

А. М. Ковалев

(Новосибирск)

ОТОБРАЖЕНИЕ ПРЕДМЕТОВ НА ВИРТУАЛЬНЫХ ГОРОПТЕРАХ*

Рассмотрены вопросы применения сферических изображений в бинокулярных дисплеях. Исследована абсолютная диспаратность бинокулярных изображений. Предложен метод эгоцентрической перспективы.

Введение. В работах [1, 2] рассмотрен метод центральной проекции пространства предметов на сферу, или сферическая перспектива, которая устраняет ряд недостатков классической системы линейной перспективы. В [3, 4] предложен способ отображения предметов на виртуальном сферическом экране, а в [2, 3] показаны пути практической реализации этого способа в дисплеях персонального пользования, в частности лазерных ретинальных дисплеях. Формирование изображений предметов на виртуальном сферическом экране осуществляется путем переноса действительных микроизображений на сетчатку глаза сферическим вогнутым зеркалом, центр которого совмещен с центром вращения глаза и центрами виртуального и действительного изображений. В [5] проведены исследования геометрических aberrаций в оптической схеме с вогнутым зеркалом и теоретической моделью глаза. Показано, что без какой-либо коррекции aberrаций обеспечиваются высокая разрешающая способность изображений и большие угловые размеры полей наблюдения. Разработан и рассчитан с помощью программы DEMOS® [6] ряд широкоугольных (с полем зрения до 82°) зеркальных окуляров разного назначения, обладающих широкополосными частотно-контрастными характеристиками, малым весом и стоимостью. Естественным образом возник вопрос: как использовать сферические изображения в бинокулярных и стереоскопических дисплеях?

Глазодвигательная система и фиксация точки. На рис. 1 показана эпиполярная система координат Гельмгольца для задания положения глаз: ось X , проходящая через неподвижные точки обоих глаз – центры вращений C_L, C_R , и углы поворота вокруг этой оси – θ_L, θ_R ; оси торсионных вращений, совпадающие со зрительными осями глаз, которые проходят через узловые точки (центры проекции) N_L, N_R , центры вращений C_L, C_R , фовеальные ямки сетчатки F_L, F_R и углы поворота ψ_L, ψ_R ; оси, перпендикулярные пер-

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 00-15-99092, № 01-01-00824).

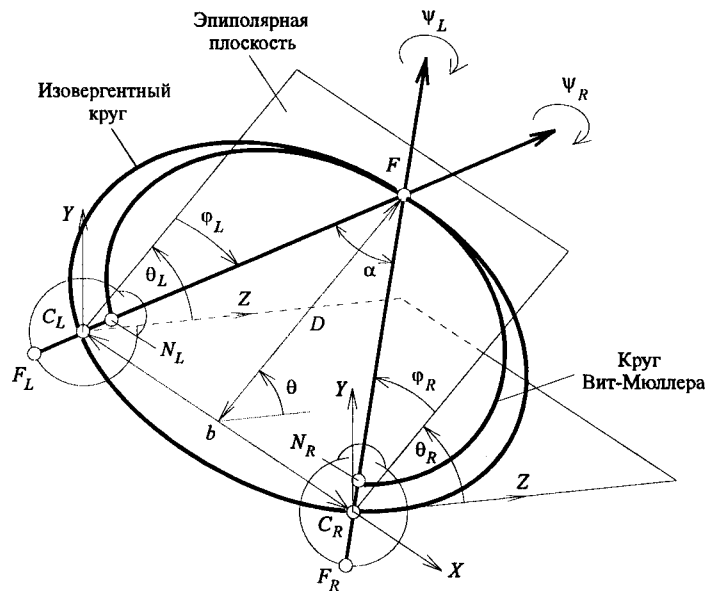


Рис. 1

вым двум и идущие вверх, и углы поворота ϕ_L , ϕ_R вокруг них. Бинокулярная зрительная система имеет шесть степеней свободы и три типа вергентных движений, или противоположенных вращений [7].

