

УДК 004.92, 004.932

О КАЧЕСТВЕ ТРЁХМЕРНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ, СТИМУЛИРУЮЩЕГО АККОМОДАЦИЮ ГЛАЗА

А. М. Ковалев^{1,2}, Е. В. Власов^{2,3}

¹Институт автоматики и электрометрии СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

²Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41

³Новосибирский государственный технический университет,
630092, г. Новосибирск, просп. К. Маркса, 20
E-mail: vlasov@tdisie.nsc.ru

Рассматривается 3D-изображение в виде линейной комбинации двух двумерных изображений, разнесённых по глубине вдоль зрительной оси глаза. С помощью компьютерных экспериментов с разными моделями глаз показаны потеря контрастности и нелинейность аккомодации по глубине при высокой остроте разрешающей способности 3D-изображений.

Ключевые слова: 3D-изображение, стимулы аккомодации, контраст, острота разрешающей способности.

Введение. Для уменьшения визуального дискомфорта при наблюдении стереоизображений в [1–3] предложены дисплеи с добавленными стимулами аккомодации глаз. В отличие от объёмных дисплеев с «воксельной» организацией [4, 5] в дисплеях с «добавленной аккомодацией» изображение формируется путём линейной комбинации ограниченного числа плоскопараллельных планов-изображений, распределённых по глубине пространства. В [6] показано, что допустимые расстояния между планами зависят от аксиального распределения интенсивности, глубины фокусной области глаза, механизма аккомодации и уровня визуального дискомфорта и, кроме того, предельное разрешение и визуальный комфорт достигаются, если расстояние между планами не превышает дифракционной глубины фокуса. В [7] представлен экспериментальный образец бипланового мультифокального стереодисплея наголовного типа. Установлено, что при монокулярном наблюдении биплановых изображений восприятие пространства является таким же объёмным, как и при бинокулярном зрении. В [8] с помощью авторефрактора, работающего в инфракрасном свете с горячим зеркалом, экспериментально подтверждена зависимость аккомодационного состояния глаза от взвешенной суммы изображений на соседних планах. Показано уменьшение контраста гармонических решёток, синтезируемых между планами на пространственных частотах от 2 до 16 цикл./град. Обнаружена нелинейная сигмоидная зависимость стимулов аккомодации при линейном изменении моделируемой глубины.

Целью предлагаемой работы является определение качественных характеристик трёхмерных изображений, таких как контраст, линейность по глубине и разрешающая способность, на основе анализа оптических сигналов в пространственной области.

Оптическая схема и сигналы. На рис. 1 представлена схема, состоящая из двух оптических компонентов: модели бипланового окуляра 1 и модели глаза 2 с входным зрачком a . Окуляр содержит два плоских изображения $P1$ и $P2$ и с помощью линзы L формирует их мнимое изображение. Благодаря светоделительному кубику S мнимые изображения $P1$ и $P2$ оказываются соосными и перпендикулярными зрительной оси OZ . Излучения элементов изображений $P1, P2$ фокусируются хрусталиком глаза в световые пятна изображений $p1$ и $p2$ таким образом, чтобы максимум суммарной энергии находился в области

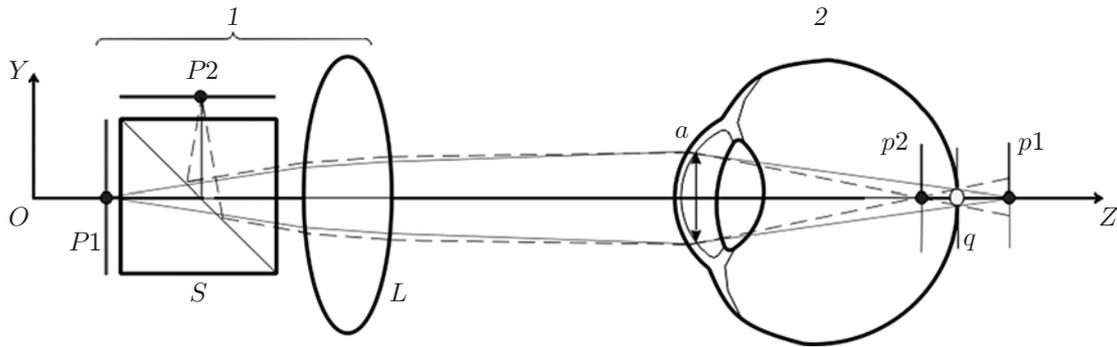


Рис. 1

фовета q . Используются две схематические модели глаза: модель Гульстранда — Легранда с асферической роговицей по Лотмару (1971) и модель Давида Атчисона (2006) [9]. Подробное описание моделей дано в [6].

