники сообщали, что качество коррекции существенно зависит от поперечного положения зрачка.

На рис. 2 представлены типичные интерферограммы и распределения коэффициентов при полиномах Цернике, полученные в результате 6 независимых циклов коррекции для испытуемого субъекта D (14 лет) с незначительными аберрациями глаза и для участника O (31 год) с более сильными аберрациями.

В обоих случаях значения коэффициентов Цернике находятся вблизи их средних величин с умеренной–хорошей степенью воспроизводимости.

В заключение отметим, что в представленной работе продемонстрирована возможность успешной коррекции основных аберраций низкого порядка глаза человека с использованием системы субъективной обратной связи, основанной на оценке четкости зрительного восприятия. Результаты объективных измерений формы поверхности корректирующего зеркала, подобранные испытуемыми субъектами в серии

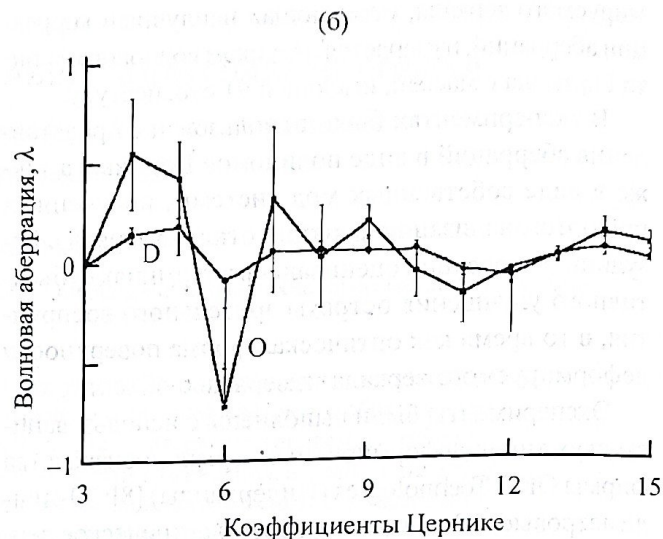
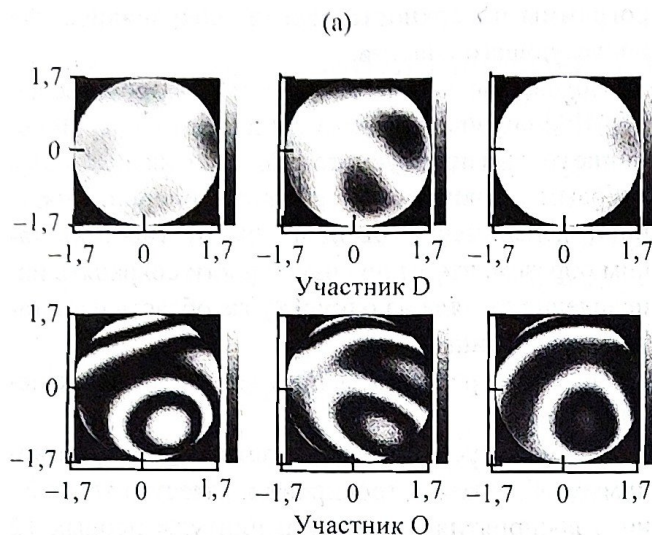


Рис. 2. Восстановленные интерферограммы корректирующего зеркала (а) и значения коэффициентов Цернике (б), полученные в ходе 6 циклов коррекции зрения участниками эксперимента D (14 лет) и O (31 год). Участник эксперимента D не отметил заметного улучшения остроты зрительного восприятия. Участник O отметил улучшение остроты зрительного восприятия, соответствующего увеличению угловой разрешающей способности на ~50% (по измерениям с тестовой таблицей USAF1951).

независимых испытаний по субъективной коррекции зрения, воспроизводятся с хорошей точностью и согласуются между собой по значениям коэффициентов при полиномах Цернике.

ЛИТЕРАТУРА

1. Liang J., Grimm B., Goetz S., Bille J.F. Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor // JOSA. 1994. V. 11. № 7. P. 1949–1957.
2. Fernandez E.J., Iglesias I., Artal P. Closed-loop adaptive optics in the human eye // Opt. Lett. 2001. V. 26. № 10. P. 746–748.
3. Doble N., Yoon G., Chen L., Bierden P., Oliver S., Williams D.R. Use of a microelectromechanical mirror for adaptive optics in the human eye // Opt. Lett. 2002. V. 27. № 17. P. 1537–1539.
4. Yoon G.Y., Singer B., Yamauchi Y., Williams D.R., Hofer H., Chen L. Improvement in retinal image quality with dynamic correction of the eye's aberrations // Opt. Express. 2001. V. 8. P. 631–643.
5. Bara S., Mancebo T., Moreno-Barriuso E. Position tolerances for phase plates compensating aberrations of the human eye // Appl. Opt. 2000. V. 39. № 19. P. 3413–3420.
6. Navarro R., Moreno-Barriuso E., Bara S., Mancebo T. Phase plates for wave-aberration compensation in the human eye // Opt. Lett. 2000. V. 25. № 4. P. 236–238.
7. Vdovin G., Loktev M., Naumov A. On the possibility of intraocular adaptive optics // Opt. Express. 2003. V. 11. P. 810–817.
8. URL <http://www.okotech.com>.