

Исследование виртуальных дисплеев на основе растровых оптических элементов

Рю Чжэел, А.Н.Путилин

Работа посвящена исследованию величины предельного разрешения виртуальных дисплеев с растровыми системами. Растровые системы в таких дисплеях используются для существенного уменьшения их продольных габаритов. Рассмотрены три схемы: в первой каждый элемент растровой системы формирует изображение только одного пикселя, во второй каждый элемент растровой системы формирует малую часть виртуального изображения, третья схема аналогична первой, но выполнена в виде контактной линзы. Для каждой схемы проанализированы габаритные размеры оптической системы и характеристики виртуального изображения – предельное разрешение и неравномерность его освещенности.

Ключевые слова: растровая оптика, микрзеркальные растры, виртуальный дисплей, контактная линза.

1. Введение

Растровая оптика широко применяется в оптических системах микроскопов, объективов фото- и видеокамер и навигационных устройств, в виртуальных дисплеях (ВД) для уменьшения их продольных габаритов [1–4]. Виртуальным дисплеем называется устройство, которое создает виртуальное (мнимое) увеличенное изображение. Виртуальные дисплеи могут быть классифицированы по их прозрачности для глаза наблюдателя. Если устройство не прозрачно, т. е. глаз может видеть только виртуальное изображение, то оно называется устройством виртуальной реальности. Если устройство частично прозрачно, что позволяет глазу видеть одновременно и реальный мир, и виртуальное изображение, то оно называется дисплеем дополненной реальности. В зарубежной литературе существует ряд аналогов названия ВД: Head-Mounted-Display (HMD), Head-Up-Display (HUD), Near-Eye-Display, Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) и т. д.

Конечная цель создания ВД – это формирование для человека ощущения нахождения в виртуальном мире, т. е. оптическая система ВД должна создавать такое виртуальное изображение, при котором человек не чувствует различия между виртуальным изображением и реальным миром. Для этого ВД должен обеспечивать высокое разрешение и вызывать у пользователя минимальный дискомфорт. Поскольку ВД располагается на голове зрителя, его вес и габариты играют весьма важную роль. В связи с этим применение растровой оптики для построения виртуального изображения, использованное в патенте [5], является хорошим подходом к минимизации габаритов устройств ВД. Согласно принципам построения оптических систем, при фиксированном размере дисплея и по-

ложении глаза наблюдателя габаритные размеры оптической системы будут возрастать с увеличением требуемого поля зрения, а применение растровых систем позволит уменьшить продольные габариты ВД.

В ряде работ предложены следующие типы растровых систем: 1) матрица сферических линз с коротким фокусом на плоской подложке перед дисплеем [6]; 2) плоские цветные голограммы, записанные матрицей линз [7]; 3) растровая голограмма на неплоской поверхности (записанная матрицей линз) с контактной линзой [8]; 4) схема с набором отверстий, работающая по принципу камеры-обскуры [9]. В этих работах достигнуты положительные результаты построения непрерывного виртуального изображения с большим полем зрения и малыми габаритами системы. В качестве базовых элементов в этих системах использовались матрицы зеркал, линз, отверстий или микроголограмм линзовых растров. К сожалению, ни в одной из перечисленных работ не проведено исследование оценок предельного разрешения, которое можно обеспечить в подобных системах.

В настоящей работе описаны оптические свойства трех основных концепций растровых систем с зеркальными базовыми элементами. Однако предельное разрешение можно аналогичным образом оценить не только для систем с зеркальными (базовыми), но и с линзовыми элементами.

Сначала нами рассматривается очень привлекательная с инженерной точки зрения схема, в которой каждый базовый элемент растровой системы формирует изображение только одного пикселя, а также вторая схема, в которой базовый элемент формирует небольшую часть виртуального изображения. В третьей схеме анализируется возможность создания ВД в виде контактной линзы, на которой расположены базовые элементы растровой системы (аналогично первой схеме).

2. Схема «один точечный источник – одно зеркало»

Рассмотрим построение ВД, в котором базовым элементом растровой системы является один точечный ис-

Рю Чжэел. Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: Jaeyeol.ryu@phystech.edu
А.Н.Путилин. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: Putilinan@lebedev.ru

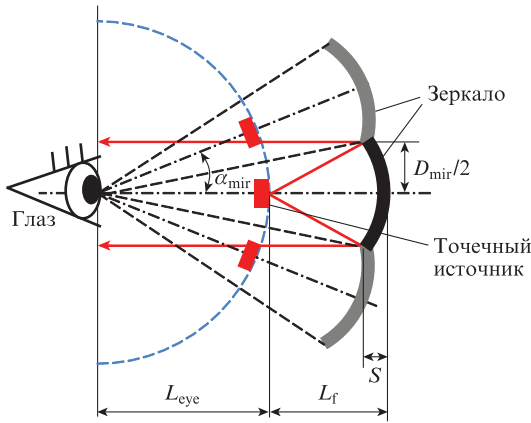


Рис.1. Схема системы «один точечный источник – одно зеркало».

точник (ТИ) (один пиксель), расположенный перед строящим виртуальное изображение вогнутым зеркалом. Подобная схема частично описана в патенте [5]. В качестве базового элемента такой системы выбрано зеркало, поскольку оно, в отличие от линзы, не имеет хроматических aberrаций. Если ТИ находится в фокусе зеркала, то его излучение после отражения от поверхности зеркала будет распространяться в виде параллельного пучка, т.е. изображение ТИ будет находиться на бесконечности (рис.1).

Если несколько таких ТИ с зеркалами находятся на равном расстоянии от центра зрачка глаза и угол между осями зеркал есть α_{mir} , то каждый ТИ с зеркалом будет формировать параллельный пучок. Углы между соседними пучками также будут α_{mir} , и каждый из пучков будет восприниматься глазом как точка, находящаяся на бесконечности.

Очевидно, что для получения максимального количества таких виртуальных точек зеркала должны располагаться вплотную друг к другу, т.е. без зазоров.