При фиксации взгляда на неподвижном объекте контрастность изображения на сетчатке (субъективно воспринимаемая как чёткость, или резкость) является стимулом для аккомодации глаза. Максимальная резкость изображения ступеньки 1 (ESF) на рис. 2, a соответствует максимумам функций рассеяния линии 2 (LSF) и точки 3 (PSF). Нетрудно видеть, что LSF — это интеграл свёртки от PSF (по X или Y), а ESF — двойной интеграл от PSF (по X и Y). Таким образом, контрастность изображения на границе или крае ступеньки ESF создаётся, в конечном счёте, функцией рассеяния точки PSF или аппаратной функцией оптической схемы.

На рис. 2, b показано аксиальное (продольное по оси OZ) распределение интенсивности (PSFA) для схемы с моделями глаза по Лотмару (L2,5, L5) и Атчисону (A2,5, A5) для входных зрачков $a = 2,5$ и $a = 5,0$ мм соответственно [6]. Ордината аксиального распределения равна амплитуде PSF в плоскости изображения (XY), проходящей через заданную точку оси OZ . Таким образом, вдоль зрительной оси изображение наибольшей контрастности, или фокус, совпадает с пиком интенсивности аксиального распределения, т. е. максимумом энергии сигнала на оси. Уменьшение интенсивности (энергии) приводит к уменьшению контраста (или дефокусировке на ребре ступеньки ESF).

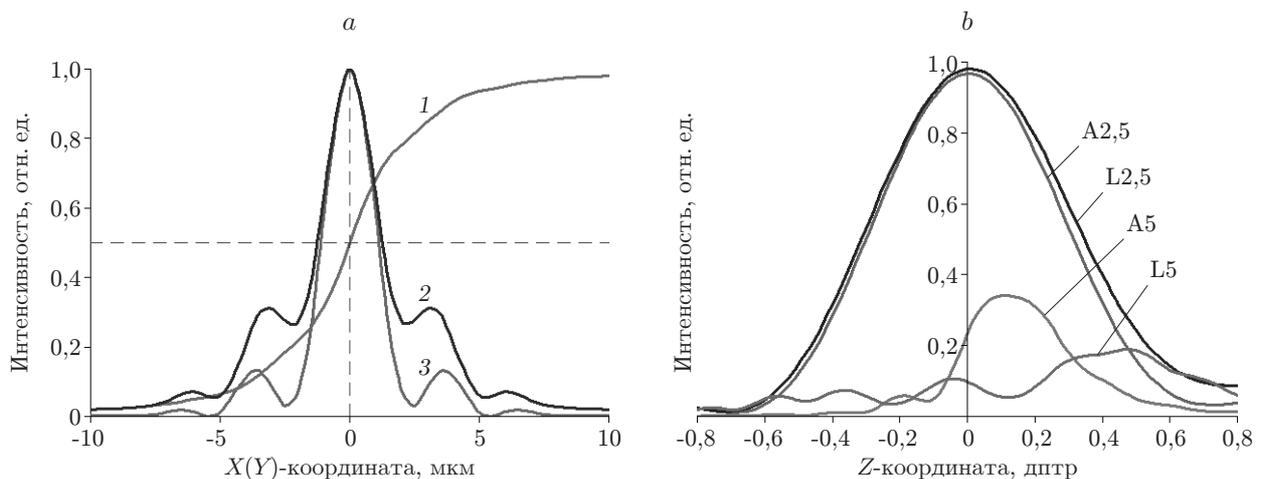


Рис. 2

Дифракционная глубина фокуса (ДФФ) оптической схемы в соответствии с [6] составляет: с моделями Лотмара L2,5 — 0,38 дптр; L5 — 0,28 дптр; с моделями Атчисона A2,5 — 0,34 дптр; A5 — 0,22 дптр. Расчёты функций рассеяния здесь и далее проводились на длине волны $\lambda = 550$ нм с помощью программы оптического конструирования ZEMAX-EE фирмы "Focus Software, Inc."

