

УДК 535.8, 681.78, 535.317

Проектирование оптической системы дополненной реальности на базе световодного комбинера

© 2019 г. **Г. Э. Романова**, канд. техн. наук; **В. Н. Васильев**, доктор техн. наук;
Т. А. Конева, аспирант

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: romanova_g_e@mail.ru, takoneva@bk.ru

Поступила в редакцию 23.05.2019

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-09-25-29

Рассмотрены вопросы проектирования компактной оптической схемы для системы дополненной реальности, построенной на базе световодного комбинера. Выполнено моделирование световодной структуры при ее работе с различными типами формирующих изображение объективов, проанализированы структура зрачковой зоны и причины возникновения паразитных изображений, а также рассмотрены возможные варианты их устранения.

Ключевые слова: дополненная реальность, световодная структура, комбинер.

Коды OCIS: 080.1238, 350.4600

Системам дополненной реальности уделяется большое внимание в связи с постепенным внедрением подобных технологий в различные сферы деятельности. Система дополненной реальности, как правило, состоит из генератора символов (микродисплея), изображение с которого передается через оптическую систему и специальный оптический элемент — комбинер, в поле зрения пользователя.

Существуют различные варианты реализации оптической системы дополненной реальности: на основе комбинеров в виде плоских или неплоских зеркал, призм с поверхностями свободной формы, световодных элементов, массивов микропризм или микрозеркал [1, 2]. Чаще всего в системах дополненной реальности в качестве источника изображения используются микродисплеи AMLCD (*Active Matrix Liquid Crystal Display* — жидкокристаллический дисплей с активной матрицей) и FLCOS (*Ferroelectric Liquid Crystal on Silicon* — ферроэлектрические жидкие кристаллы на кремнии) [3].

Компактные размеры и большое поле зрения — основные требования к системам, размещаемым на голове пользователя. Специальные световодные системы имеют преимущество перед остальными решениями, так как позволяют полу-

чить компактную систему с достаточными полем зрения и размером зрачковой зоны при использовании цветного микродисплея высокого разрешения. Зрачковая зона в этом случае формируется за счет вывода излучения из световодной структуры благодаря использованию светоделительных слоев или голографических оптических элементов (например [3, 4]). Вариант системы со светоделительными слоями представляется более перспективным с точки зрения реализации в условиях российского производства. Несмотря на очевидные достоинства, такие системы имеют и существенные недостатки, к которым прежде всего можно отнести слепые зоны и возникновение паразитных изображений [4–6]. Кроме того, в литературе уделяется мало внимания согласованию такого комбинера с системой объектива [4, 5].

Современные системы дополненной реальности должны обеспечивать следующие характеристики: угловое поле $2\omega \geq 20^\circ$, размер зрачковой зоны (диаметр) $D \geq 10$ мм (при размещении на голове или шлеме наблюдателя). При этом для обеспечения необходимого размера зрачковой зоны можно использовать миниатюрный объектив с относительно небольшим диаметром входного зрачка, а больший размер будет обеспечиваться за счет

мультиплицирования в комбинере. Так, например, для достижения размера зрачковой зоны 15 мм при использовании пяти светоделительных слоев необходим объектив с диаметром входного зрачка 3 мм.

Световодная схема состоит из трех частей — микродисплей, объектив и световодная структура. Специальная световодная структура обеспечивает мультиплицирование световых пучков, заполняющих входной зрачок (рис. 1). Один из способов организации световодной структуры — использование светоделительных покрытий [5, 7]. В этом случае для обеспечения необходимого размера зрачковой зоны используются несколько полупрозрачных зеркал, находящихся внутри структуры. На практике такая система может представлять собой несколько призм с нанесенными на грани покрытиями.

Поскольку внутри световода световые пучки должны распространяться за счет полного внутреннего отражения, то угол входной призмы θ должен удовлетворять условию

$$\frac{\varepsilon_{\text{tir}} + \omega}{2} < \theta < \frac{180^\circ - \varepsilon_{\text{tir}} - \omega}{2}, \quad (1)$$

где ε_{tir} — предельный угол полного внутреннего отражения, ω — половина углового поля объектива.

