

УДК 514.18

Ю.Н. КОВАЛЕВ, д-р техн. наук, **А.Ю. НИЦЫН**, канд. техн. наук**ГЕОМЕТРИЯ ПСИХОФИЗИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА И
КОМПЬЮТЕРНЫЙ СИМУЛЯТОР «ВИРТУАЛЬНАЯ СФЕРА»**

Запропоновано проект комп'ютерного тренажера «виртуальна сфера», де візуальна інформація формується у вигляді тривимірного зображення на основі геометрії психофізичного простору.

The project of computer simulator "virtual sphere", where the visual information is deduced as the three-dimensional image, which is based on the geometry of psychophysical space geometry, is offered.

Постановка проблеми. Одним из направлений развития компьютерных игр и симуляторов является применение трехмерных изображений для создания визуальной среды, в которой действуют оператор, управляющий сложной технической системой. В настоящее время трехмерные изображения формируются за счет стереоскопического эффекта, который стимулируется двумя картинками, выводимыми на левый и правый мониторы шлема-маски. Однако данному способу построения трехмерных изображений присущи следующие недостатки: во-первых, пользование шлемом-маской создает неудобства в работе оператора из-за ограничений свободы движений во время управления транспортным средством; во-вторых, наблюдение стереоскопического эффекта требует от оператора определенных знаний и опыта, что также затрудняет погружение в виртуальную реальность. Таким образом, разработка методов получения трехмерных изображений, которые можно наблюдать без применения таких специальных технических приборов, как шлем-маски или стереоскопических очков, является актуальной задачей.

Анализ последних исследований. Например, сейчас в NASA и Массачусетском технологическом институте разрабатывается проект компьютерного симулятора под названием «виртуальная сфера». Симулятор представляет собой сферический купол, внутри которого создается визуальная среда, образованная трехмерными изображениями геометрических объектов, которые можно рассматривать с разных точек зрения и даже потрогать руками. Более того, оператор может не только наблюдать изображения трехмерной сцены, но и перемещаться внутри сферического купола, причем визуальная среда реагирует на каждое движение оператора и принимает образ геометрических объектов, которые оператор видит в данном направлении взгляда.

Постановка задачи исследования. Применим голографию для создания трехмерной визуальной среды, заключенной внутри «виртуальной сферы». Выбор голографии объясняется тем, что, поскольку изображения объектов, помещенные внутри «виртуальной сферы», изменяются в режиме реального времени, наиболее эффективным способом построения динамичной

визуальной среды является метод реконструкции волнового фронта. Рассмотрим рис.1, на котором показана принципиальная схема регистрации оптической голографии. Поток когерентного света, создаваемый с помощью лазера, преобразуется после прохождения линзы в световой луч, волновой фронт которого представляет собой серию плоскостей, перпендикулярных направлению луча. Вслед за тем плоский световой фронт разделяется на два потока: один поток направляется непосредственно на объект, а другой поток с помощью зеркала направляется на фотографическую пластину. Свет, отраженный от регистрируемого объекта, также попадает на фотографическую пластину и при его взаимодействии с опорным лучом, отраженным от зеркала, образует интерференционную картину. Эта интерференционная картина регистрируется фотоэмульсионным слоем пластины, и после проявления и фиксации фотографического изображения пластина превращается в оптическую голограмму [1, 2, 3].

Эта схема раскрывает принципы построения «виртуальной сферы». Однако реализация проекта требует применения голограммы, синтезируемой с помощью электронно-вычислительной машины. Выбор цифровой голографии обуславливается тем, что поскольку движения оператора невозможно предусмотреть, изображения трехмерной сцены изменяются произвольным образом. Отсюда следует, что нельзя приготовить необходимые голограммы обычным способом, состоящим в фотографировании интерференционной картины, и поэтому наиболее эффективным методом фиксации волнового фронта является цифровая голография, позволяющая создавать голограммы в режиме реального времени с помощью электронно-вычислительной машины. Одной из проблем создания «виртуальной сферы» является преобразование евклидова пространства в пространство конечного объема, заключенное внутри сфероидальной оболочки. Сейчас эта проблема решается посредством создания неглубоких аксонометрических изображений. Однако эта модель не дает удовлетворительного решения, потому что представляет собой отсек евклидова пространства, который невозможно разместить внутри сфероидальной оболочки.

Положим в основу «виртуальной сферы» геометрическую модель психофизического пространства, под которым понимается трехмерный образ объективного пространства, отражающий зрительные ощущения человека и существующий в его сознании. Действительно, наблюдатель видит, будто он находится в центре сфероидального купола, который опирается на чашеобразную земную поверхность. Это значит, что психофизическое пространство имеет конечный объем и является пространством положительной кривизны. Отсюда следует, что психофизическое пространство – это риманово пространство с заданным полем метрического тензора, компоненты которого образуют положительно определенную квадратичную форму [4, 5].