Линейная комбинация аксиальных интенсивностей. Трёхмерные сцены между двумя планами $P1$ и $P2$ в объектном пространстве или планами $p1$ и $p2$ в стекловидном теле глаза формируют в два этапа [7]. На первом этапе методом рендеринга в текстуре строится пара изображений: первое изображение — собственно сама сцена $I(x, y)$, второе — глубина каждого пиксела сцены в диоптриях $Z(x, y)$. На втором этапе получают изображения $I_n(x, y)$ и $I_f(x, y)$ для ближнего и дальнего плана соответственно. Вначале формируется коэффициент, моделирующий линейное изменение глубины между планами:

$$\beta(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{при } Z(x, y) < Z_f, \\ 1 & \text{при } Z(x, y) > Z_n, \\ \frac{Z_n - Z(x, y)}{Z_n - Z_f} & \text{при } Z_f \leq Z(x, y) \leq Z_n, \end{cases} \quad (1)$$

где Z_n — расстояние до ближнего плана $P1$; Z_f — расстояние до дальнего плана $P2$. Затем для этих планов вычисляют интенсивность изображения по формулам

$$I_n(x, y) = I(x, y)(1 - \beta(x, y)); \quad I_f(x, y) = I(x, y)\beta(x, y). \quad (2)$$

С учётом (2) и функции аксиального распределения PSFA(z) (см. рис. 2, *b*) трёхмерное изображение в области сетчатки глаза можно представить в виде линейной комбинации

$$\begin{aligned} I(x, y, z) &= I_n(x, y)\text{PSFA}(z - Z_n) + I_f(x, y)\text{PSFA}(z - Z_f) = \\ &= I(x, y)[\text{PSFA}(z - Z_n)(1 - \beta(x, y)) + \text{PSFA}(z - Z_f)\beta(x, y)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Изображение (3) имеет пиковые интенсивности, причём положение пика по глубине зависит от коэффициента $\beta(x, y)$, а амплитуда пика (контраст, яркость) — от расстояний $Z_n - Z_f$ между планами.

Потери контраста. Рассмотрим изменение пиковой интенсивности, приводящее к изменению контраста, для двух моделей глаза: Лотмара при зрачке $a = 2,5$ мм и Атчисона при зрачке $a = 5,0$ мм при двух расстояниях между планами-изображениями — 0,25 дптр и 0,5 дптр. При исследовании выберем окрестности комбинированного плана с коэффициентом $\beta(x, y) = 0,5$, для которого потери контраста максимальны (рис. 3, *a, b, d, e*). На рисунках кривыми 1 обозначены нормированные функции распределения от реальной физической точки, помещённой в пространство между планами $P1$ и $P2$. Кривые 2 соответствуют линейной комбинации (3) при $I(x, y) = 1$. Для модели Лотмара (см. рис. 3, *a, b*) при расстоянии между планами 0,25 дптр пиковая интенсивность линейной комбинации падает на 10 %, при увеличении расстояния до 0,5 дптр — на 33 %. Заметим, что ДФФ схемы для этого случая равна 0,38 дптр и находится между исследуемыми диапазонами. Для модели Атчисона (см. рис. 3, *d, e*) при расстоянии между планами 0,25 дптр пиковая интенсивность линейной комбинации падает на 24 %, а при увеличении расстояния до 0,5 дптр — на 45 %. Биплановые функции интенсивности 2 становятся немонотонными (см. рис. 3, *d*) и «двугорбыми» (см. рис. 3, *e*). Дифракционная глубина фокуса для

