

ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.921, 004.932

СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТА КОМБИНИРОВАННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ И ЛИНЕЙНОСТИ СТИМУЛА АККОМОДАЦИИ ГЛАЗА В МУЛЬТИФОКАЛЬНЫХ ТРЁХМЕРНЫХ ДИСПЛЕЯХ

Е. В. Власов

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru*

Анализируется контраст комбинации двух планов-изображений, разнесённых вдоль зрительной оси глаза для стимулирования аккомодации в 3D-дисплеях. Предложено два способа нормализации на основе индивидуальных и групповых расчётов оптимальных коэффициентов комбинаций для разных диаметров зрачка глаза при заданном разрешении изображений.

Ключевые слова: 3D-изображение, план-изображение, аккомодация, комбинированные изображения, контраст.

DOI: 10.15372/AUT20180310

Введение. Как известно, в 3D-дисплеях с «добавленной аккомодацией» [1–4] изображение формируется путём линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределённых по глубине пространства.

В работах [4, 5] показано, что при дифракционном анализе линейной комбинации двух планов-изображений глаз аккомодирует на пиковое значение аксиальной интенсивности при любых аберрациях оптической системы «окуляр + глаз». Однако при этом возникают большие потери контраста: от 10 до 45 % [4]. Более того, при различных размерах зрачка интенсивность полусумм тоже меняется, так как глаз является одним из компонентов дисплея (комбинирование интенсивностей планов-изображений происходит на сетчатке). В [6] приведён способ повышения контраста комбинированных изображений в 3D-дисплеях при диаметре зрачка 3 мм на модели глаза Атчисона. К сожалению, этот способ не решает проблемы линейности стимула аккомодации в заданном диапазоне глубины.

Целью предлагаемого исследования является разработка двух способов повышения контраста объёмного изображения и линейности стимула аккомодации глаза в 3D-дисплеях при диаметрах зрачка $3 \text{ мм} \pm 10 \%$ на модели глаза Атчисона [7].

Следует заметить, что только отсутствие методической погрешности при формировании стимула аккомодации в 3D-дисплеях гарантирует естественную работу механизма аккомодации глаза человека.

Далее представлены механизм формирования объёмного изображения, а также два способа повышения контраста трёхмерного изображения и линейности стимула аккомодации глаз путём оптимизации комбинирования планов-изображений на основе индивидуальных и групповых расчётов коэффициентов для разных диаметров зрачка глаза.

Комбинирование планов-изображений. При анализе контраста планов-изображений была выбрана биплановая система, описанная в [6, 8], формирующая объёмное изображение путём линейной комбинации планов-изображений, отстоящих по глубине прост-

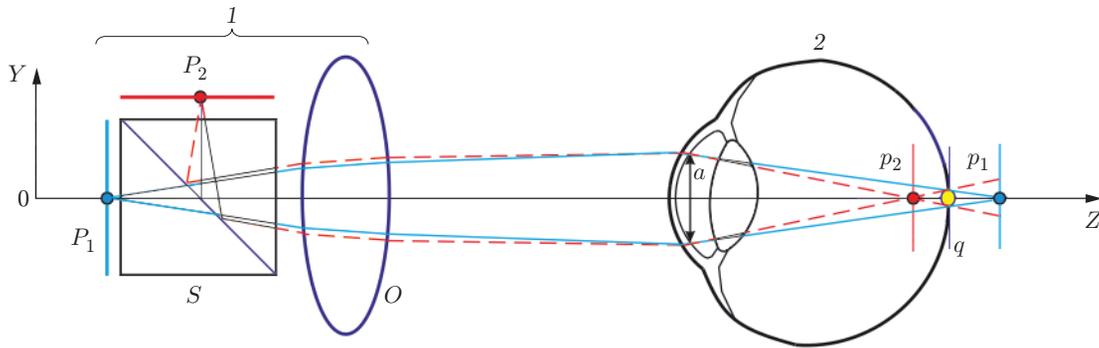


Рис. 1. Формирование объёмного изображения, стимулирующего аккомодацию, на сетчатке глаза (1 — биплановый окуляр, 2 — модель глаза, a — входной зрачок)