В нормальных условиях при рассматривании поля зрения всегда наблюдается фиксационный рефлекс: зрительные оси глаз пересекаются в некоторой точке пространства, называемой точкой фиксации F . Это условие выполняется с помощью двух вергентных вращений: суправергенции, выравнивающей зрительные оси по вертикали, или долготы $\theta_L = \theta_R = \theta$, и конвергенции по горизонтали, или широты на угол $\alpha = \phi_R - \phi_L$. Как известно, локусом точек пространства с постоянным углом конвергенции α является окружность. Если окружность проходит через узловые точки глаз, то это – круг Вит-Мюллера, если через центры вращения глаз, то это – изовергентный круг. Круг Вит-Мюллера обеспечивает нулевую диспаратность соответственных точек сетчаток глаз и становится теоретическим гороптером в том случае, если горизонтальные меридианы глаз лежат в эпиполярной плоскости, содержащей зрительные оси. Выравнивание горизонтальных меридианов глаз осуществляется торсионными поворотами ψ_L , ψ_R , или цикловергенцией под управлением нейронной программы, решающей уравнение фузии, или отсутствия двоения изображения (диплопии) [8]. Показано, что каждый из углов ψ связан с двумя другими углами θ , ϕ в первом приближении законом Листинга. Таким образом, из шести степеней свободы остаются три, которые и определяют положение точки в пространстве – это угловые координаты θ , ϕ_L , ϕ_R .

Два замечания. Во-первых, считается, что $\theta = 0$ – это плоскость, проходящая через носозатылочную ось головы и прямую $C_L C_R$. Цикловергенция для этой плоскости равна нулю. Во-вторых, угол конвергенции α связан с расстоянием до точки фиксации. Для симметричной конвергенции $\alpha = 2 \arctg(b/2D)$, где b – глазная база, D – расстояние до точки. При малых уг-

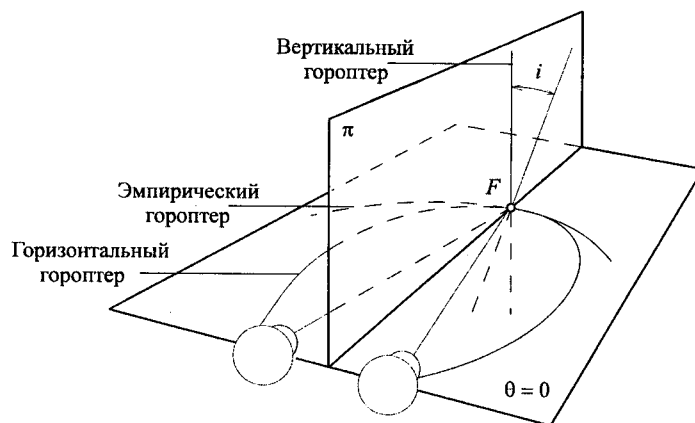


Рис. 2

лах конвергенции $\alpha = bA$, где $A = 1/D$ – аккомодация глаз. Таким образом, конвергенция и аккомодация связаны линейно.

Сферические изображения и изовергентная поверхность. Пусть каждый глаз наблюдает сферическое изображение, заданное в сферической системе координат Гельмгольца, причем центр изображения совмещен с центром вращения глаза. Изображения для левого и правого глаза конгруэнтны и сфокусированы на бесконечность. При этом все лучи, исходящие из соответственных точек изображений и проходящие через узловые точки глаз, включая зрительные оси, оказываются параллельными и соответственными. При одинаковой геометрии и оптике глаз изображения на сетчатках будут также конгруэнтны и будут иметь нулевую горизонтальную диспаратность по всему полю зрения.

Сфокусируем изображения на расстояние $A = \alpha/b$ и повернем каждое изображение целиком вокруг соответствующей оси Y , перпендикулярной плоскости $\theta = 0$ (см. рис. 1), на угол $\alpha/2$, причем левое изображение повернем по часовой стрелке, а правое – против. Конгруэнтность сферических изображений при этом сохранится, но плоскости меридианов и широт будут пересекаться за исключением плоскостей $\theta = 0$, которые останутся компланарными. В этом случае нулевая диспаратность будет соответствовать только двум линиям – кругу Вит-Мюллера, лежащему в плоскости $\theta = 0$, и линии, лежащей в медиальной плоскости π головы и перпендикулярной к плоскости $\theta = 0$. Первая соответствует горизонтальному гороптеру, вторая – вертикальному (рис. 2). Оказывается, что не существует более точек или линий, где бы пересекались другие соответственные лучи от изображений. Поэтому, если направить взгляд в любую другую точку пространства, не лежащую на гороптерах, то возникнет двоение изображений. Таким образом, пара конгруэнтных сферических изображений не обеспечивает получение слитных бинокулярных изображений на расстояниях, отличных от бесконечности.