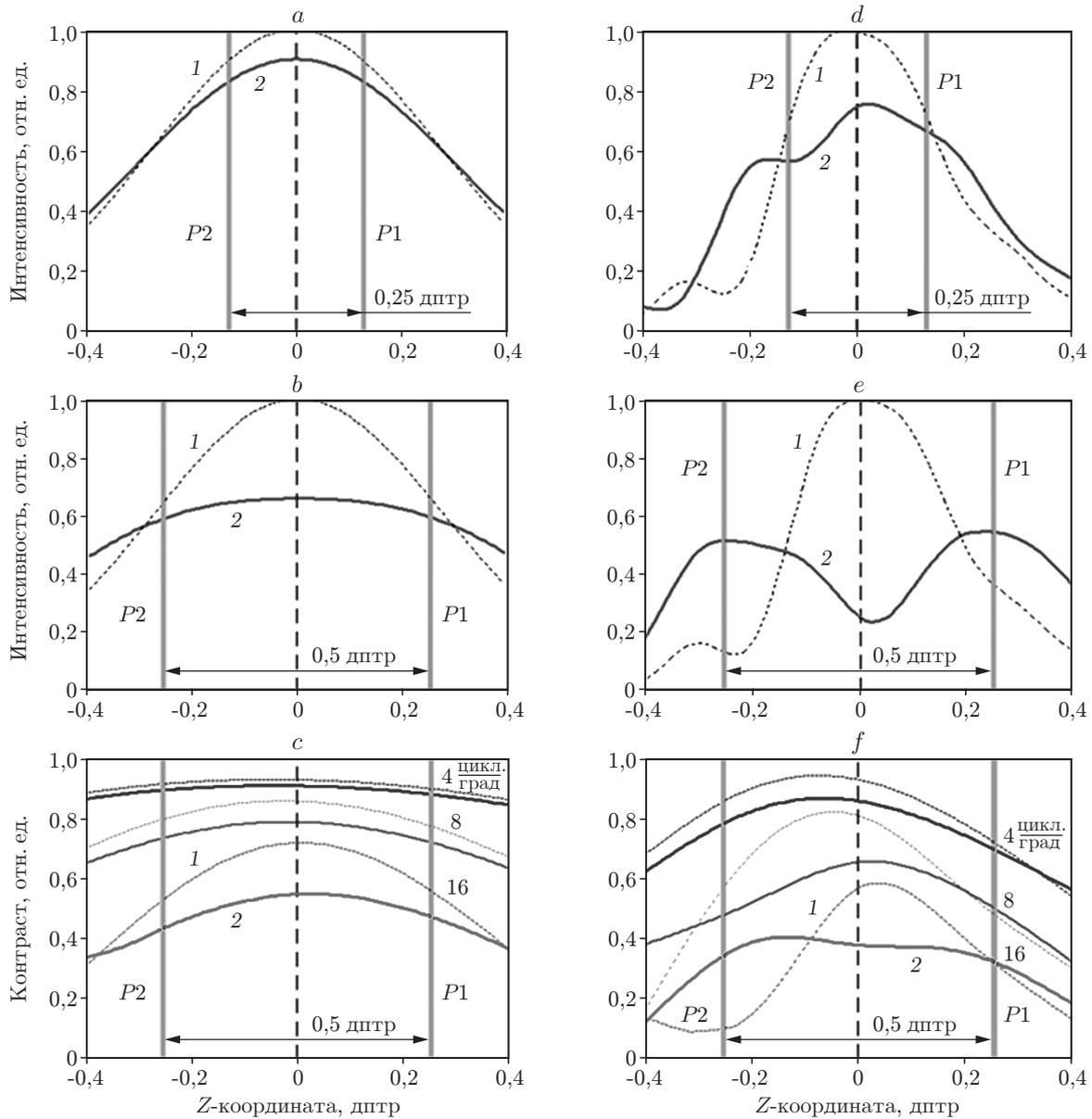


Рис. 3

модели Атчисона равна 0,22 дптр и меньше рассматриваемых интервалов. Полученные результаты сведены в таблицу. Очевидно, что отношение расстояний между планами изображения к ДГФ $((Z_n - Z_f)/\text{ДГФ})$ коррелирует с потерей контраста трёхмерного изображения. Из рассмотренных примеров также видно, что комбинированные изображения не только теряют контраст, но и уширяют аксиальное распределение интенсивностей.