ранства на 0,56 дптр при стандартном разрешении изображений 2 угл. мин и использовании модели глаза Атчисона с типовым входным зрачком диаметром 2,7–3,3 мм. На рис. 1 приведена схема 3D-дисплея, состоящая из модели бипланового окуляра и модели глаза. Окуляр содержит два плоских изображения P_1 и P_2 и с помощью объектива O формирует их мнимое изображение. Благодаря светоделительному кубу S мнимые изображения P_1 и P_2 оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси OZ . Излучения элементов изображений P_1, P_2 фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений p_1 и p_2 таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в районе фовеа (центральной ямки сетчатки) q глаза наблюдателя.

На рис. 2 показаны распределения аксиальных интенсивностей изображений P_1 и P_2 для разных значений относительного положения точки β по глубине между планами и при диаметре зрачка глаза $a = 3$ мм. Линия \max представляет собой максимумы функций, полученных от комбинированных изображений с двух планов. Они рассчитываются по формуле, предложенной в [6]:

$$I(x, y, z) = I(x, y)[\text{PSFA}(z - Z_n)(1 - \beta(x, y)) + \text{PSFA}(z - Z_f)\beta(x, y)], \quad (1)$$

где $I(x, y)$ — двумерное изображение сцены; $\text{PSFA}(z)$ — аксиальное распределение интенсивности; Z_n, Z_f — глубины планов P_1, P_2 (в диоптриях); $\beta(x, y)$ — относительное положение точки на интервале $[Z_n, Z_f]$. Судя по поведению кривой максимальных значе-

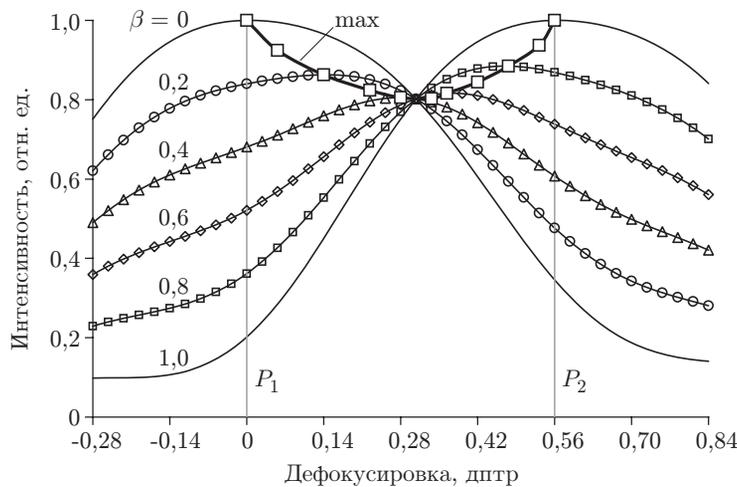


Рис. 2. Линейные комбинации аксиальных интенсивностей изображений P_1, P_2 для разных коэффициентов β при $a = 3$ мм, \max — кривая максимальных значений комбинаций

ний мах (которая в идеале должна быть прямой линией), видно, что появляются заметные потери контраста (порядка 20 %).

Повышение контраста и линейности стимула аккомодации глаза. Для повышения контраста нами предложен способ, основанный на вводе дополнительных коэффициентов $k_1 = 1 - \beta(x, y)$ и $k_2 = \beta(x, y)$ в формулу (1) и их нормировании:

$$I(x, y, z) = I(x, y)[\text{PSFA}(z - Z_n)k_1 + \text{PSFA}(z - Z_f)k_2]. \quad (2)$$

Для оптимизации процесса комбинирования планов-изображений необходимо выполнение ряда действий.

1. Получение одномодовой комбинации, которая имеет один максимум на заданном расстоянии между планами. Для этого достаточно сложить аксиальные интенсивности P_1 и P_2 , как показано на рис. 3, и оценить их производную.