Рассмотрим подробнее процесс формирования бинокулярных изображений в плоскости $\theta = 0$ (рис. 3). Исходно соответственные точки A_L, A_R и B_L, B_R конгруэнтных сферических изображений находились на широтах $\phi A_L = \phi A_R = 0$ и $\phi B_L = \phi B_R = \tau$ (на рисунке не показано). После поворота

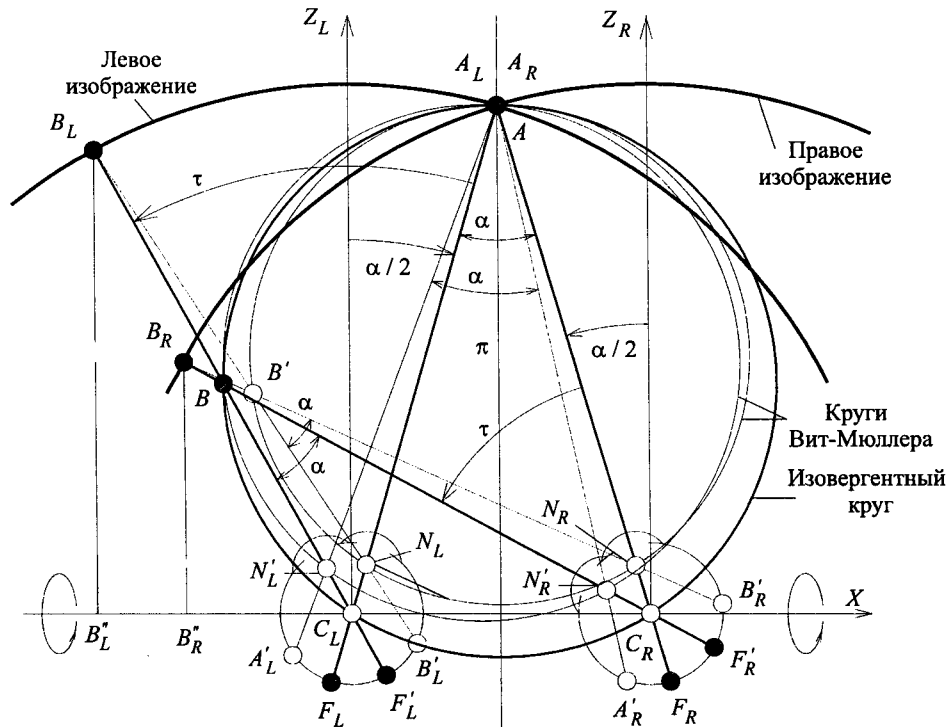


Рис. 3

изображений вокруг вертикальных осей на $\pm\alpha/2$ координаты соответственных точек изменились:

$$\varphi A_L = -\alpha/2, \quad \varphi B_L = \tau - \alpha/2;$$

$$\varphi A_R = \alpha/2, \quad \varphi B_R = \tau + \alpha/2.$$

Точки совершили симметричный конвергентный сдвиг по широте на угол $\alpha/2$. Лучи из центров вращения глаз на соответственные точки пересеклись на извергентном круге в точках A и B .

Если бинокулярный взгляд фиксирует точку A в медиальной плоскости π , то образуется круг Вит-Мюллера, проходящий через точку A и узловые точки N_L, N_R . Нетрудно показать, что лучи, проецирующие точки B_L и B_R через узловые точки на сетчатки глаз в точки B'_L и B'_R , пересекаются на том же круге Вит-Мюллера в точке B' . Если бинокулярный взгляд фиксирует точку B на извергентном круге, то возникает круг Вит-Мюллера, проходящий через точку B , узловые точки глаз N'_L, N'_R , совершивших поворот на угол τ , и точку A в медиальной плоскости головы. Таким образом, с каждой точкой извергентного круга связан горюптер, создающий бинокулярное изображение с нулевой диспаратностью.