Так как преобразование Фурье, определяющее спектр сигнала, линейно, то при любой линейной комбинации изображений спектр результирующего изображения является той же линейной комбинацией спектров исходных изображений. Это даёт основу для анализа комбинированных изображений в пространственно-частотной области. На рис. 3, *c, f* показаны «аккомодационно-частотные» функции [2], которые определяют «прохождение» пространственных частот (от 4 до 16 цикл./град) через фокус. Результаты можно сравнить с исследованиями в [8]. Для модели Лотмара с расстоянием 0,5 дптр между планами *P1* и *P2* на пространственной частоте 16 цикл./град контраст падает на 23 % (см. рис. 3, *c*).

$Z_n - Z_f$, дптр	Модель	$(Z_n - Z_f)/ДГФ$	Потери контраста, %
0,25	Лотмар	0,66	10
	Атчисон	1,14	24
0,5	Лотмар	1,3	33
	Атчисон	2,27	45

На том же расстоянии и той же частоте падение контраста на 31 % отмечено для модели Атчисона (см. рис. 3, *f*). Заметим, что в обоих случаях падение контраста меньше, чем при анализе пиковой аксиальной интенсивности, в котором, на наш взгляд, получаются интегральные оценки 33 и 45 % соответственно рис. 3, *b*, *e*.

Таким образом, контраст комбинированного изображения зависит, как от расстояния между планами-изображениями, так и от аксиального распределения интенсивности, определяющего дифракционную глубину фокуса при различных диаметрах входного зрачка и различных aberrациях оптической схемы.

Сигмоидность аккомодации. Трёхмерные изображения, стимулирующие аккомодацию, представляются в виде линейной комбинации (3), в которой коэффициенты согласно (1) являются линейными функциями глубины на интервале $[Z_n Z_f]$. Поэтому можно предположить, что аккомодационное состояние глаза будет также изменяться линейно. Но это не так.

На рис. 4 показаны зависимости положения пика интенсивности внутри интервала $[Z_n Z_f]$ от моделируемой глубины при $0 \leq \beta(x, y) \leq 1$. Рассчитаем нелинейность в виде отношения максимальной разницы δZ между пиком и величиной линейной функции аккомодации (рис. 4, *c*) к величине интервала $[Z_n Z_f]$ между планами-изображениями. Для модели Лотмара (рис. 4, *a*, *b*) при расстоянии 0,25 дптр относительная нелинейность, или сигмоидность, мала и составляет 3,6 %, при увеличении расстояния до 0,5 дптр повышается до 20 %. Для модели Атчисона (рис. 4, *c*, *d*) при расстоянии между планами 0,25 дптр сигмоидность составляет 24,8 %, при увеличении расстояния до 0,5 дптр достигает 50 %. В последнем случае нелинейность настолько высока, что моделируемая точка перемещается скачкообразно от ближнего плана к дальнему. Максимальная абсолютная погрешность при этом составляет 0,25 дптр. На рис. 4, *b*, *d* добавлены результаты пространственно-частотного анализа на частотах от 4 до 16 цикл./град. Аккомодация на пик аксиальной интенсивности и на максимум частотного контраста различается, особенно на больших интервалах $[Z_n Z_f]$ при малых ДГФ (см. рис. 4, *d*).

Острота разрешающей способности. Известны пять типов остроты зрения, связанных с решением таких разных зрительных задач, как обнаружение, локализация, разрешение, распознавание и динамика предметов [10, с. 163–166]. Острота обнаружения связана с поиском, как правило, мелких предметов, например тонкого провода на фоне неба. Острота локализации, или нониусная острота, — это способность определять латеральное смещение предметов, например концов отрезков линий. Острота разрешающей способности глаза — это восприятие границы между дискретными элементами изображения. В качестве тестовых объектов обычно берут прямоугольные решётки из чёрно-белых полос с разными пространственными частотами или две изолированные прямые, или две точки. Острота распознавания связана с идентификацией предметов, например букв в тестовой таблице Снеллена, используемой офтальмологами для проверки остроты зрения. И, наконец, динамическая острота характеризует способность отслеживать подвижные объекты. Рассмотрим остроту разрешающей способности оптической схемы, поскольку этот тип остроты в меньшей степени зависит от психофизических аспектов восприятия. Нейронное латеральное торможение в рецептивных полях сетчатки (полосы Маха) только усиливает