2. Построение комбинации вида $P = P_1k_1 + P_2k_2$, например, при $k_1 = 1$. Из рис. 3 видно, что уменьшение k_2 смещает максимум комбинации к P_1 .

3. Нахождение k_2 , при котором производная комбинации равна нулю для заданного относительного расстояния β стимула аккомодации ($0 \leq \beta \leq 1$).

4. Поиск максимальной величины комбинации P_{\max} в точке β .

5. Нормирование коэффициентов $k'_1 = k_1/P_{\max}$ и $k'_2 = k_2/P_{\max}$, которые позволят получить оптимальную линейную комбинацию, т. е. отсутствие провалов и сигмоидности стимула аккомодации глаза:

$$P = P_1k'_1 + P_2k'_2. \quad (3)$$

Далее рассматривается система со зрачком диаметром $a = 3 \text{ мм} \pm 10 \%$. При выборе такого диапазона изменения диаметра зрачка охватывается три градации освещённости: яркий свет (яркость $L = 300 \text{ кд/м}^2$), нормальная ($L = 100 \text{ кд/м}^2$) и плохая ($L = 40 \text{ кд/м}^2$) освещённости. Согласно формуле Луизова [7], связывающей диаметр зрачка с уровнем освещённости, $a = 5 - 3 \text{ th}(0,4 \lg L)$, указанным градациям освещённости соответствуют следующие диаметры зрачков: 2,7; 3; 3,3 мм.

Отметим, что при диаметре зрачка 3 мм и при разрешении 2 угл. мин дифракционная глубина фокуса составляет 0,56 дптр [9].

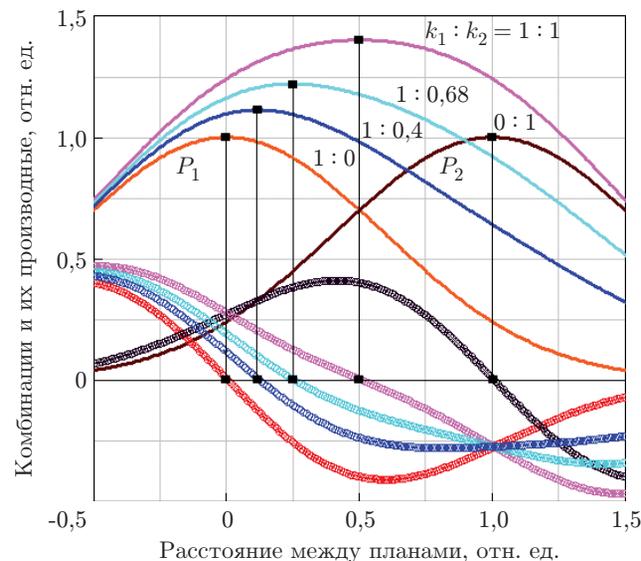


Рис. 3. Комбинации вида $P = P_1k'_1 + P_2k'_2$ при различных значениях k_1 и k_2 , а также их производные