Если материал световода — стекло К8, то $\varepsilon_{\text{tir}} = 41^\circ 16'$. Тогда, согласно выражению (1), угол призмы ввода излучения должен находиться в пределах $29^\circ < \theta < 61^\circ$. В представленных ниже системах $\theta = 30^\circ$.

Для получения равномерной освещенности в зрачковой зоне необходимо обеспечить равенство световых потоков, выходящих из световодной структуры за счет отражения на слоях. Так, для обеспечения равномерной освещенности в пределах формируемой зрачковой зоны светоделительные покрытия должны иметь следующие коэффициенты пропускания и отражения: 0,83/0,17, 0,8/0,2, 0,75/0,25, 0,67/0,33, 0,5/0,5 (при использовании пяти светоделительных слоев).

Для сохранения структуры пучка, входящего в световод, его диаметр должен быть в два раза меньше размера входной грани призмы. Однако в таком случае в системе присутствуют слепые зоны значительного размера — области зрачковой зоны, в которых изображение будет видно не полностью или с зонами уменьшения яркости. Так, при диаметре осевого пучка, входящего в световодную структуру, 3 мм и размере входной грани призмы 6 мм размер слепой зоны будет равен 6 мм. Размер слепых зон больше диаметра зрачка глаза наблюдателя, что в значительной мере препятствует правильному восприятию изображения. Поэтому для устранения этого недостатка необходим пучок большего размера.

Еще одной особенностью систем, построенных с использованием световодного комбинера, является сложная структура зрачковой зоны: каждый слой формирует изображение зрачка, смещенное как в поперечном направлении (вдоль формируемой зоны), так и в продольном направлении (вдоль оси зрения). При этом неизбежно возникновение виньетирования и, следовательно, снижение освещенности различных зон изображения.

Для анализа результатов работы световодной структуры представляет интерес рассмотреть ее работу с различными объективами. Для обеспечения характеристик, заявленных выше, был рассчитан четырехлинзовый объектив с вынесенным зрачком, имеющий фокусное расстояние 16,8 мм, диаметр входного зрачка 6 мм, угловое поле 30° , положение зрачка относительно первой поверхности $S_p = -5$ мм (рис. 2а). Для уменьшения массы линз системы были использованы полимерные материалы — полиметилметакрилат и поликарбонат. Объектив рассчитан на работу с микродисплеем AMLCD фирмы *Kopin* (разрешение экрана 640×480 пикселей, размеры сторон 7,2 и 5,4 мм [8]).

В качестве альтернативной схемы была рассмотрена работа световода с объективом типа «двойной Гаусс» (*Double Gauss*), пересчитанным под необходимые параметры (рис. 2б). Система имеет

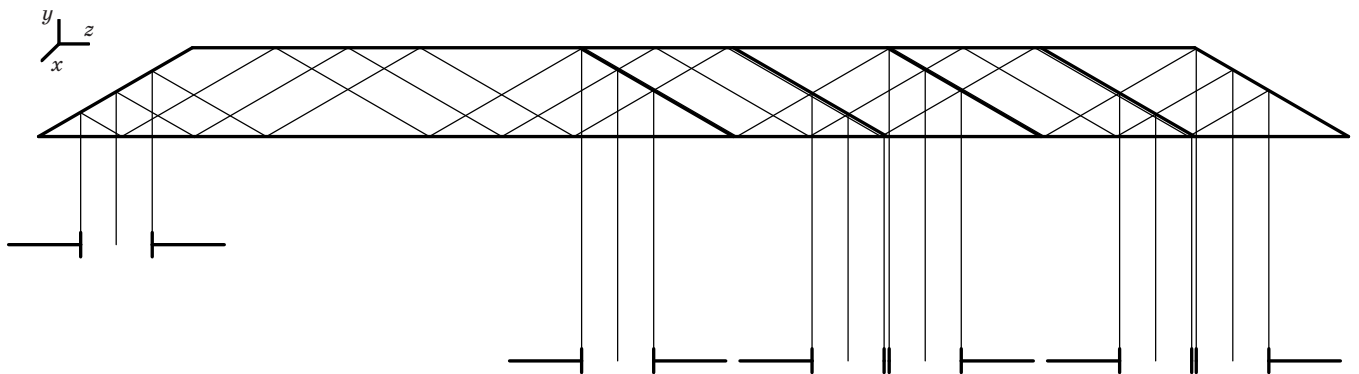


Рис. 1. Принцип работы световодной структуры с полупрозрачными зеркалами.