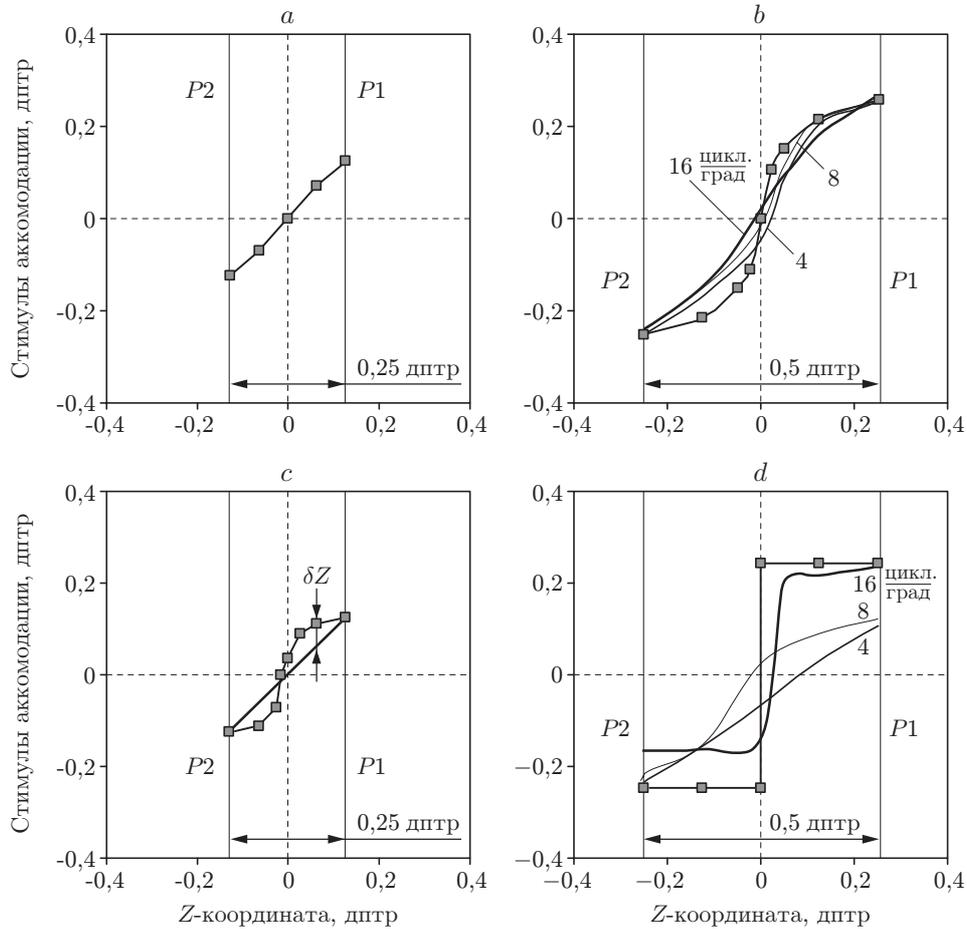


Рис. 4

контрастное восприятие границ предметов [10, с. 235–238]. Наоборот, контрастная чувствительность глаз снижает остроту зрения на высоких пространственных частотах. В качестве стимульных объектов возьмём две изолированные точки (две звезды).

Сравним разрешение реального и комбинированного изображений, исходя из функций рассеяния точек PSF для $\beta(x, y) = 0,5$. На рис. 5, а показаны такие функции для схемы с моделью Лотмара при входном зрачке $a = 2,5$ мм, а на рис. 5, с — для схемы с моделью Атчисона при $a = 5,0$ мм. На этих рисунках кривая 1 означает PSF для реальной точки, помещённой посередине интервала $[Z_n Z_f]$. Кривая 2 — это комбинированная PSF для точки, отстоящей от ближнего Z_n и дальнего Z_f плана на одинаковом расстоянии 0,125 дптр, так что расстояние между планами равно 0,25 дптр. Кривая 3 — это то же самое, только расстояние между планами 0,5 дптр.