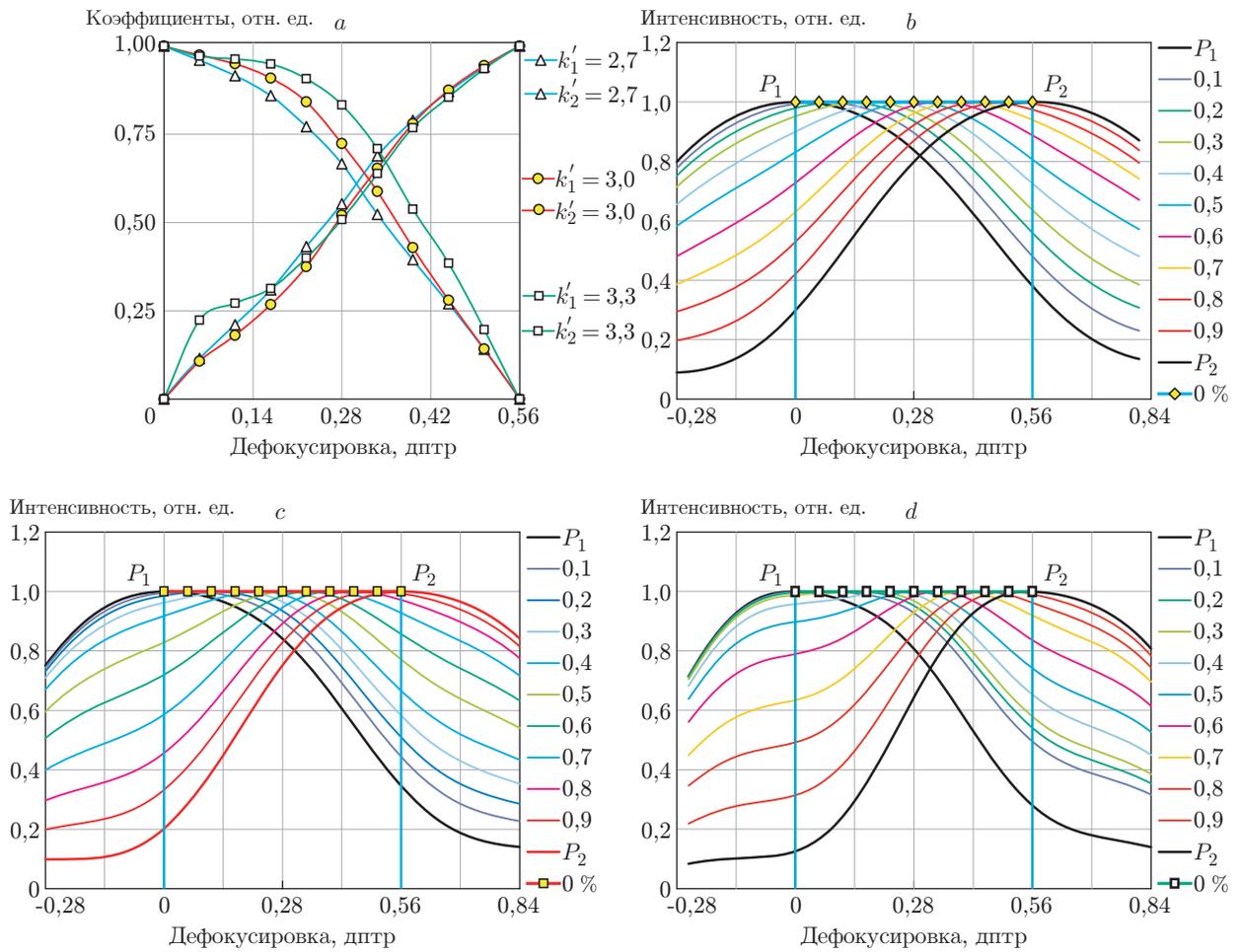


Рис. 4. Комбинации планов-изображений: *a* — нормирование коэффициентов k_1 и k_2 для зрачков диаметрами 2,7; 3; 3,3 мм; *b, c, d* — линейные комбинации, полученные в результате использования нормированных коэффициентов k_1' и k_2' для различных диаметров зрачка

Индивидуальный расчёт оптимальных комбинаций. На основе коэффициентов оптимальной комбинации при диаметре зрачка 3 мм можно построить таблицы коэффициентов для разных диаметров зрачков (от 2,7 до 3,3 мм). Однако следует учитывать, что при использовании рассчитанных коэффициентов для определённого диаметра зрачка и выборе несоответствующего им диаметра комбинации будут неоптимальными. Для того чтобы устранить провалы контраста и улучшить линейность стимула аккомодации, необходимо для определённого диаметра зрачка использовать соответствующие коэффициенты. На рис. 4, *a* показаны кривые коэффициентов k_1 и k_2 для трёх вариантов диаметра зрачка. Следующим шагом является расчёт оптимальных коэффициентов комбинирования планов-изображений для трёх размеров зрачков (2,7; 3; 3,3 мм). Результаты оптимизации приведены на рис. 4, *b—d* соответственно. Как видно из представленных графиков комбинации планов-изображений, оптимизация, если её проводить отдельно для каждого диаметра зрачка, достаточно надёжно справляется с поставленной задачей: устранены провалы контраста при комбинировании планов-изображений P_1 и P_2 . Однако в реальности это накладывает ряд ограничений на разработку мультифокальных 3D-дисплеев: необходимо обеспечить слежение за глазом человека в реальном времени и перерасчёт коэффициентов для текущего значения диаметра зрачка.