более высокое качество изображения, но входной и выходной зрачки являются мнимыми.

Также рассмотрена работа световода с объективом, позволяющим работать с генератором символов типа FLCOS при следующих его параметрах: размеры сторон 18 и 14 мм, разрешение экрана 1280×1024 пикселей. Пятилинзовый объектив (фокусное расстояние 42,8 мм, диаметр зрачка 6 мм, диагональное угловое поле 30° , положение зрачка относительно первой поверхности $S_p = -20$ мм) представлен на рис. 2в.

Все приведенные объективы были рассчитаны в обратном ходе лучей, коэффициент передачи контраста (КПК) на частоте Найквиста объективов с вынесенным зрачком составляет не менее 0,3. Объектив по схеме «двойной Гаусс» обеспечивает КПК не ниже 0,7.

Миниатюрный генератор символов (микродисплей AMLCD) позволяет использовать объективы с более коротким фокусным расстоянием. Это, прежде всего, несколько облегчает коррекцию aberrаций системы, а также дает преимущество

в ее габаритах и массе. Однако при этом уменьшается достижимый вынос зрачка. Необходимо также помнить о том, что в системе с дисплеем FLCOS необходимо обеспечить подсветку экрана, что обычно выполняется за счет использования светоделительной куб-призмы.

Для анализа особенностей формируемого изображения рассмотрим угловое распределение яркости при разных положениях (z) приемника (зрачка глаза наблюдателя) вдоль направления, в котором происходит мультиплицирование зрачка ($z = 31$ мм и $z = 35$ мм). Приемник излучения диаметром 4 мм, имитирующий глаз наблюдателя, располагается на расстоянии 15 мм от световодной структуры. Трассировка лучей выполняется в направлении от генератора символов (дисплея) к глазу наблюдателя. На рис. 3 приведены распределения яркости в зависимости от полевого угла в сечении, вдоль которого происходит мультиплицирование зрачка.

По приведенным угловым распределениям можно судить о зонах со сниженной яркостью. Например, у четырехлинзового объектива такие зоны присутствуют при угловом поле 5° и положении