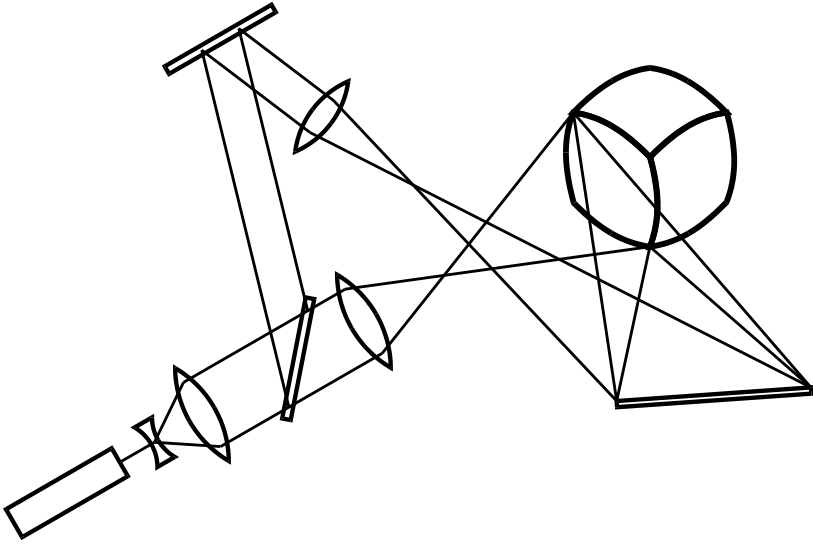


Рис.1

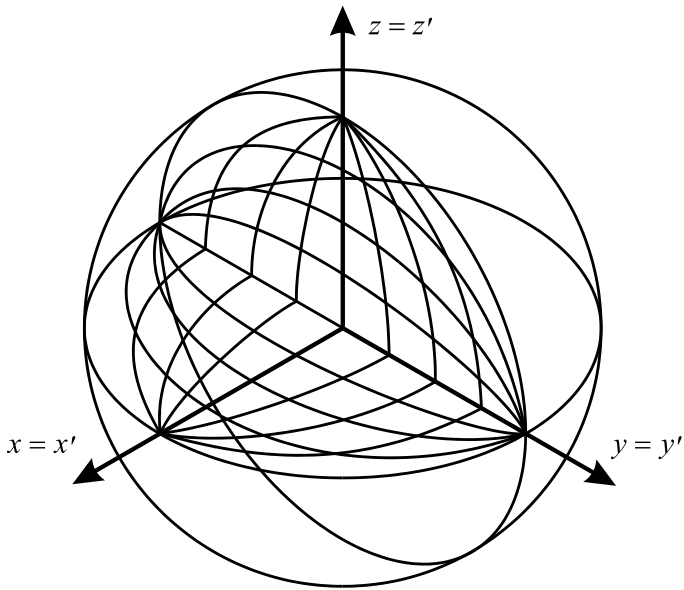


Рис.2

В прикладной геометрии существует несколько способов построения трехмерных изображений, например, рельефная и театральная перспективы. Однако эти виды изображений представляют собой трехмерный объем, который заключен в узкой бесконечной полосе, образованной двумя параллельными плоскостями, а именно: плоскостью картины и плоскостью, проходящей через точку схода прямых, перпендикулярных в объективном пространстве картинной плоскости. Отсюда следует, что рельефная и театральная перспективы не образуют римановых пространств положительной кривизны и поэтому не могут рассматриваться в качестве геометрической модели, с помощью которой вычисляется трехмерная визуальная среда «виртуальной сферы».

Таким образом, трехмерное изображение, помещенное внутри «виртуальной сферы», должно быть геометрической моделью психофизического пространства, обладающей свойствами риманова пространства положительной кривизны.

Основной раздел. Рассмотрим задачи, которые необходимо решить при проектировании «виртуальной сферы». Как было сказано выше, сущность «виртуальной сферы» составляет визуальная среда, которая воспроизводит психофизические условия зрительного восприятия. Применение цифровой голографии для создания визуальной среды предусматривает решение следующих задач:

разработка геометрической модели психофизического пространства, которая соответствует геометрическим свойствам римановых пространств положительной кривизны;

вычисление интерференционной картины методом преобразования Фурье поля световых волн, отраженных от объектов, погруженных в геометрическую модель психофизического пространства;

формирование фазовой голограммы посредством подачи видеосигнала на матрицу прозрачных электродов, закрепленных на пластинах, выполненных из электрострикционного материала;

воспроизведение трехмерного изображения геометрической модели психофизического пространства посредством освещения голограммы, на которой запечатлена интерференционная картина, синтезированная с помощью электронно-вычислительной машины.