Построим извергентную поверхность α путем поворота извергентного круга вокруг оси X , проходящей через центры вращения глаз C_L, C_R . Из рис. 3 понятно, что соответственные точки исходных конгруэнтных сферических изображений с широтой τ и долготой $\theta \neq 0$ должны быть также кон-

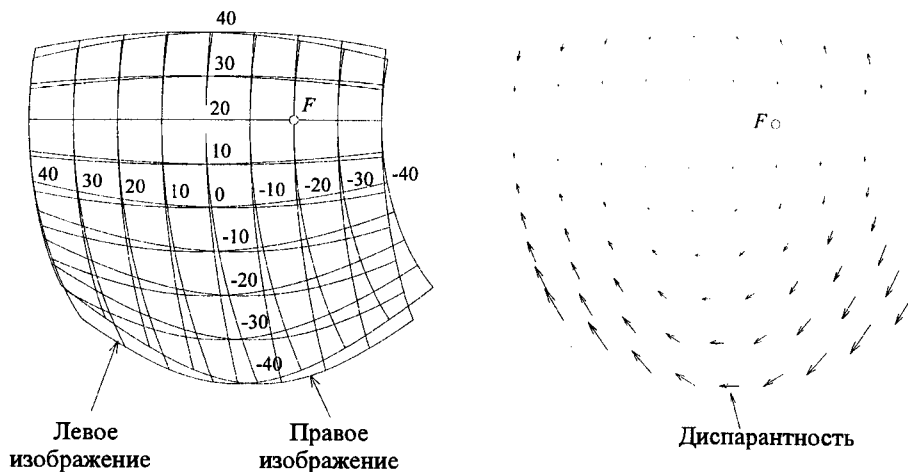


Рис. 4

вергентно сдвинуты на угол $\alpha/2$ по широте, как и точки A и B в рассмотренном примере.

Пусть сферическое изображение предметов задано матрицей $I_{i,j} = I(\tau_i, \theta_j)$. Тогда пара сферических изображений $L_{i,j} = I(\tau_i - \alpha/2, \theta_j)$ и $R_{i,j} = I(\tau_i + \alpha/2, \theta_j)$ для левого и правого глаза соответственно формирует бинокулярное изображение предметов на изовергентной поверхности и множестве виртуальных горюптеров, связанных с этой поверхностью.

Диспарантность изображений. Для исследования абсолютной диспарантности бинокулярных изображений построена математическая модель, в которой используется пара сферических изображений с симметричным конвергентным сдвигом по широте. Модель учитывает «вынос» центра проекции из центра вращения глаза в узловую точку, а также горизонтальный сдвиг соответственных точек сетчаток глаз по направлению к вискам. Дисторсия бинокулярной системы соответствия точек, известная как *деклинация* вертикальных меридианов глаз [7], приводит к отклонению эмпирического вертикального горюптера от истинной вертикали на угол i , как показано на рис. 2. На модели проведены расчеты абсолютной горизонтальной ($\Delta\alpha$) и вертикальной ($\Delta\beta$) диспарантности изображений на сетчатках глаз для сферических изображений предметов в полях зрения до $80 \times 80^\circ$ при различных углах конвергенции α . На рис. 4 показаны изображения на сетчатках левого и правого глаза пары сферических изображений при угле конвергенции $\alpha = 10^\circ$ ($D \approx 37$ см), точке фиксации $\tau = -20^\circ$, $\theta = 20^\circ$, а также разностное изображение, представляющее диспарантность. Заметим, что вдоль горизонтальных меридианов глаз, содержащих точку фиксации, диспарантность равна нулю.

Более информативными оказываются матрицы горизонтальной и вертикальной диспарантности (в угловых минутах), показанные на рис. 5, *a* для $D = 25$ см ($\alpha = 14,8^\circ$) и рис. 5, *b* для $D = 50$ см ($\alpha = 7,4^\circ$). Строки матриц соответствуют меридианам сферических изображений с долготой θ_j , а столбцы – параллелям с широтой τ_i . Приращение долготы и широты по строкам и столбцам равно 10° . Поле зрения $80 \times 80^\circ$. Точка фиксации отмечена прямоугольником. Области с превышением пороговых значений фузии ограничены прямыми линиями.

