

**ОПТИЧЕСКИЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ**

УДК 681.3.06

А. М. Ковалев

(Новосибирск)

**О СПОСОБЕ ОТОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
В СФЕРИЧЕСКОЙ ПЕРСПЕКТИВЕ**

Рассмотрен способ отображения пространственных объектов путем переноса миниатюрных сферических изображений объектов на сетчатку глаза с помощью вогнутого сферического зеркала. В отличие от классического способа, применяемого в напольных дисплеях с плоскими изображениями, предложенный способ обеспечивает высокую разрешающую способность без какой-либо коррекции аберраций, большие поля зрения, малый вес и стоимость окуляров.

В работах [1, 2] показано, что с точки зрения наблюдателя окружающее его трехмерное пространство является сферическим. Поэтому наиболее естественным отображением окружающей среды становится центральная проекция на сферу или сферическая перспектива. Этот метод обладает рядом несомненных преимуществ по сравнению с классическим методом имитации визуального пространства на плоских изображениях в рамках линейной перспективы. Сферические изображения не имеют геометрических, интерпозиционных и яркостных искажений. Сферическая перспектива обеспечивает большие поля наблюдения, перекрывающие поле зрения человека. Неискаженно воспроизводятся объекты на малых расстояниях из-за проявления механизма константности угловых величин и эффекта обратной перспективы. Соблюдается инвариантность основному движению глаза – вращению. Возможен учет глубинно-фокусных вариаций взгляда при аккомодации. Сферическое проективное преобразование обладает свойствами конформного отображения, что существенно для механизма константности формы предметов.

Естественным образом возникает вопрос о практической реализации достоинств метода. Следует отметить, что известны устройства, создающие изображения на сферических экранах. Их немного. Примерами могут служить купольные сооружения кинотеатров системы ОМНИМАКС-65 с диаметром сферы 27 м [3] и современные системы визуализации для авиационных тренажеров с куполами от 2,5 до 7 м в диаметре [4]. Приближаются к сферической перспективе известные панорамы и диорамы, например, Бородинской битвы или Севастопольского сражения.

На наш взгляд, наиболее полно достоинства сферической перспективы могут проявиться в миниатюрных дисплеях персонального пользования. Микродисплеи можно носить как очки, монтировать на шлеме, голове или удерживать руками подобно зрительным трубам или биноклям. В таких устройствах, максимально приближенных к глазу, центр сферической проекции можно совместить с центром вращения глазного яблока и тем самым обеспечить инвариантность перспективы основному движению глаза – вращению.

Прежде чем перейти к описанию способа отображения объектов в микродисплеях со сферической перспективой, что является основной темой данной работы, рассмотрим принципы построения современных дисплеев на шлемного типа, выполненных на базе жидкокристаллических микроматриц (ЖК-микродисплеи). Это улучшит понимание вопроса и создаст поле для сравнения.

ЖК-микродисплей. Первый нашлемный дисплей на жидких кристаллах от карманного телевизора разработан в 1985 году для NASA фирмой LEEP Systems, Inc. [5]. В 1992 году агентство DARPA в США инициировало программу создания ЖК-микродисплеев с высоким разрешением и малыми размерами для замены тяжелых, дорогих и громоздких ЭЛТ в армейских нашлемных индикаторах [6]. К маю 1995 года уже более 20 фирм выпускали более 40 типов нашлемных дисплеев разной стоимости [7]. Несмотря на большое разнообразие продукции, рынок персональных микродисплеев практически не развивается. Это объясняется целым рядом причин, в том числе и плохим соотношением стоимости и характеристик дисплеев, которые невозможно улучшить путем комбинации известных технологий.