Из рис.1 следует:

$$\tan\left(\frac{\alpha_{mir}}{2}\right) = \frac{D_{mir}}{2(L_{eye} + L_f - S)}, \tag{1}$$

$$S = R - \sqrt{R^2 - (D_{mir}/2)^2}, \tag{2}$$

где D_{mir} – диаметр зеркала; S – стрелка прогиба зеркала; L_f – фокусное расстояние зеркала; L_{eye} – расстояние от глаза до точечного источника; R – радиус кривизны сферического зеркала.

Поскольку для сферического зеркала

$$R = 2L_f, \tag{3}$$

то

$$\alpha_{mir} = 2 \arctan\left[\frac{D_{mir}}{2(L_{eye} - L_f + \sqrt{4L_f^2 - D_{mir}^2/4})}\right]. \tag{4}$$

Из выражения (4) можно найти диаметр зеркала:

$$D_{mir}(L_{eye}, L_f, \alpha_{mir}) = 2 \tan\left(\frac{\alpha_{mir}}{2}\right) \left[(L_{eye} - L_f) \pm \left[L_f^2 \left(4 + 3 \tan^2\left(\frac{\alpha_{mir}}{2}\right)\right) + 2L_{eye}L_f \tan^2\left(\frac{\alpha_{mir}}{2}\right) - L_{eye}^2 \tan^2\left(\frac{\alpha_{mir}}{2}\right) \right]^{1/2} \right] \left[1 + \tan^2\left(\frac{\alpha_{mir}}{2}\right) \right]^{-1}. \tag{5}$$

Плотность P размещения ТИ в плоскости рис.1 равняется числу ТИ в единичном угле:

$$P = \frac{1}{\alpha_{mir}}. \tag{6}$$

Ясно, что чем меньше α_{mir} , тем больше ТИ можно интегрировать в дисплей такого типа и тем меньше может быть диаметр зеркала D_{mir} . Однако уменьшать его можно только до определенного значения, при котором дифракция на зеркале начинает влиять на разрешение. Известно, что угловой дифракционный предел разрешающей способности

$$\Psi_{dif} = 1.22 \frac{\lambda}{D}, \tag{7}$$

где λ – длина волны излучения; D – диаметр входного зрачка оптической системы (в нашем случае $D = D_{mir}$).

Если при малом диаметре зеркала Ψ_{dif} превысит α_{mir} , то различить два близкорасположенных ТИ невозможно и дальнейшее увеличение количества ТИ не имеет смысла. Таким образом, угол α_{mir} должен быть больше углового дифракционного предела разрешения:

$$\alpha_{mir} > \Psi_{dif} = 1.22 \frac{\lambda}{D_{mir}}. \tag{8}$$

Из (8) можно найти минимальный диаметр зеркал D_{mir} , при котором в схеме рис.1 можно установить максимальное количество ТИ (рис.2):

$$D_{mir}^{min} = 1.22 \frac{\lambda}{\alpha_{mir}}. \tag{9}$$

Из приведенных на рис.2 зависимостей следует, что при $L_{eye} = 15$ мм, $L_f = 2$ мм и $\lambda = 550$ нм оптимальный диаметр зеркала равен ~ 0.107 мм, угол между зеркалами – 0.36° , а угловое разрешение составляет 2.8 точек/град.

Из эргономических соображений ограничим расстояние L_{eye} диапазоном 10–20 мм, а фокусное расстояние L_f – диапазоном 1–5 мм. На рис.3 приведены зависимости $\alpha_{mir}(L_{eye}, L_f)$ и $D_{mir}(L_{eye}, L_f)$, рассчитанные для приведенных выше диапазонов значений L_{eye} и L_f . Видно, что чем больше L_{eye} и L_f , тем меньше α_{mir} . Таким образом, схема «один ТИ – одно изображающее зеркало» имеет ограничение по числу ТИ, которые можно различать в виртуальном изображении. Здесь важно отметить, что раз-

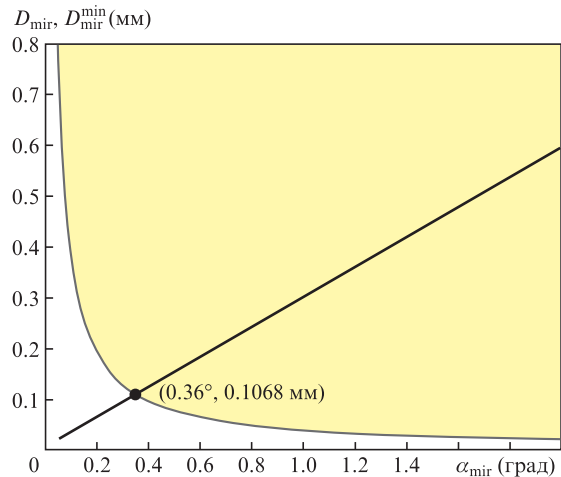


Рис.2. Зависимости $D_{mir}(\alpha_{mir})$ при $L_{eye} = 15$ мм и $L_f = 2$ мм (черная линия) и $D_{mir}^{min}(\alpha_{mir})$ при $\lambda = 550$ нм (серая кривая). Закрашена область, в которой D_{mir} и α_{mir} удовлетворяют условию (8).

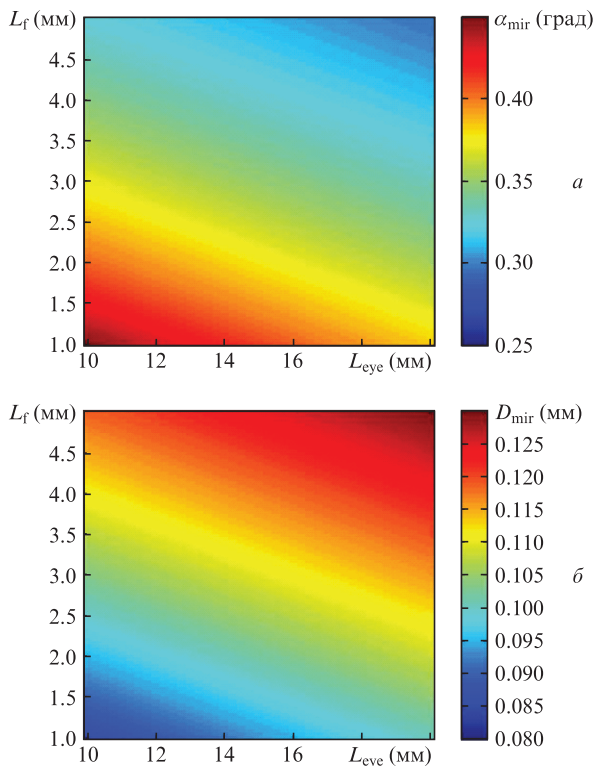


Рис.3. Зависимости от L_{eye} и L_f угла α_{mir} (а) и диаметра D_{mir} (б). Цветной вариант рис.3 приведен на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