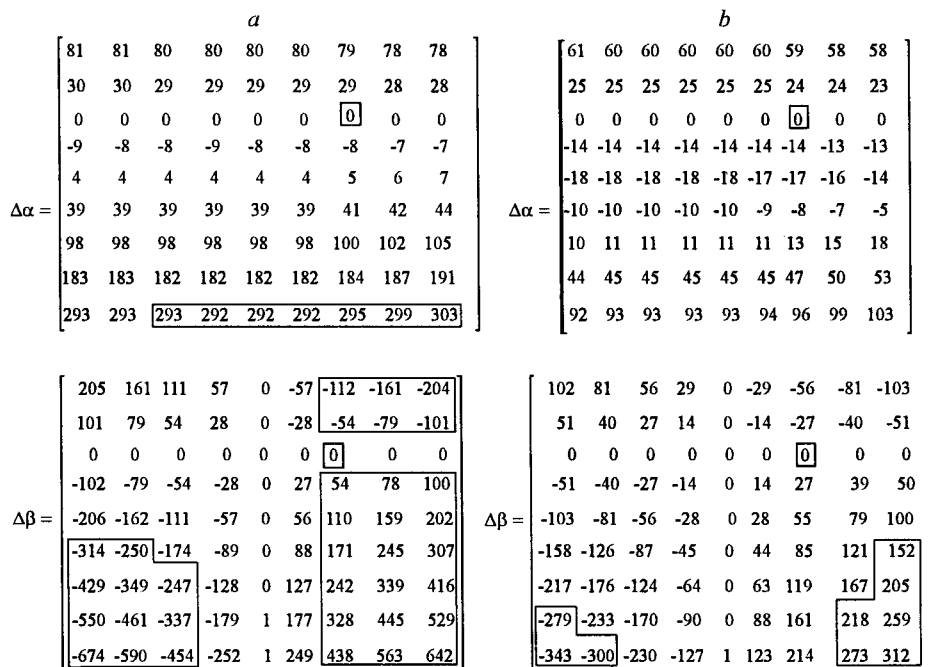


Рис. 5

Анализ матриц диспаратности показывает, что:

– строки матриц, содержащие точку фиксации, имеют нулевые элементы как для горизонтальной диспаратности $\Delta\alpha$, так и для вертикальной $\Delta\beta$, что говорит о наличии гороптера на данном меридиане;

– матрицы $\Delta\beta$, кроме того, имеют столбцы с нулевыми или близкими к нулю элементами, соответствующие широтам сферических изображений, которые лежат в медиальной плоскости головы, а остальные элементы матриц $\Delta\beta$ свидетельствуют об эксцентриситете точек изображения относительно позиции с симметричной конвергенцией глаз;

– элементы строк матриц $\Delta\alpha$, не содержащие точку фиксации, соответствуют расстояниям от изовергентной поверхности до вертикального эмпирического гороптера с учетом его наклона на угол i к истинной вертикали;

– абсолютная величина диспаратности уменьшается с уменьшением угла конвергенции или увеличением размеров изовергентной поверхности;

– на малых расстояниях (см. рис. 5, *a*) поле слитного изображения (стеопсиса) сокращается в размерах примерно до 20° из-за превышения пороговых значений фузии в основном вертикальной диспаратностью.

Направление взгляда и эгоцентрическая перспектива. Известно, что направлением бинокулярного взгляда считается линия, соединяющая точку фиксации и эгоцентр, расположенный в медиальной плоскости головы. При использовании сферических изображений эгоцентром является центр вращения виртуального циклопического глаза. Он расположен на пересечении изовергентного круга и медиальной плоскости π . Узловая точка циклопического глаза расположена на гороптере, связанном с изовергентным кругом, а направление бинокулярного взгляда совпадает со зрительной осью этого глаза (рис. 6). При фиксации точек, удаленных на разные расстояния, положе-