Групповой расчёт оптимальных комбинаций. Для того чтобы избежать ресурсозатратной операции слежения за глазом человека, нами сделан следующий шаг: выполнена

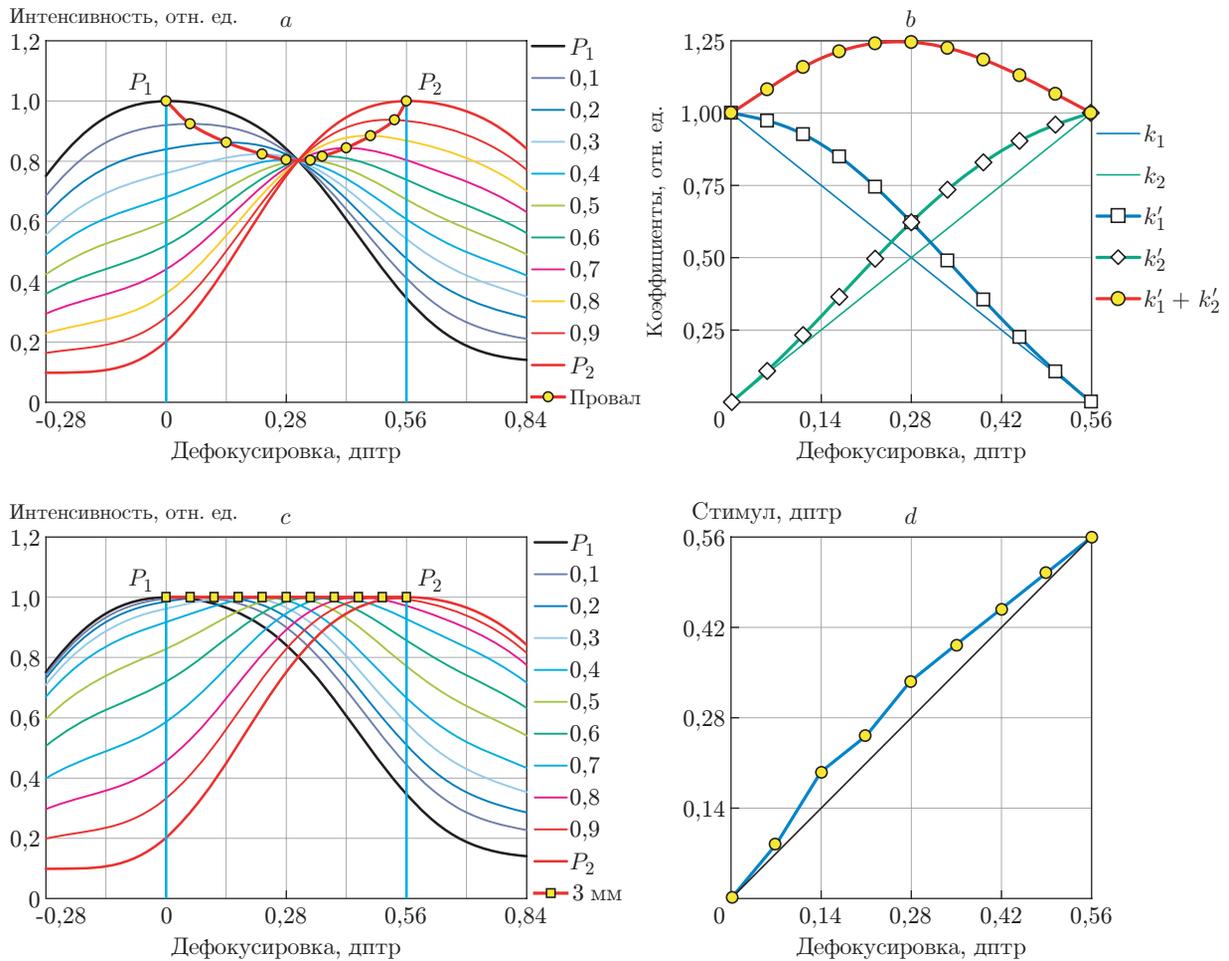


Рис. 5. Комбинации планов-изображений: *a* — линейные комбинации аксиальных интенсивностей изображений P_1, P_2 для разных коэффициентов β при $a = 3$ мм; *b* — нормирование коэффициентов k_1 и k_2 для зрачков диаметрами $3 \text{ мм} \pm 10 \%$; *c* — линейные комбинации, полученные при использовании k'_1 и k'_2 для разных значений β при $a = 3$ мм; *d* — погрешность стимула аккомодации, полученная при групповом расчёте оптимальных комбинаций

нормализация коэффициентов k_1 и k_2 сразу для зрачка диаметрами $3 \text{ мм} \pm 10 \%$ и исследовано поведение контраста и линейности аккомодации для зрачков при плохой освещённости (3,3 мм) и при ярком свете (2,7 мм).

На рис. 5, *a* показана комбинация планов-изображений при использовании линейных коэффициентов k_1 и k_2 . Результат нормирования и новые рассчитанные коэффициенты k'_1 и k'_2 даны на рис. 5, *b*. На рис. 5, *c, d* представлены оптимизация комбинирования планов-изображений P_1 и P_2 с помощью коэффициентов k'_1 и k'_2 , а также полученная погрешность стимула аккомодации для диаметра зрачка равного 3 мм. Как видно на графиках рис. 5, *c, d*, в данном случае отсутствуют погрешности по интенсивности, а отклонения линейности стимула аккомодации не превышают 5%.

На рис. 6, *a, c* показаны графики комбинации планов-изображений с этими же коэффициентами (k'_1 и k'_2), но для диаметров зрачка 2,7 и 3,3 мм, соответствующих яркому свету и плохой освещённости. Из представленных графиков следует, что такая оптимизация приводит к небольшим провалам контраста (см. рис. 6, *a, c*) и отклонению стимула аккомодации от идеального линейного (рис. 6, *b, d*).

Для наглядности погрешности интенсивности и дальности трёхмерного изображения отражены на рис. 7, *a, b* соответственно. Поскольку нормализация комбинаций для зрачков