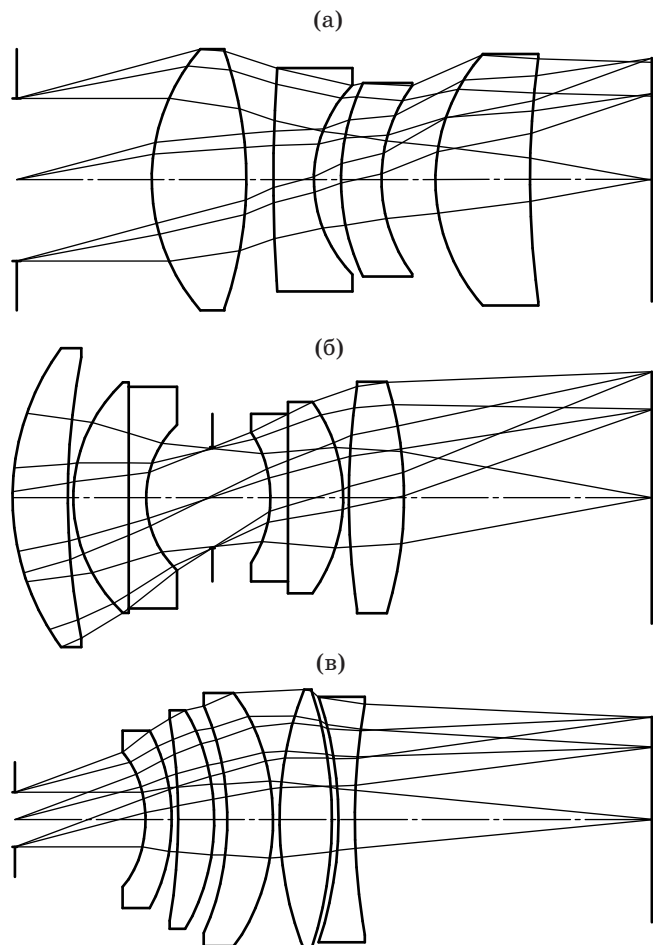


Рис. 2. Схемы с ходом лучей четырехлинзового объектива с вынесенным зрачком (а), объектива типа «двойной Гаусс» (б), пятилинзового объектива с вынесенным зрачком (в).

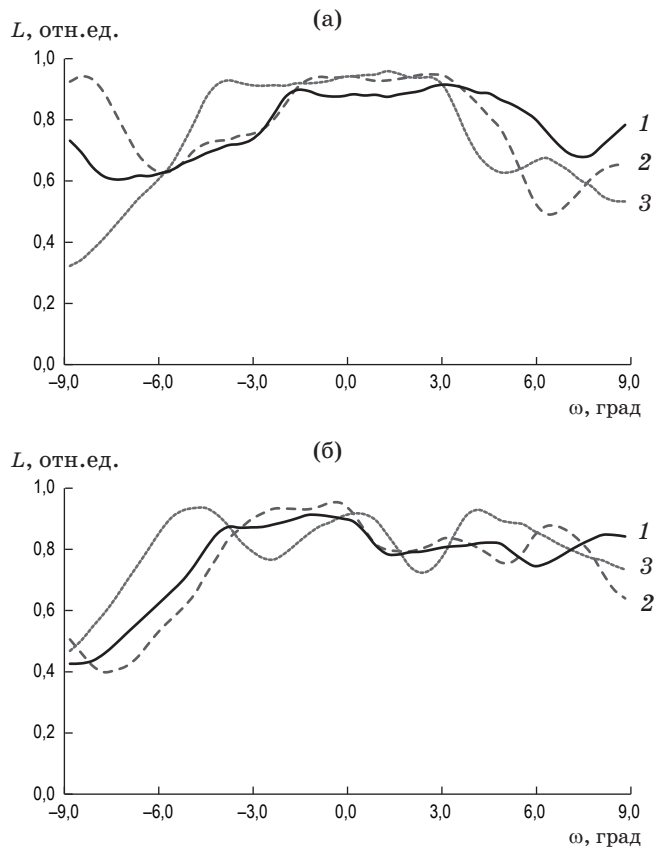


Рис. 3. Угловые распределения яркости (L) при положениях приемника (зрачка глаза наблюдателя) $z = 31$ мм (а) и $z = 35$ мм (б). 1 — световод с пятилинзовым объективом, 2 — световод с объективом «двойной Гаусс», 3 — световод с четырехлинзовым объективом.

приемника $z = 31$ мм (рис. 3а) и при угловом поле $\pm 3^\circ$ и положении приемника $z = 35$ мм (рис. 3б).

Так, по угловым распределениям яркости удобно оценивать наличие и положение зон со снижением освещенности изображения и, кроме того, количественное снижение освещенности в системе со световодным комбинером.

Помимо рассмотренной выше проблемы в системах на базе световодных элементов может возникать еще одна — дополнительные паразитные изображения. Возможны две причины их появления: при двойном отражении от грани призмы ввода излучения (рис. 4а) и при падении лучей на светоделительный слой с внешней стороны (на рис. 4б обозначено пунктиром).