мер элементарного оптического элемента должен быть больше зоны видения виртуального изображения (ЗВВИ, англоязычный термин Eye Vox (ЕВ))

$$D_{mir} > D_{ЕВ}. \tag{10}$$

В результате в случае, когда только один ТИ находится в фокусе оптического элемента, максимальное разрешение составляет примерно три точки в угле, равном одному градусу, при условии, что $L_{eye} = 10-20$ мм.

3. Схема «несколько пикселей для одного изображающего зеркала»

Ограничение количества ТИ в угле, равном одному градусу, в первой схеме возникает из-за дифракции на элементарном изображающем зеркале малого диаметра.

Рассмотрим теперь случай, когда перед каждым элементарным зеркалом находится не один ТИ, а его матрица, т.е. пространственно-временной модулятор света (ПВМС). Такие миниматрицы ТИ могут быть интегрированы в одну общую матрицу с нерегулярным распределением ТИ по ее площади.

Данная схема дает возможность увеличить плотность ТИ за счет увеличения размера зеркала, поскольку тогда перед каждым зеркалом можно добавить еще несколько ТИ, пока вогнутое мини-зеркало позволяет разрешать источники излучения по критерию Рэля (см. (8)). В отличие от предыдущего случая, каждое зеркало будет формировать изображение не одного ТИ, а увеличенное изображение его матрицы. Все вместе элементарные зеркала растровой системы формируют большое виртуальное изображение.

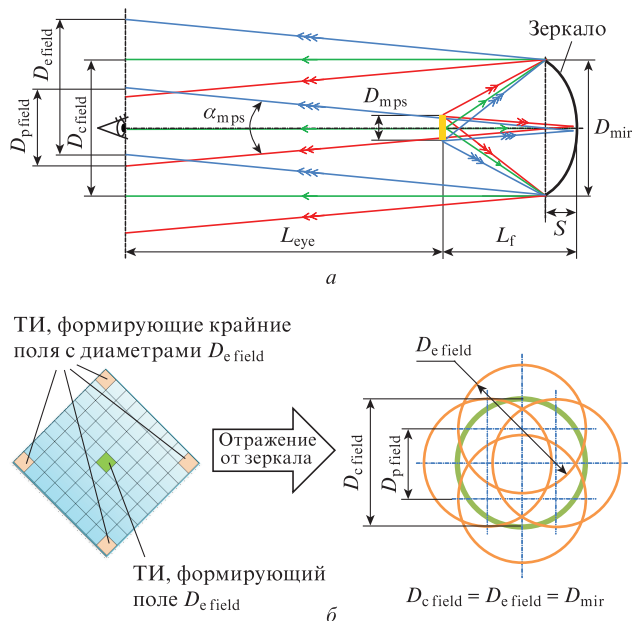


Рис.4. Схема элемента растровой системы, формирующего часть виртуального изображения с полем зрения α_{mps} (а), и пятна световых полей ТИ матрицы, расположенных в ее центре и на концах диагоналей, в плоскости зрачка глаза на расстоянии L_{eye} от матрицы ТИ после отражения от зеркала (б).

Здесь важно отметить, что зеркало должно обеспечивать разрешение каждого ТИ в их матрице. Нахождение перед каждым зеркалом нескольких ТИ позволит увеличить диаметр элементарного оптического элемента, что, возможно, увеличит общее количество разрешаемых ТИ по сравнению с предыдущим случаем при равных расстояниях L_{eye} от глаза до ТИ.

На рис.4,а представлена схема элемента растровой системы, который формирует часть виртуального изображения. В отличие от первой схемы, перед зеркалом находится матрица ТИ (рис.4,б). На рисунке показаны центральные лучи и по два крайних луча, исходящих из ТИ матрицы и расположенных в ее центре и на концах диагонали. Эти лучи формируют поле зрения зеркала α_{mps} .

На рис.4,б (справа) показаны области, засвеченные четырьмя ТИ, расположенными на концах диагоналей матрицы и в ее центре, на расстоянии L_{eye} от матрицы ТИ после отражения от зеркала. Как видно из рисунка, чтобы использовать до половины световой энергии крайних полей с диаметрами $D_{e field}$, необходимо, чтобы диаметр поля $D_{p field}$, образованный пересечением главных лучей крайних ТИ матрицы с плоскостью зрачка глаза, был меньше или равен диаметру зрачка глаза ($D_{p field} \leq D_{eye}$); разность освещенностей на сетчатке из-за виньетирования пучков зрачком может быть компенсирована различной яркостью ТИ.

Из рис.4 следует:

$$D_{p field} = 2(L_{eye} + L_f - S) \times \tan \left[k \arctan \left(\frac{D_{mir}}{2(L_{eye} + L_f - S)} \right) \right], \tag{11}$$

где $k = \alpha_{mps} / \alpha_{mir}$.

Чтобы не было пропусков и разрывов в виртуальном изображении, края двух соседних изображений должны либо совпасть, либо перекресть. Условие перекрытия

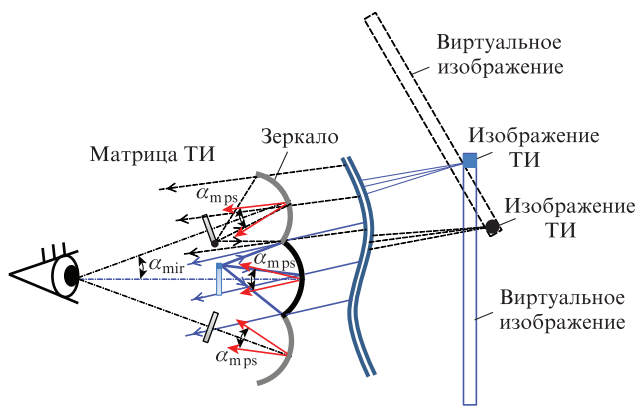


Рис.5. Схема, иллюстрирующая соотношение углов α_{mps} и α_{mir} .