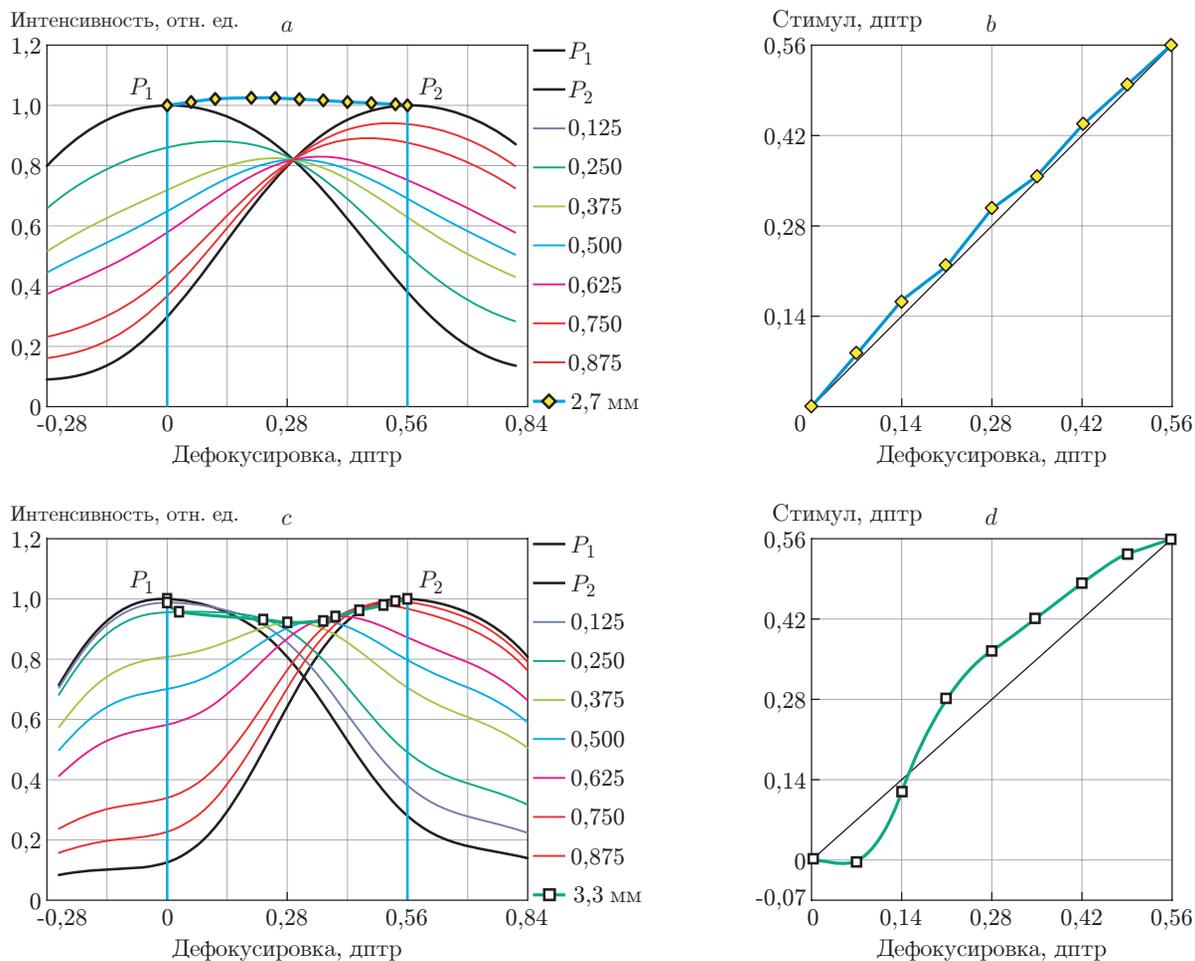


Рис. 6. Комбинации планов-изображений: *a, c* — линейные комбинации, полученные в результате использования нормированных коэффициентов k'_1 и k'_2 для разных значений β при $a = 2,7$ и 3,3 мм; *b, d* — погрешности стимула аккомодации, полученные при групповом расчёте оптимальных комбинаций