В работе [6] был предложен способ борьбы с дополнительными изображениями с помощью ввода излучения в световод с использованием дополнительной призмы особой конфигурации с поглощающей гранью для устранения двойного отражения от грани призмы ввода излучения. Такая призма будет поглощать лучи, создающие паразитные изображения. Во втором случае авторы [6] предлагают изменять (уменьшать) угол входной грани призмы, чтобы лучи, способствующие возникновению паразитных изображений, прошли мимо зрачковой зоны. Однако такой способ не всегда осуществим ввиду ограничения (1) для угла входной призмы. Кроме того, поглощение части пучка на призме ввода излучения приводит к снижению полезного светового потока в системе.

Для решения проблемы двойного отражения от грани призмы ввода излучения в данном случае

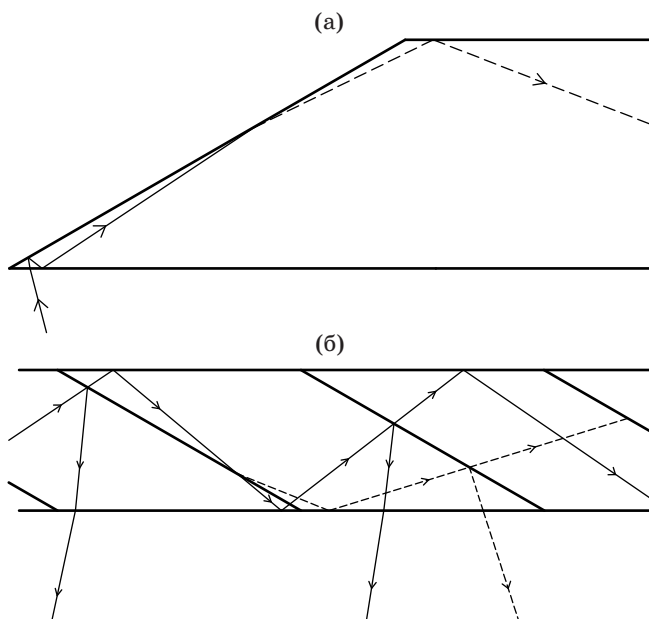


Рис. 4. Причины возникновения паразитных изображений: двойное отражение на входной грани призмы (а), падение лучей на светоделительный слой с внешней стороны (б).

предлагается ввести дополнительную призму — «ступень», продлив тем самым отражательную грань (рис. 5). Тогда та часть внеосевого пучка, создающая дополнительные изображения, попадет на поглощающую грань. При этом, чтобы не допустить виньетирования осевого пучка, необходимо сдвинуть генератор изображения и оптическую систему, стоящую до световодной структуры, по оси z на расстояние, равное половине катета поглощающей призмы. Размеры призмы будут зависеть от угла призмы θ , углового поля и от размера входной грани призмы ввода излучения. Такая призма устраняет паразитный свет, возникающий в данном случае.

Устранение посторонних изображений, возникающих при падении лучей на светоделительный слой с внешней стороны (рис. 4б), возможно при нанесении профилированных покрытий [5].

Результат моделирования работы световода с объективом типа «двойной Гаусс» для одного положения приемника представлен на рис. 6. Для моделирования изображения использовалась параксиальная линза диаметром 4 мм, фокусным расстоянием 15 мм, в фокальной плоскости которой

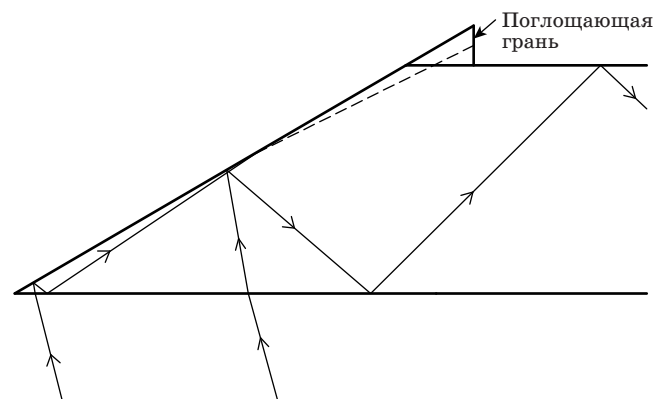


Рис. 5. Схема ввода излучения в световод с дополнительной призмой для устранения паразитных изображений.