виртуальных изображений соседних элементов растровой системы определяется из следующего неравенства: $\alpha_{mps}/2 \geq \alpha_{mir} - \alpha_{mps}/2$ (рис.5), откуда следует, что

$$\alpha_{mps} \geq \alpha_{mir} \tag{12}$$

Ключевыми параметрами для исследования рассматриваемых систем являются диаметр зеркала, положение глаза и параметр k .

Как видно из рис.6, изменение фокусного расстояния зеркала L_f почти не влияет на диаметр D_{pfield} . Однако чем больше D_{mir} , тем больше D_{pfield} . Условие использования половины световой энергии каждого ТИ требует, чтобы $D_{pfield} \leq D_{eye}$. Поскольку D_{eye} находится в диапазоне 3.5–8 мм, D_{pfield} должен быть больше минимального размера зрачка глаза (3.5 мм). Это условие будет выполняться при $D_{mir} < 2.5$ мм.

Для обеспечения высокой плотности ТИ (P) и попадания в глаз больше половины световой энергии всех ТИ, выберем диаметр зеркала D_{mir} равным 2.5 мм, минимальное расстояние L_{eye} равным 10 мм (из-за физиологических ограничений) и фокусное расстояние зеркала L_f равным 8 мм. При этом относительное отверстие зеркала $D_{mir}/L_f = 1/3.2$. Тогда из (4) и (11) получим $\alpha_{mps} = 11.27^\circ$, $\alpha_{mir} = 7.967^\circ$, $D_{mps} = 2L_f \tan(\alpha_{mps}/2) = 1.578$ мм при $k = \sqrt{2}$. Определим плотность ТИ, которую может разрешать данная система.

Критерий допустимой плотности расположения ТИ найдем, положив минимальный контраст изображения ма-

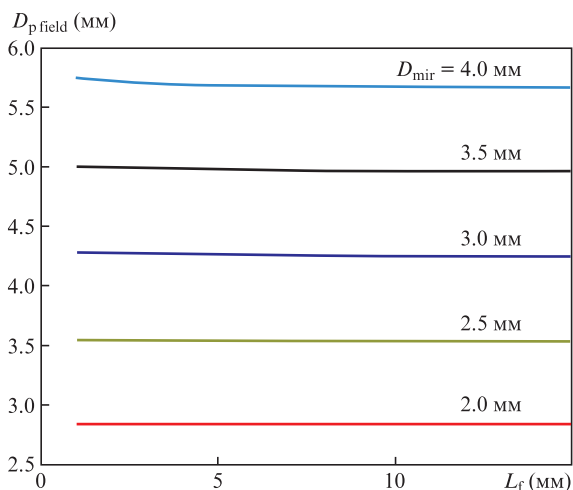


Рис.6. Зависимости D_{pfield} от L_f при $k = \sqrt{2}$, $L_{eye} = 10$ мм.

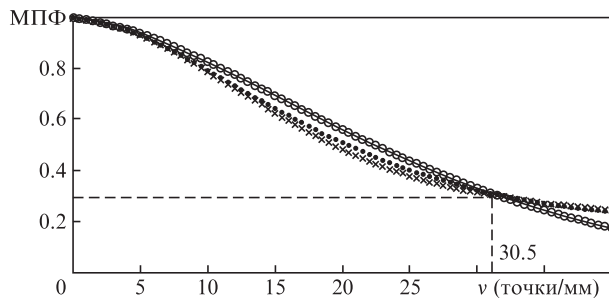


Рис.7. Зависимости МПФ от пространственной частоты v матрицы ТИ для областей в центре матрицы в меридиональной (○) и сагиттальной (—) плоскостях и для области матрицы на конце ее диагонали в меридиональной (●) и сагиттальной (×) плоскостях. Отмечена частота $v_{0.3}$, соответствующая контрасту 0.3.

трицы ТИ равным 0.3, что для среднестатистического глаза отвечает удовлетворительному качеству изображения:

$$0.3 \leq \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \tag{13}$$

Соответствующие зависимости модуляционной передаточной функции (МПФ), или частотно-контрастной характеристики системы, представлены на рис.7. Виден уровень контраста построенного оптической системой изображения предметов, имеющих соответствующие пространственные частоты. Поскольку зеркальная система является осесимметричной, то достаточно проанализировать половину поля от нуля до $\alpha_{mps}/2$. Из рис.7 следует, что данная зеркальная система способна передать с контрастом 0.3 пространственные частоты до 30.5 точек/мм.

Тогда можно оценить угловую плотность ТИ в единичном угле для данного значения МПФ:

$$P_{ps} = \frac{2v_{0.3}D_{mps}}{\alpha_{mps}} = \frac{2 \cdot 30.5 \cdot 1.578}{11.27} = 8.54 \text{ точек/град.} \tag{14}$$

Кроме того, можно посчитать максимальную плотность ТИ (N) на матрице ТИ для формирования виртуального изображения с контрастом 0.3 системой с полем зрения α_{mps} :

$$N = 2v_{0.3} = 2 \cdot 30.5 = 61 \text{ точек/мм.} \tag{15}$$

Было исследовано также изменение разрешения оптической системы в зависимости от относительного отверстия и диаметра зеркала D_{mir} с целью выбора оптимальных параметров для данной схемы. Проанализированы плотность ТИ в единичном угле P_{ps} и максимальная плотность ТИ на матрице N , которые можно разрешить с контрастом 0.3 в зависимости от относительного отверстия D_{mir}/L_f и диаметра зеркала (рис.8).

Как видно из рис.8, чем меньше D_{mir}/L_f , тем больше P_{ps} , т.е. тем большее количество ТИ может быть разрешено нашей системой. Для этого на матрице ТИ нужно установить ТИ с большей плотностью N , но при этом длина системы возрастет. Отметим, что P_{ps} слабо зависит от D_{mir} .