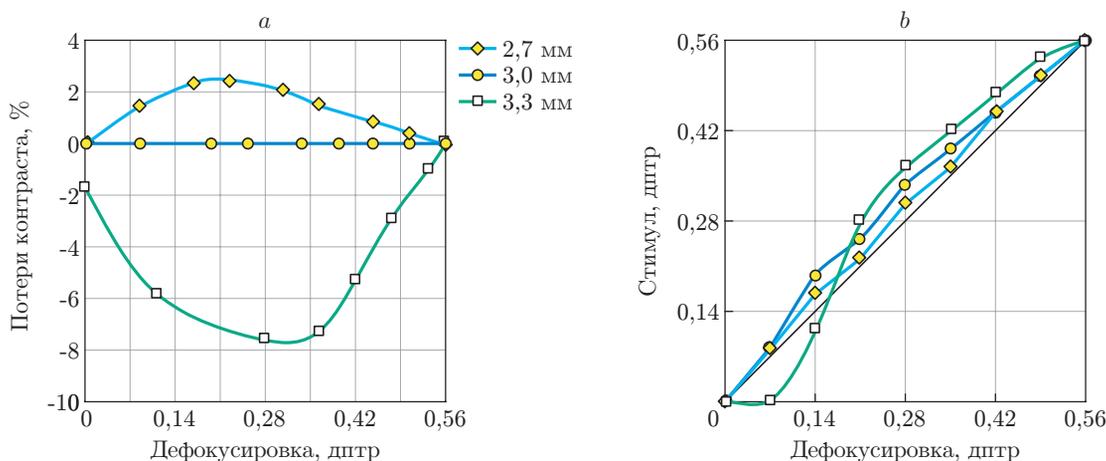


Рис. 7. Погрешности при оптимизации комбинирования планов-изображений для диаметров зрачка 2,7–3,3 мм: *a* — интенсивности, *b* — дальности

диаметром 2,7 и 3,3 мм выполнялась с коэффициентами, рассчитанными для зрачка 3 мм (основная настройка), то график на рис. 7, *a* демонстрирует, по существу, изменение контраста при изменении освещённости зрачка. Отметим, что это практически не приводит к увеличению погрешности дальности (см. рис. 7, *b*).

В результате исследования предложенного в данной работе способа повышения контраста комбинированных изображений в мультифокальных трёхмерных дисплеях установлено:

— при плохой освещённости потери контраста составляют менее 8 %, в случае же нормальной освещённости и при ярком свете они не превышают 2 %;

— отклонения линейности стимула аккомодации не более 5 %.

Всё это позволяет говорить о достоверной фокусировке глаза человека на скомбинированное изображение в пространстве.

Заключение. В предлагаемой работе рассмотрены два способа повышения контраста путём нормирования комбинированных изображений в трёхмерных дисплеях. Рассчитаны коэффициенты, необходимые для корректировки функции комбинации планов-изображений в целях повышения контраста объёмного изображения и повышения линейности стимула аккомодации для зрачков с диаметром 2,7–3,3 мм на модели глаза Атчисона. Данные способы требуют априорных сведений о функции аксиального распределения интенсивностей в системе «окуляр + глаз» и предварительного расчёта коэффициентов линейной комбинации планов-изображений.

Полученные результаты позволяют создавать многоплановые дисплеи, формирующие стимулы аккомодации для глаз, достаточно близкие к естественным, что, несомненно, повышает визуальный комфорт при работе оператора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Akeley K., Watt S. J., Girshick A. R., Bancks M. S. A stereo display prototype with multiple focal distances // ACM Trans. Graph. 2004. **23**, N 3. P. 804–813.
2. Love G. D., Hoffman D. M., Hands P. J. et al. High-speed switchable lens enables the development of a volumetric stereoscopic display // Opt. Express. 2009. **17**, N 18. P. 15716–15725.
3. Ковалев А. М., Кравченко Ю. Л., Хрящев С. В. и др. Бифокальный объёмный стереоскопический дисплей // Сб. матер. VII Междунар. науч. конгресса «Гео-Сибирь-2011». Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, Ч. 1. С. 94–97.
4. Ковалев А. М., Власов Е. В. О качестве трёхмерного изображения, стимулирующего аккомодацию глаза // Автометрия. 2012. **48**, № 4. С. 33–40.
5. Ковалев А. М. О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 86–94.
6. Власов Е. В., Ковалев А. М. О контрасте комбинированных изображений в 3D-дисплеях, стимулирующих аккомодацию глаза // Сб. матер. Междунар. науч. конгресса «Интерэкспо Гео-Сибирь-2014». Новосибирск: СГГА, 2014. Т. 1. С. 45–48.
7. Луизов А. В. Глаз и свет, физиологическая оптика. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 144 с.
8. Власов Е. В., Ковалев А. М. 3D-дисплей с согласованными стимулами аккомодации и конвергенции // Приборы. 2014. **174**, № 12. С. 28–30.
9. Ковалев А. М., Власов Е. В. Дифракционная глубина трёхмерных изображений, стимулирующих аккомодацию глаза // Автометрия. 2014. **50**, № 1. С. 3–8.

Поступила в редакцию 15 декабря 2017 г.