На рис. 1 приведена типичная схема. Ход лучей от ЖК-микроматрицы показан сплошными стрелками, от окружающей среды – штриховыми. Использование вогнутых сферических зеркал не принципиально и оправдано лишь компактностью конструкции. В остальном вогнутое зеркало работает как обычная рефракционная линза, которая увеличивает плоские изображения на ЖК-микроматрице и переносит эти изображения на «бесконечность» или расстояние наилучшего зрения в соответствии с известным способом построения мнимых изображений предметов [8]. Плоское изображение помещают в непосредственной близости от фокальной плоскости, проходящей через передний фокус линзы, а входной зрачок глаза располагают в плоско-

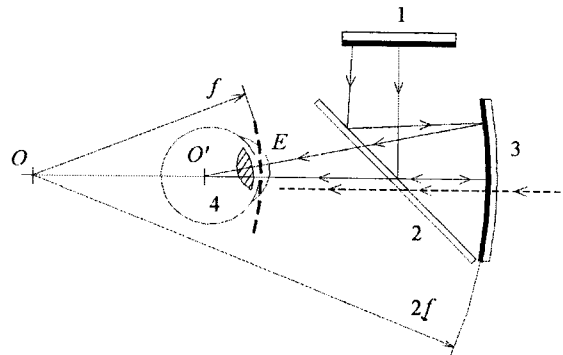


Рис. 1. Схема типичного нашлемного дисплея: 1 – ЖК-микроматрица; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – вогнутое зеркало; 4 – глаз; O – центр вогнутого зеркала; O' – центр вращения глаза; E – входной зрачок глаза; f – фокусное расстояние зеркала; $2f$ – радиус вогнутого зеркала

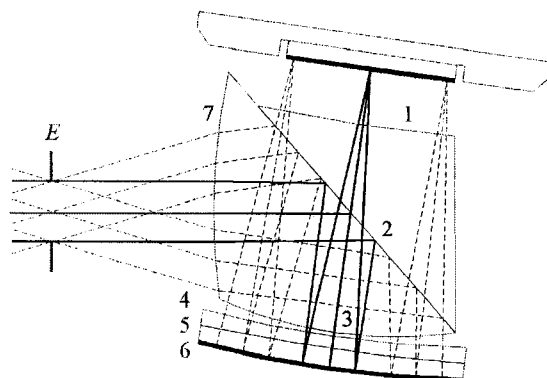


Рис. 2. Окуляр нашлемного дисплея: 1 – асферическая поверхность; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – сферическая поверхность; 4, 5 – менiscoобразный коллектив; 6 – главное вогнутое зеркало; 7 – сферическая поверхность; *E* – выходной зрачок окуляра

сти заднего фокуса линзы. Поскольку сферическое зеркало 3 имеет один фокус, используется наклонное полупрозрачное зеркало 2 для оптического совмещения изображения на ЖК-микроматрице с входным зрачком глаза *E* вблизи фокальной поверхности зеркала.

Таким образом, оптика нашлемного дисплея функционально эквивалентна оптике окуляра телескопа или зрительной трубы. Поскольку фокусные расстояния малы (30–50 мм), а входной зрачок окуляра определяется размером ЖК-микроматрицы (обычно $26 \times 19,1$ мм), относительные отверстия таких приборов велики (1 : 1–1 : 2). Если к этому добавить требование больших углов поля зрения (наклонные внеосевые пучки света), большой диаметр выходного зрачка ≥ 15 мм (широкие пучки света) и большой вынос зрачка ≥ 20 мм, то становится очевидным, что требования к оптической системе экстремальны.

В дисплеях простейшего вида (см. рис. 1) aberrации минимальны только для пучка, главный луч которого совпадает с оптической осью *OO'* и зрительной осью глаза. При отклонении зрительной оси от оптической неизбежны искажения изображений. Необходима тщательная коррекция aberrаций широких пучков (сферической aberrации и комы) и коррекция полевых aberrаций (астигматизма, кривизны изображения и дисторсии). На рис. 2 для примера показан меридиональный разрез окуляра нашлемного дисплея японской фирмы Olympus Optical Co., Ltd. (Токио), выполненного в виде призматического светоделиителя из полиметилметакрилата [9]. Для исправления aberrаций используется семь поверхностей.

Можно сделать следующие выводы: 1) применение обычных технологий рефракционной оптики для устранения aberrаций в окулярах приводит к увеличению веса и стоимости нашлемных дисплеев; 2) при проектировании дисплеев не учитываются особенности оптики глаза, зависимости между периферичностью зрения и его остротой.

Виртуальный сферический экран. На рис. 3 схематически представлен новый способ отображения пространственных объектов на виртуальном сферическом экране [10].