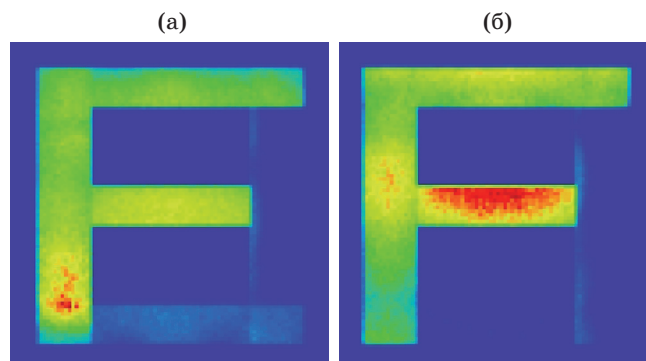


Рис. 6. Изображения, прошедшее через световодную структуру без средств коррекции паразитных изображений (а), и при вводе дополнительной поглощающей призмы и нанесении профилированных покрытий (б).

устанавливался приемник излучения. Как видно из рис. 6б, профилированные покрытия и дополнительная призма позволяют в значительной мере избежать появления паразитных изображений.

Для мультиплицирования зрачка в двух направлениях применяется двумерная световодная структура [9, 10]. Благодаря мультиплицированию зрачка в обоих направлениях размер зрачковой зоны будет равен 30×30 мм. Так как межзрачковое расстояние варьируется в пределах 50–70 мм, такого размера зрачковой зоны вполне достаточно для комфортного использования системы в монокулярном исполнении без предварительной настройки.

Таким образом, в работе рассмотрены вопросы проектирования компактной оптической схемы для системы дополненной реальности, построенной на базе световодного комбинера. Выполнено моделирование световодной структуры при ее работе с объективами различных типов. Предложен метод анализа структуры зрачковой зоны по угловому распределению освещенности. Проанализированы причины возникновения в световодной структуре паразитных изображений и рассмотрены возможные варианты их устранения.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания (тема № 3.2506.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

1. Rolland J.P., Hua H. Head-mounted display systems // Encyclopedia of Optical Engineering. 2005. P. 1–13.
2. Kress B., Saeedi E., Brac-de-la-Perriere V. The segmentation of the HMD market: Optics for smart glasses, smart eyewear, AR and VR headsets // Proc. SPIE. Photonics Applications for Aviation, Aerospace, Commercial, and Harsh Environments V. 2014. V. 9202. P. 92020D-1–92020D-14.
3. Бахолдин А.В., Васильев В.Н., Гримм В.А. и др. Оптические устройства виртуальных дисплеев // Оптический журнал. 2013. Т. 80. № 5. С. 17–24.
4. Cheng D., Hou Q., Qiwei W., et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics // Opt. Exp. 2014. V. 22. № 17. P. 20705–20719.
5. Amitai Y. Extremely compact high-performance HMDs based on substrate-guided optical element // SID Symp. Digest of Technical Papers. 2004. V. 35. № 1. P. 310–313.
6. Cheng D., Hou Q., Wang Y. Stray light and tolerance analysis of an ultrathin waveguide display // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 28. P. 8354–8362.
7. Hou Q., Wang Q., Wang Y. Geometrical waveguide in see-through head-mounted display: A review // Proc. SPIE. 2016. V. 10021. P. 100210C-1–100210C-8.
8. Kopin. Commercial Displays [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kopin.com/kopin-cyberdisplay-vga-lvs/#>. Заглавие с экрана. (Дата обращения: 23.06.2019).
9. Гримм В.А., Рудакова М.С., Смирнов С.А. Микропроекторные системы смешанной и дополненной реальности на плоских волноводных экранах // Известия ВУЗов. Приборостроение. 2013. № 9(56). С. 84–89.
10. Gu L., Cheng D., Wang Y., et al. Design of two-dimensional waveguide head-up display // Proc. SPIE. 2018. V. 10693. P. 106930G-1–106930G-14.