На рис.9 приведены схема и параметры для расчета энергии излучения ТИ, попадающей в глаз после отражения от зеркала.

Суммарную энергию излучения i -го ТИ, которое попадает в глаз, обозначаем как E_{θ_i} . Ее можно выразить в

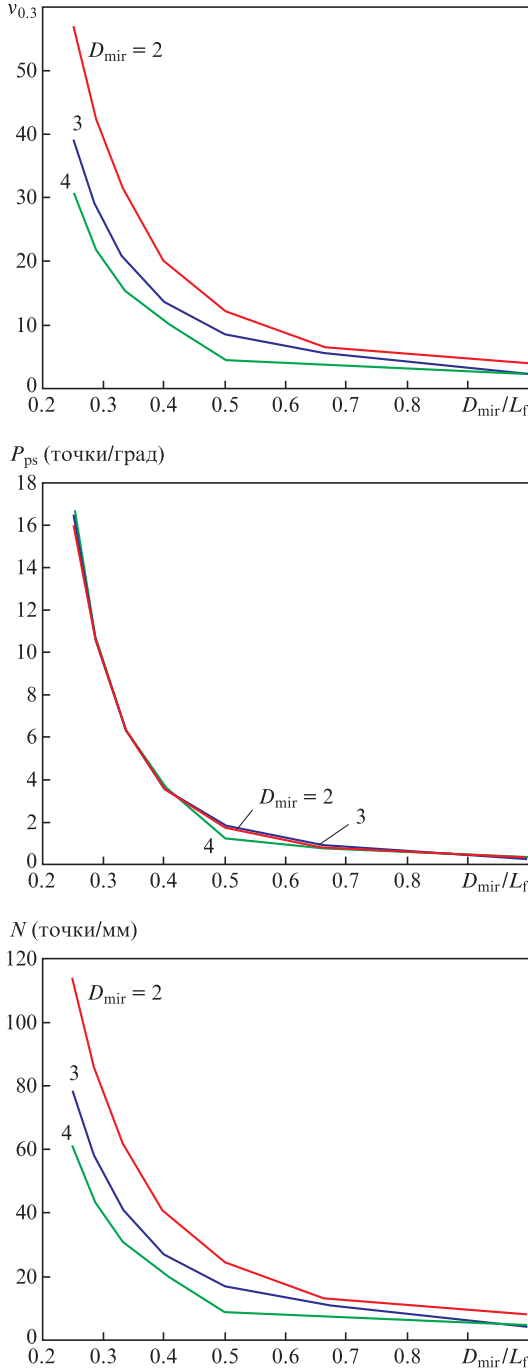


Рис.8. Зависимости $v_{0.3}$ (а), P_{ps} (б) и N (в) от D_{mir}/L_f , соответствующие контрасту изображения 0.3 на сетчатке при $k = \sqrt{2}$.

виде суммы энергий E_{1i} и E_{2i} , излучаемых i -м ТИ под отрицательными и положительными углами к оси системы и попадающих в глаз.

В предположении, что ТИ излучает световые пучки с ламбертовым распределением интенсивности ($I = I_0 \cos \theta$), E_{θ_z} можно определить так:

$$\begin{aligned}
 E_{\theta_z}(\alpha_{psi}) &= E_{1i}(\alpha_{psi}) + E_{2i}(\alpha_{psi}) \\
 &= \int_0^{\theta_{1i}} I_0 \cos \theta d\theta + \int_0^{\theta_{2i}} I_0 \cos \theta d\theta,
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

где I_0 – интенсивность излучения ТИ при $\theta = 0$.

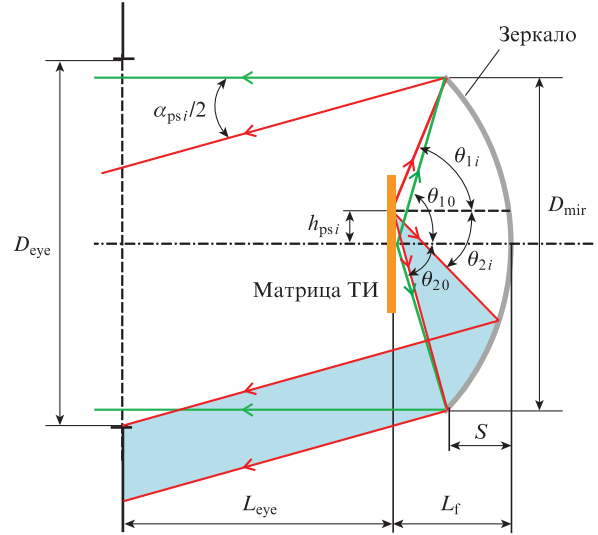


Рис.9. Схема и параметры для расчета энергии излучения i -го ТИ, попадающего в зрачок. Углы $\theta_{1,2i}$ образованы крайними лучами пучка излучения i -го ТИ, попадающими в зрачок. Индексы 1 и 2 обозначают соответственно отрицательные и положительные углы относительно оси системы, серая область – часть пучка, виньетируемая зрачком.

Как видно из рис.9, при некоторых углах α_{psi} отраженный от зеркала пучок излучения виньетируется зрачком глаза. В результате на сетчатке формируется изображение с неравномерной освещенностью.

На рис.10,а приведены зависимости от α_{psi} нормированных на E_{θ_z} энергий E_{1i} , E_{2i} и их суммы E_{θ_z} при $D_{eye} = 4$ мм. В этом случае угловой размер α_{psi} , соответствующий равномерному распределению освещенности изображения, составляет $\sim 2.3^\circ$. За пределами этого угла освещенность начинает падать. На рис.10,б показано, что размер области равномерной освещенности возрастает с увеличением D_{eye} .