Способ состоит в том, что точечные элементы (*A, B, C*) изображений объектов с угловыми координатами, равными угловым координатам

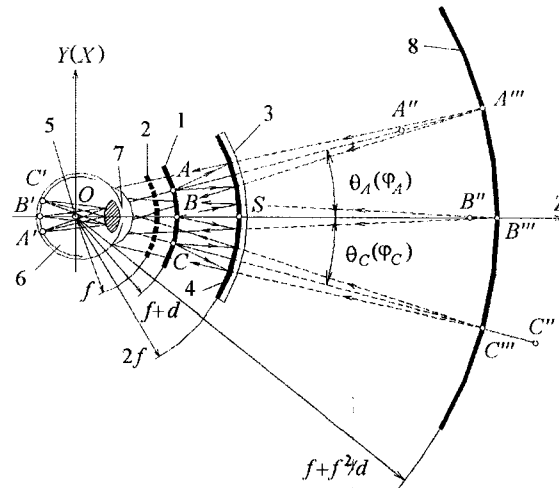


Рис. 3. Схематическое представление нового способа отображения пространственных объектов: 1 – сферическое изображение; 2 – фокальная поверхность зеркала; 3 – вогнутое зеркало; 4 – отражающая поверхность зеркала; 5 – центр вращения глаза; 6 – глаз; 7 – входной зрачок глаза; 8 – виртуальный сферический экран

$(\theta_A(\varphi_A), \theta_B = 0(\varphi_B), \theta_C(\varphi_C))$ точечных элементов (A'', B'', C'') пространственных объектов, располагают на сферической поверхности 1 между фокальной поверхностью 2 радиуса f зеркала 3 и отражающей поверхностью 4 радиуса $2f$ зеркала 3. Центр сферической поверхности 1 совмещают с центром зеркала 3 и центром вращения 5 глаза 6 (начало прямоугольной системы координат XYZ). Радиус сферической поверхности 1 устанавливают равным $f + d$ для зрительного восприятия точечных элементов (A'', B'', C'') пространственных объектов на виртуальном сферическом экране 8 радиуса $f + f^2/d$ (A''', B''', C''') . Угловые координаты θ, φ задают в сферической системе координат, связанной с прямоугольной XYZ .

Рассмотрим процесс переноса зеркалом точки B вдоль зрительной оси на сетчатку глаза в точку B' (см. рис. 3). Элемент изображения, расположенный в точке B , излучает пучок света. Отразившись от поверхности зеркала и уменьшив свою расходимость, световой пучок через оптическую систему глаза (роговицу, водянистую влагу, входной зрачок, хрусталик и стекловидное тело) фокусируется на центральной ямке желтого пятна сетчатки в точке B' . Главный луч пучка света из точки B падает на отражающую поверхность зеркала с нулевым углом падения. Кроме того, световой пучок, проникающий в глаз, имеет малую апертуру, равную диаметру входного зрачка глаза (2–3 мм). Поэтому элемент изображения B отображается в B' с малыми оптическими aberrациями. Астигматизм отсутствует, сферические угловая и волновая aberrации минимальны. Расстояние, на которое при этом аккомодирует глаз, можно определить из известной формулы для сферического зеркала [8]:

$$1/BS - 1/SB''' = 1/f. \quad (1)$$

Здесь S – вершина зеркала; f – фокусное расстояние. Заметим, что $BS = f - d$, а $SB''' = OB''' - 2f$, где d – расстояние от точки B до фокальной поверхности

зеркала; OB''' – радиус виртуального сферического экрана. Из формулы зеркала следует, что

$$OB''' = f + f^2/d. \quad (2)$$

Если расстояние до виртуального экрана рассчитывать в диоптриях от фокальной поверхности, то

$$d = f^2 A / 1000, \quad (3)$$

где f – фокусное расстояние (в мм); A – аккомодация (в дптр). При $f = 20$ мм и объеме аккомодации $A = 4$ дптр (от расстояния наилучшего зрения 250 мм до ∞) $0 \leq d \leq 1,6$ мм с линейным приращением 0,4 мм на каждую диоптрию аккомодации.