Прежде всего, обратим внимание на то, что амплитуды ненормированных PSF (числа Штреля) на рис. 5, а, с строго соответствуют пикам интенсивности на рис. 3. Теперь нормируем PSF и перейдём к рис. 5, b, d. Нормированные PSF в центральной части пятен рассеяния полностью совпадают, и это свидетельствует о том, что оптические схемы близки к дифракционно-ограниченным. Радиус пятна Эйри для $\lambda = 550$ нм, $a = 2,5$ мм и фокусного расстояния $f = 16,7$ мм определим из выражения $\rho = 1,22\lambda f/a = 4,48$ мкм. На рис. 5, b разнесём две точки по координате X на расстояние 5 мкм и построим нормированную сумму интенсивностей этих точек. Получим кривую 4 для 0,25 дптр и кривую 5 для 0,5 дптр. Очевидно, что критерий разрешения точек по Рэлю удовлетворяется. Разреша-

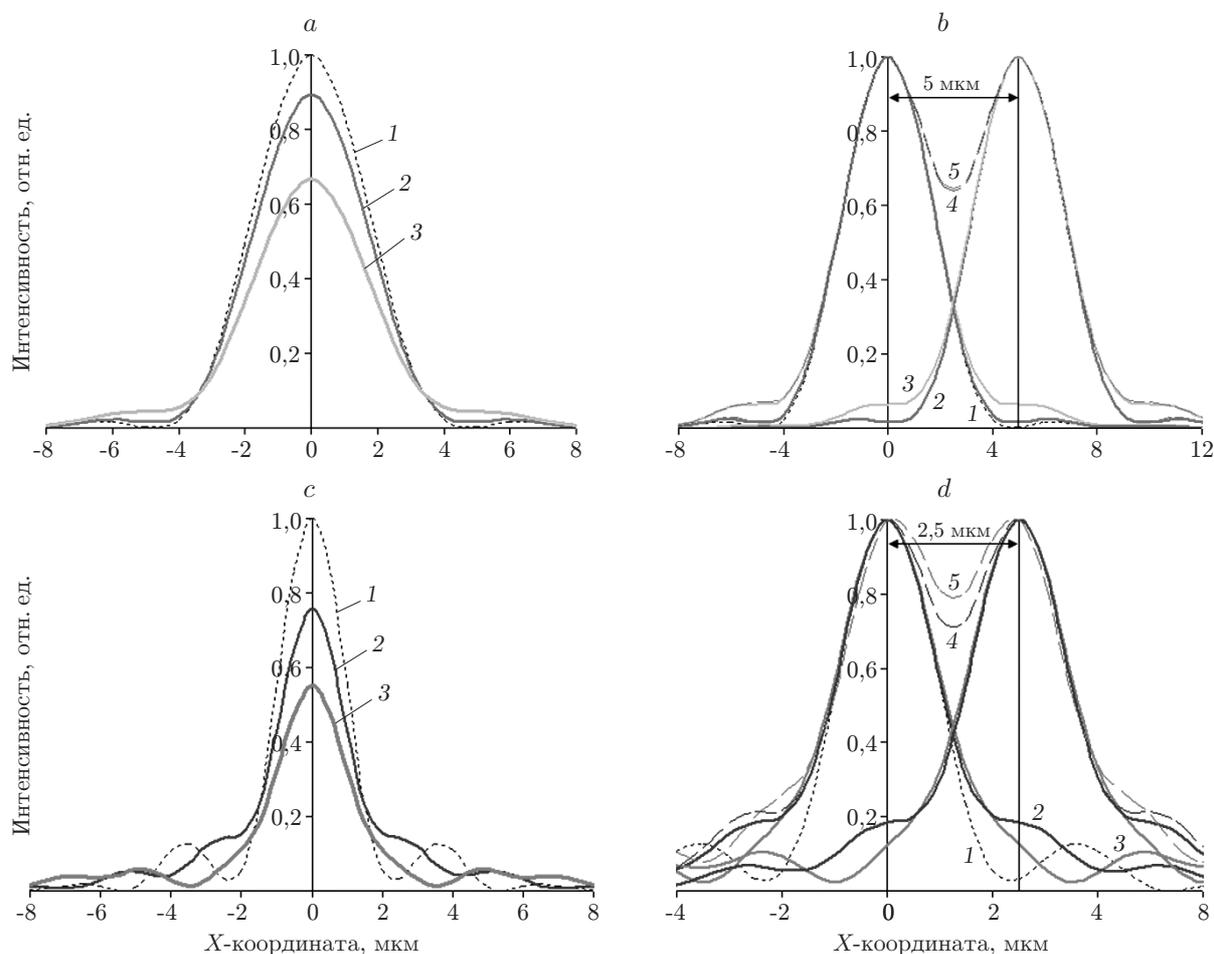


Рис. 5

ющая способность ≤ 1 угл. мин, а острота разрешения ≥ 1 . Выполнив подобные операции, на рис. 5, d получим разрешающую способность $\leq 0,5$ угл. мин, а остроту разрешения ≥ 2 . С учётом контрастной чувствительности глаз реальная острота разрешения будет меньше.

Таким образом, линейная комбинация двумерных изображений не снижает остроты разрешающей способности трёхмерного изображения.

Заключение. Основная сложность разработки стереоскопических дисплеев, не вызывающих ощущения дискомфорта при восприятии объёмных изображений, состоит в создании и согласовании стимулов аккомодации и конвергенции глаз. По сути, наличие стимулов аккомодации означает, что изображение каждой из стереопар должно быть трёхмерным, т. е. иметь протяжённость по глубине для каждого элемента изображения (пиксела).

В данной работе предложена модель монокулярного трёхмерного изображения в виде линейной комбинации функций аксиальной интенсивности двух двумерных планов-изображений, разнесённых по глубине вдоль зрительной оси глаза. По результатам компьютерных экспериментов с моделями глаз по Лотмару и Атчисону при входных зрачках от 2 до 5 мм и глубине пространства от 0,25 