В результате исследования была промоделирована оптическая система со следующими параметрами: $D_{eye} = 4$ мм, $D_{mir} = 2.5$ мм, $L_{eye} = 10$ мм и $L_f = 8$ мм (соответствует относительному отверстию $D_{mir}/L_f = 0.32$). Из-за осевой симметрии системы достаточно проанализировать ее, рассматривая ход лучей только в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Моделирование в программном пакете Zemax проводилось для системы зеркал, состоящей из 11 зеркал вдоль вертикальной и 11 зеркал вдоль горизонтальной осей, создающей поле зрения $87.67^\circ = 11\alpha_{mir}$ ($\alpha_{mir} = 7.97^\circ$). В качестве тестовых источников излучения был взят набор из пяти излучающих прямоугольных полосок (рис.11).

На рис.12 представлено изображение тестовых источников на сетчатке модели глаза. Видно, что изображения, сформированные соседними зеркалами, оказываются «сшитыми».

Моделирование показало, что при формировании каждым зеркалом растровой системы изображения нескольких ТИ можно увеличить по сравнению с первой схемой плотность ТИ в единичном угле в формируемом на сетчатке изображении. В частном случае, когда $D_{mir}/L_f = 1/3.2$, $k = \sqrt{2}$, $L_f = 8$ мм, $L_{eye} = 10$ мм, $D_{mir} = 2.5$ мм, плотность ТИ достигает 8.54 точек/град, при этом $N = 61$ точек/мм, что соответствует высокоразрешающим ПВМС, уже разработанным и выпускаемым промышленностью. По сравнению с первой схемой (один ТИ перед каждым зеркалом)

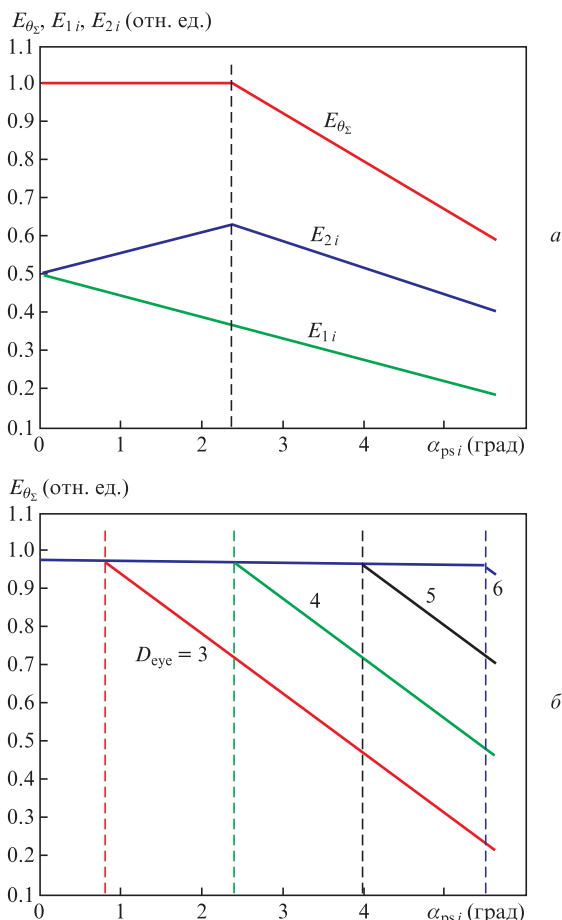


Рис.10. Зависимости от α_{psi_i} нормированных на E_{θ_z} энергий E_{1i} , E_{2i} и E_{θ_z} при $D_{eye} = 4$ мм (а) и энергии E_{θ_z} при $D_{eye} = 3, 4, 5$ и 6 мм (б). Штриховыми линиями отмечены границы углов, соответствующих равномерной освещенности изображений.

лом) разрешающая способность ВД, созданного по такой схеме, может быть увеличена в 3.1 раза. При этом необходимо предусмотреть возможность коррекции яркости ТИ для обеспечения равномерной освещенности изображения. Как отмечено выше, освещенность каждого изображения ТИ на сетчатке меняется в зависимости от размера зрачка глаза. В связи с этим необходимо использовать систему слежения за размером зрачка, чтобы корректировать яркость соответствующих пикселей.

4. Схема «один точечный источник – одно зеркало», размещенная в контактной линзе

Рассмотрим еще один вариант построения схем ВД с растровой оптикой – это контактная линза, расположенная непосредственно на роговице глаза. Ряд электронных компаний разрабатывают системы с так называемой смарт-линзой [10, 11]. В этих работах предложены схемы построения и многослойные структуры будущей «умной» контактной линзы, а также технология изготовления контактной линзы с базовыми элементами растра [12].

Ясно, что одним из самых привлекательных свойств таких растровых схем является небольшой продольный размер (контактные линзы по определению не могут иметь толщину больше долей миллиметра). Поэтому в настоящей статье мы коротко рассмотрим возможность размещения растровой оптики в контактной линзе. Другой привлекательной чертой контактной линзы является ее

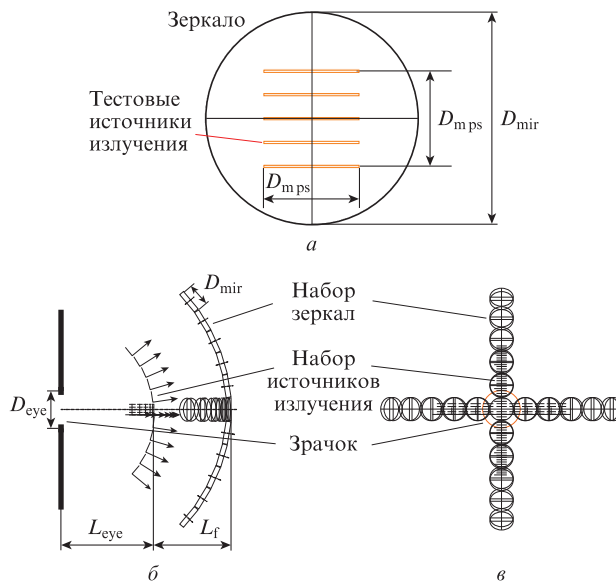


Рис.11. Схема многоточечных источников, показано по одному зеркалу 11×11 на вертикальной и горизонтальной осях: одно зеркало с пятью линиями источника излучения в качестве тестового источника (а); вид сбоку (показана только малая часть лучей) (б) и вид сзади (в).