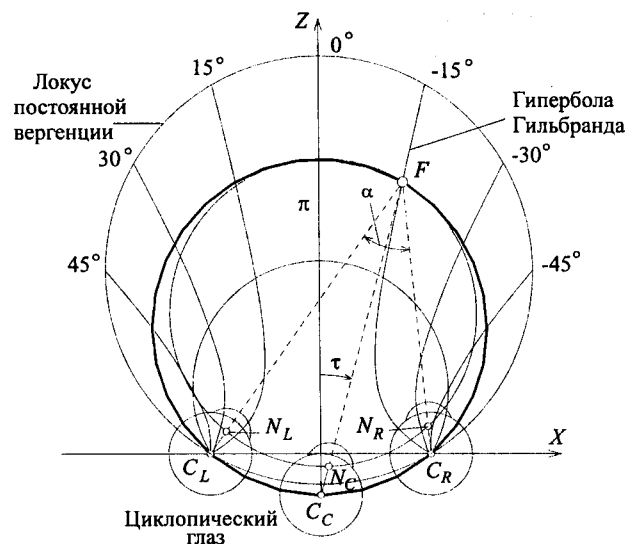


Рис. 6

ние эгоцентра меняется и поэтому локусами изонаправлений взгляда являются известные гиперболы Гильбранда [7].

Ранее было установлено, что любая фиксируемая бинокулярным взглядом точка пространства может быть задана тремя угловыми координатами $\varphi_L, \varphi_R, \theta$. Нетрудно перейти к другой системе криволинейных координат со следующими координатными поверхностями: изовергентная поверхность $\alpha = \varphi_R - \varphi_L$, связанная с глубиной пространства и расстояниями до предметов; поверхность изонаправлений взгляда $\tau = (\varphi_L + \varphi_R)/2$ и полуплоскость визирования θ . Центральную проекцию точек объектного пространства на поверхность $\alpha = \text{const}$ вдоль зрительных осей циклопического глаза с направлениями τ назовем *эгоцентрической проекцией*, а метод изображения предметов пространства – *эгоцентрической перспективой*.

Заключение. Особенности бинокулярной системы зрения человека таковы, что пара одинаковых, конгруэнтных сферических изображений не обеспечивает получение слитных бинокулярных изображений на расстояниях, отличных от бесконечности.

Симметричный конвергентный сдвиг сферических изображений по широте в эпиполярной системе координат Гельмгольца на половину угла конвергенции зрительных осей глаз позволяет отображать предметы на изовергентной поверхности и связанном с нею множестве виртуальных гороптеров. При фиксации взгляда на любой точке изовергентной поверхности получается бинокулярное изображение без диплопии, причем в плоскости визирования – с нулевой горизонтальной и вертикальной диспаратностью.

Диспаратность изображений зависит как от угла конвергенции зрительных осей, так и от наклона вертикальных меридианов соответственных точек глаз к плоскости визирования и не превышает пороговых значений фузии в полях зрения с эксцентриситетом до 20° на расстояниях от 25 см и далее.

Направление бинокулярного взгляда совпадает с положением зрительной оси виртуального циклопического глаза, центр вращения которого (эгоцентр) располагается на пересечении изовергентного круга и медиальной

плоскости головы. Центральная проекция объектного пространства на изовергентную поверхность вдоль пучка зрительных осей циклопического глаза представляет собой бинокулярную эгоцентрическую перспективу, исследованию уникальных свойств которой будет посвящена отдельная работа.

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 // Оптический журн. 1999. 66, № 6.
3. Пат. 2143718 РФ. Способ и устройство отображения пространственных объектов /А. М. Ковалев. Опубл. 27.12.99, Бюл. № 36.
4. Ковалев А. М. О способе отображения объектов в сферической перспективе // Автометрия. 2000. № 4. С. 76.
5. Ковалев А. М. Аберрации в ретинальных дисплеях с виртуальным сферическим экраном // Автометрия. 2001. № 1. С. 3.
6. Gan M. A., Zhdanov D. D., Novoselsky V. V. et al. DEMOS: State-of-the-Art application software for design, evaluation and modeling of optical system // Opt. Eng. 1992. 31, N 4.
7. Howard I. P., Rogers B. J. Binocular Vision & Stereopsis. Oxford University Press. 1995.
8. Петров А. П. Направление взора и стереосинтез // Интеллектуальные процессы и их моделирование. Организация движения. М.: Наука. 1991.

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

*Поступила в редакцию
26 февраля 2002 г.*