Точечные элементы A и C изображений объектов расположены на сферическом изображении с угловыми координатами $\theta_A(\varphi_A)$ и $\theta_C(\varphi_C)$ точечных элементов A'' и C'' пространственных объектов, находящихся вне фовеального поля зрения глаза. Точки A и C отстоят от фокальной поверхности на таком же расстоянии d , что и точка B . Вогнутое зеркало перенесет точки A и C , с одной стороны, на виртуальный экран в точки A''' и C''' , а с другой – на периферийную часть ретины глаза, отличающуюся пониженным разрешением, в точки A' и C' . Поскольку через входной зрачок глаза проходит в основном периферийная часть отраженных световых пучков, излучаемых точечными элементами A и C , возрастают абберационные искажения точечных элементов A' и C' . Таким образом, разрешение элементов «бокового» изображения оказывается в известной степени согласованным с разрешением периферийной части ретины.

В предложенном способе процесс отображения происходит в системе концентрических сфер (сферическое изображение, фокальная и отражающая поверхности зеркала, виртуальный экран). Схема обладает центральной симметрией в отличие от осевой симметрии схемы с плоскими изображениями. Центром симметрии является центр вращения глаза. Поэтому при любом повороте глаза и последующей фиксации зрительной оси в положении, отличном от исходного, процесс отображения точечных элементов изображений объектов, расположенных на сферическом изображении, не будет отличаться от рассмотренного выше. Например, зрительная ось приобретает угловые координаты $\theta_{A'}(\varphi_{A'})$. В этом случае точка A отобразится на центральной ямке желтого пятна ретины в точку A' с максимальным разрешением, а точки B и C попадут на периферию ретины в точки B' и C' с меньшим разрешением.

Другая особенность схемы состоит в том, что даже при малой угловой апертуре световых пучков подвижный глаз не теряет изображения, поскольку выходной зрачок дисплея оказывается совмещенным с неподвижной точкой глаза – центром его вращения, отстоящим от зеркала на двойное фокусное расстояние.

Проведены исследования геометрических aberrаций в оптической системе с вогнутым сферическим зеркалом и теоретической моделью глаза по Гульстранду – Легранду с асферической роговицы по Лотмару [11] и с угловым разрешением периферической части ретины (до 60°) по Вертгейму [12]. Показано, что при диаметре входного зрачка глаза не более 2 мм и радиусе зеркала ≥ 50 мм продольная aberrация виртуального изображения (астигматизм) находится в пределах глубины резко воспринимаемого глазом про-

странства, а совместные поперечные аберрации системы зеркало – глаз не превышают разрешающей способности ретины не только в ее центральной, но и в периферической части.

Таким образом, в соответствии с предложенным способом увеличение и перенос сферических изображений на виртуальный сферический экран заданного радиуса можно осуществить с помощью простого вогнутого сферического зеркала без какой-либо коррекции аберраций. При этом обеспечиваются высокая разрешающая способность изображений, определяемая остротой зрения глаза, большие угловые размеры полей наблюдения, малый вес и стоимость окуляров.

Автор выражает благодарность В. П. Коронкевичу за содействие в работе, консультации и обсуждение результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалев А. М. О центральных проекциях трехмерного пространства // *Автометрия*. 1996. № 6. С. 4.
2. Ковалев А. М. Виртуальное пространство в сферической перспективе // *Опт. журн.* 1999. 66, № 6.
3. Томилин М. Г. Театр кино // *Оптический вестник: Бюл. опт. об-ва*. 1996. № 3–4 (63–64).
4. Larsen M., Gruendell F. A visual systems display for full-mission flight simulator training // *Proc. IMAGE VII Conf. Tucson, Arizona, 1994*.
5. Head-Mounted Systems // vrhtml/hmdsys.htm at dd-s.com.
6. Head-Mounted Displays (HMD) // ETO/Displays/HMD at esc.sysplan.com.
7. *VR News*. 1995. 4, Is. 4.
8. Ландсберг Г. С. *Оптика*. М.: Наука, 1976.
9. Pat. 5539578 USA. Image display apparatus /Togino et al. Publ. 23.07.96.
10. Пат. 2143718 РФ. Способ и устройство отображения пространственных объектов /А. М. Ковалев. Опубл. 27.12.99, Бюл. № 36.
11. Lotmar W. Theoretical eye model with aspherics // *JOSA*. 1971. 61, N 11.
12. Хартридж Г. *Современные успехи физиологии зрения*. М.: ИЛ, 1952.

*Институт автоматки и электрометрии СО РАН,
E-mail: kovalev@iae.nsk.su*

*Поступила в редакцию
11 апреля 2000 г.*