расположение на оси глаза на минимально возможном расстоянии от зрачка. Она перемещается вместе с ним, и таким образом автоматически устраняется необходимость обеспечения большой ЗВВИ.

Типичные параметры контактной линзы таковы: диаметр $D_{cl} = 13-15$ мм, радиус кривизны $R = 8.1-8.9$ мм, отношение диаметра к толщине линзы $D_{cl}/t = 20-170$. Эти параметры определяются, с одной стороны, физиологией глаза человека (структурой, формой, чувствительностью склеры к наличию инородного предмета на поверхности и т. д.) и комфортностью (содержанием воды, проницаемостью для кислорода и т. д.) при ее использовании, с другой стороны – технологией изготовления [13–15].

Контактная линза является индивидуальной оптической системой. Каждому человеку необходимы линзы, параметры которых зависят от физиологических особенностей его глаза. В настоящей работе будет оценено возможное максимальное разрешение дисплеев на основе контактных линз для некоторых конкретных параметров линз.

Нами использовалась следующая модель (рис.13). В контактной линзе диаметром D_{cl} выделена область диа-

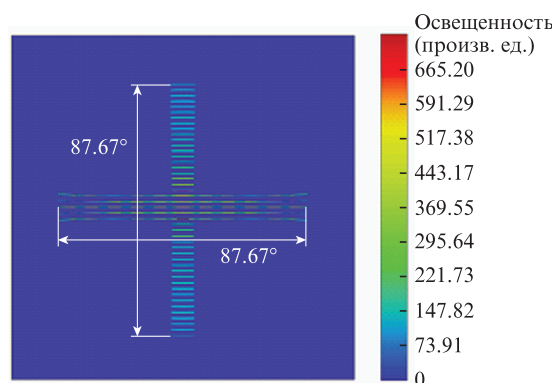


Рис.12. Изображения тестовых источников на сетчатке глаза. Указаны максимальные углы падения лучей от ТИ на плоскость зрачка.

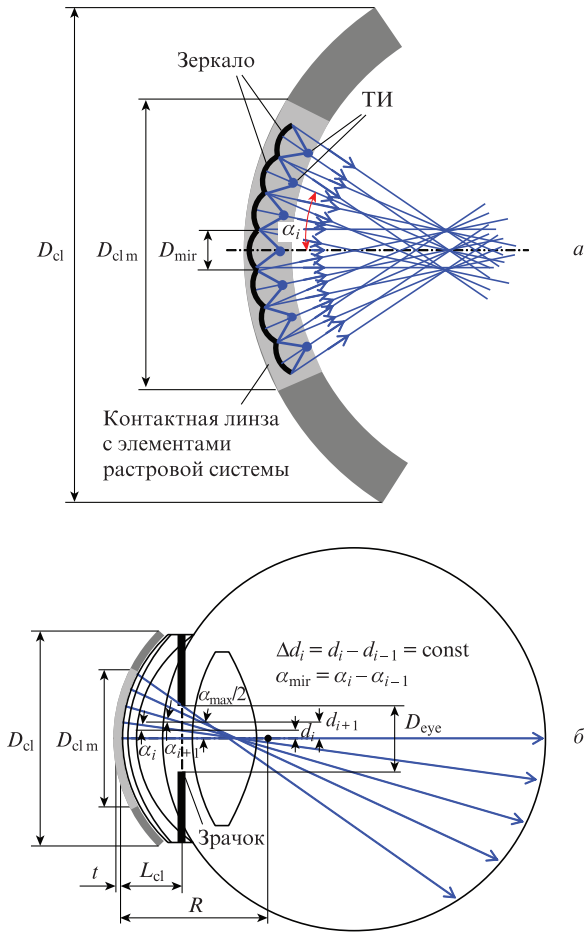


Рис.13. Расположение зеркал и ход лучей в контактной линзе (а), а также глаз и контактная линза с элементом растровой системы и параметры модели (б).

метром D_{clm} , в которой находятся базовые элементы – растровые сферические зеркала с точечными источниками.

Определим максимальное поле зрения α_{max} , равное углу между лучами, проходящими через края зрачка и области, в которой размещены зеркала:

$$\alpha_{max} = 2 \arctan\left(\frac{D_{clm} - D_{eye}}{2(L_{cl} - s)}\right), \quad (17)$$

где s – стрелка прогиба части контактной линзы диаметром D_{clm} , в которой расположены элементы растровой системы.

Пучки, сформированные отдельными зеркалами, будут приходить к глазу под разными углами. Чем дальше зеркало находится от центра контактной линзы, тем под большим углом пучок, сформированный этим зеркалом, приходит к зрачку глаза. Начиная от оптической оси, зрачок разбит на $N_{mir} - 1$ равных отрезков длиной $\Delta d_i = d_i - d_{i-1} = const$, где N_{mir} – количество зеркал (нечетное число); d_i – расстояние от границы i -го отрезка до центра зрачка глаза; i – целое число ($-(N_{mir} - 1)/2 \leq i \leq (N_{mir} - 1)/2$); $d_0 = 0$. Оптические оси зеркальных базовых элементов, число которых равно N_{mir} , проходят через границу соответствующих отрезков. Оптическая ось центрального зеркала проходит через центр зрачка, оптическая ось следующего зеркала – через границу первого отрезка и т.д.,

так что углы между осями соседних зеркал равны: $\alpha_{mir} = \alpha_i - \alpha_{i-1} = \alpha_{max}/(N_{mir} - 1)$. Здесь α_i – угол между осями контактной линзы и i -го зеркала.

Диаметр зеркала в контактной линзе D_{mir} зависит от количества зеркал N_{mir} (рис.14,а). Для получения высокого разрешения ВД нужно максимально увеличить N_{mir} , т.е. уменьшить D_{mir} . Однако с уменьшением диаметра зеркала увеличивается расходямость светового пучка из-за дифракции на зеркале. Если оценить максимальное разрешение так же, как и в случае первой схемы, т.е. по критерию Рэля (8) с учетом показателя преломления контактной линзы ($n = 1.5$), то можно получить максимальное разрешение для данной контактной линзы. Оно равно двум точкам на градус ($1/\alpha_{mir} = 1/0.48^\circ \approx 2$ точки/град) (рис.14,б).