до 0,5 дптр показаны ощутимые потери контрастности от 10 до 45 % и большие нелинейности аккомодации от 3,6 до 50 % по глубине пространства. Искажения зависят как от расстояния между планами-изображениями, так и от аксиального распределения энергии, задающей дифракционную глубину фокуса при различных диаметрах входного зрачка и различных абберациях оптической схемы.

Сравнение разрешений реального и комбинированного изображений показало, что линейная комбинация двумерных изображений не снижает остроты разрешающей способности трёхмерного изображения.

Полученные результаты на основе анализа сигнала в пространственной области являются более «жесткими» оценками потери контраста и линейности аккомодации по отношению к оценкам, полученным для сигналов в пространственно-частотной области.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Пат. 2201610 РФ.** Мультифокальный стереодисплей /А. М. Ковалев. Опубл. 27.03.2003, Бюл. № 9.
2. **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.
3. **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.
4. **Sullivan A.** A solid-state multi-planar volumetric display // Proc. SPIE. 2004. **5291**. P. 279–284.
5. **Kompanets I., Gonchukov S.** 3-D medium based displays // Proc. SPIE. 2005. **5821**. P. 134–145.
6. **Ковалев А. М.** О мультифокальных дисплеях, дифракционной глубине фокуса и визуальном комфорте // Автометрия. 2010. **46**, № 3. С. 86–94.
7. **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.
8. **Mackenzie K. J., Hoffman D. M., Watt S. J.** Accommodation to multiple-focal-plane displays: Implications for improving stereoscopic displays and for accommodation control // Journ. Vision. 2010. **10**(8), N 22. P. 1–20.
9. **Bakaraju R. S., Ehrmann K., Papas E., Ho A.** Finite schematic eye models and their accuracy to in-vivo data // Vision Research. 2008. **48**, N 16. P. 1681–1694.
10. **Шиффман Х. Р.** Ощущение и восприятие. С.-Пб.: Питер, 2003. 928 с.

Поступила в редакцию 12 января 2012 г.