Рассмотренная модель контактной линзы для виртуального дисплея позволяет сделать несколько выводов. В частности, для уменьшения дифракции на апертуре зеркала при отражении желательно, чтобы диаметр зеркала был не менее 53 мкм. В этом случае, согласно рис.14,б, количество ТИ, которое можно воспроизвести и разрешить глазом, составляет примерно по 156 в горизонтальной и вертикальной плоскостях в максимальном поле зрения $\alpha_{max} = 74^\circ$. Это означает, что можно построить виртуальное изображение с разрешением 2 точки/град при диаметре зрачка глаза $D_{eye} = 4$ мм, диаметре контактной линзы с растровыми элементами $D_{clm} = 8$ мм и радиусе кривизны поверхности контактной линзы $R = 8.5$ мм.

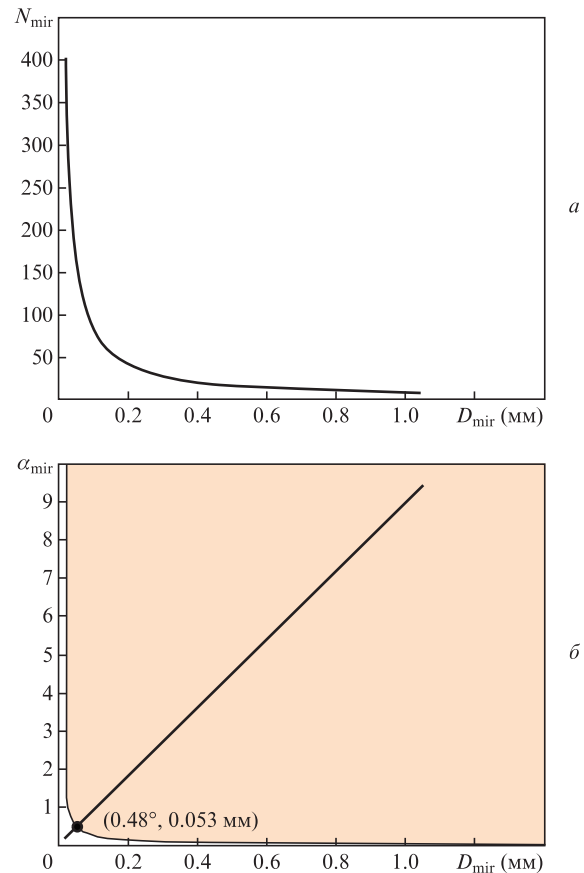


Рис.14. Зависимость N_{mir} от D_{mir} при $D_{eye} = 4$ мм, $D_{clm} = 8$ мм, $R = 8.5$ мм (а), а также зависимость α_{mir} от D_{mir} при тех же значениях параметров (закрашена область, в которой α_{mir} и D_{mir} удовлетворяют условию (8)) (б).

5. Заключение

Рассмотрены три схемы построения растровых виртуальных дисплеев. Для первой схемы, когда каждое зеркало дисплея строит виртуальное изображение только одного ТИ, показано, что плотность ТИ (максимальное разрешение) может достигать 3 точки/град в довольно большом поле зрения ($\sim 180^\circ$).

Вторая схема использует одно изображающее зеркало для формирования части поля виртуального изображения, а плотность ТИ составляет 8.54 точек/град в большом поле зрения ($\sim 180^\circ$).

Третья схема аналогична первой схеме, только оптическая система находится не в воздухе, а иммерсирована к роговице глаза. С использованием подобной системы можно достичь плотности ТИ до 2 точек/град в максимальном поле зрения 74° . Эта схема уникальна тем, что в ней отсутствует требование к ЗВВИ, которое является слабым местом в растровых системах для ВД.

Подобные рассмотренным варианты разрабатываемых виртуальных дисплеев во многих случаях могут оказаться не подходящими для формирования высокоразрешающего виртуального изображения. Однако ряд положительных свойств у этих схем все-таки есть. Они будут полезны в качестве дисплеев виртуальной и дополненной реальности в индикаторных и навигационных системах, где формируемое виртуальное изображение не должно сливаться с окружающим пространством. Продольный

размер дисплеев такого типа будет очень малым, а угол зрения виртуального изображения, наоборот, довольно большим.

1. Duparré J., Dannberg P., Schreiber P., Bräuer A., Tünnermann A. *Appl. Opt.*, **44** (15), 2949 (2005).
2. Helbing R., Gruhlke R. Patent US 20070181785 A1 (2007).
3. Yu J., Holland D.B., Blake G.A., Guo C. *Opt. Express*, **21** (2), 2097 (2013).
4. Smoot L.S. Patent US 5883606 A1 (1995).
5. Bae Systems PLC, Patent EP 2447758 A1 (2010).
6. Lanman D., Luebke D. *Proc. ACM SIGGRAPH Asia*, **32** (6), 220 (2013).
7. Hong K., Yeom J., Jang C., Hong J., Lee B. *Opt. Lett.*, **39** (1), 127 (2014).
8. Guillaumée M., Vahdati S.P., Tremblay E., Mader A., Cadarso V.J., Grossenbacher J., Brugger J., Sprague R., Moser C. *Proc. SPIE*, **8643**, 864306 (2013).
9. Maimone A., Lanman D., Rathinavel K., Keller K., Luebke D., Fuchs H. *Proc. ACM SIGGRAPH*, **33** (4), 89 (2014).
10. Kim T., Hwang S., Kim S., Ahn H., Chung D. Patent US 20160091737 A1 (2016).
11. Linhardt J.G., Ho H. Patent US 20140197558 A1 (2014).
12. Huang W., Zhao Y. Patent WO 2013081555 A1 (2013).
13. Keirl A., Christie C. *Clinical Optics and Refraction. A Guide for Optometrists, Contact Lens Opticians and Dispensing Opticians* (Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2007).
14. Tasman W. *Duane's Ophthalmology* (Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2012).
15. McNamara N.A., Polse K.A., Brand R.J., Graham A.D., Chan J.S., McKenney C.D. *Am. J. Ophthalmol.*, **127** (6), 659 (1999).