Рассмотрим проблему геометрического моделирования психофизического пространства. Выполним преобразование евклидова пространства E^3 в себя. При этом связь между координатами x, y, z точки M пространства E^3 и координатами x', y', z' точки пространства V^3 описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{x'}{R} &= \cos \frac{y'}{R} \cos \frac{z'}{R} \operatorname{arctg} \frac{x}{R} \\ \frac{y'}{R} &= \cos \frac{x'}{R} \cos \frac{z'}{R} \operatorname{arctg} \frac{y}{R} \\ \frac{z'}{R} &= \cos \frac{x'}{R} \cos \frac{y'}{R} \operatorname{arctg} \frac{z}{R} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где R – радиус кривизны пространства V^3 .

Представим графическую интерпретацию данного преобразования. Рис.2 показывает, что пространство V^3 заключено внутри замкнутой поверхности Φ , натянутой на концы векторов, коллинеарных базисным векторам евклидова пространства E^3 . Длины векторов равны $\frac{x'}{R} = \pm \frac{\pi}{2}$, $\frac{y'}{R} = \pm \frac{\pi}{2}$, $\frac{z'}{R} = \pm \frac{\pi}{2}$. При этом точки поверхности Φ не принадлежат пространству V^3 .

Таким образом, пространство V^3 является римановым пространством, кривизна которого монотонно уменьшается по мере приближения к началу криволинейной системы координат. Отсюда следует, что пространство V^3 , описываемое системой уравнений (1), можно рассматривать как геометрическую модель психофизического пространства, которая, как было показано выше, является основой для разработки визуальной среды «виртуальной сферы».

Рассмотрим синтез голограммы с помощью электронно-вычислительной машины. Раскроем сущность цифровой голографии на примере построения голограммы плоского изображения. Заменяем трехмерный геометрический объект на его изображение на плоскости. Например, плоское изображение объекта можно получить по законам геометрической оптики посредством фокусировки света, отраженного от объекта, на плоскости с помощью собирающей линзы. Таким образом, распределение амплитуды и фазы в точках поверхности объекта заменяется на распределение амплитуды и фазы в точках плоскости, перпендикулярной оптической оси линзы [6, 7].

Функция, описывающая распределение амплитуды и фазы в плоскости синтезируемой голограммы, представляет собой результат преобразования Фурье, который имеет следующий вид

$$g(x_1, y_1) = \frac{1}{\lambda f} \iint_{\infty} h(x, y) \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda f} (xx_1 + yy_1)\right) dx dy, \quad (2)$$

где $h(x, y)$ – комплексная функция, описывающая распределение амплитуды и фазы светового поля, отраженного от объекта, в плоскости, касательной объекту и параллельной плоскости синтезируемой голограммы; λ – длина

волны когерентного источника света; f – фокусное расстояние линзы, выполняющей преобразование Фурье.

Преобразование (2) переводит точку, лежащую в плоскости изображения объекта, с координатами x, y в точку плоскости голограммы с координатами x_1, y_1 . Покажем на рис.3 схему построения синтетической голограммы объекта с помощью двумерного преобразования Фурье. Введем обозначения: S – источник когерентного света; S_0 – источник света, формирующий опорную волну; Π – плоскость, на которой фокусируется световое поле, отраженной от объекта; Γ – плоскость, на которой формируется голограмма; L – линза, осуществляющая двумерное преобразование Фурье.

Введем в плоскости Π изображение, полученное фокусировкой световых волн, отраженных от объекта, и обозначим функцию $E(x, y)$, описывающую распределение интенсивности отраженного света. Совместим плоскость изображения Π и плоскость голограммы Γ с фокальными плоскостями линзы L и завершим построение схемы синтеза голограммы с помощью электронно-вычислительной машины.

Найдем выражение для функции $h(x, y)$, описывающей комплексное световое поле, которое образовывается в результате прохождения волн, излучаемых источником света S , сквозь расположенное в плоскости Π изображение объекта. Эта функция соответствует функции, над которой линза L выполняет двумерное преобразование Фурье. Как следует из рис.4, функция $h(x, y)$ задана двумя составляющими: полем, исходящим от источника опорного света, и полем, образованным световыми волнами, прошедшими сквозь транспарант с изображением объекта

$$h(x, y) = A_0 \delta(x, y) + E(x - x_0, y - y_0),$$

где A_0 – амплитуда волны, излучаемой точечным источником света S_0 ; $\delta(x, y)$ – двумерная функция Дирака; x_0, y_0 – координаты, которые определяют смещение центра изображения объекта относительно начала декартовой системы координат, введенной в плоскости Π .

Рассмотрим воспроизведение результатов расчета синтетической голограммы. Представим голограмму в виде изображения, нанесенного на прозрачную пленку и пропустим сквозь транспарант пучок света. Преобразуем элементы изображения в электрические сигналы, величина которых определяется интенсивностью или амплитудой волны света, распространяющегося от данного графического элемента голограммы. Направим видеосигнал на матрицу прозрачных электродов, закрепленную на смежных поверхностях пластины из электрострикционного материала, и получим оптический элемент для регистрации фазовой голограммы. Принципиальная схема оптического элемента показана на рис.4.

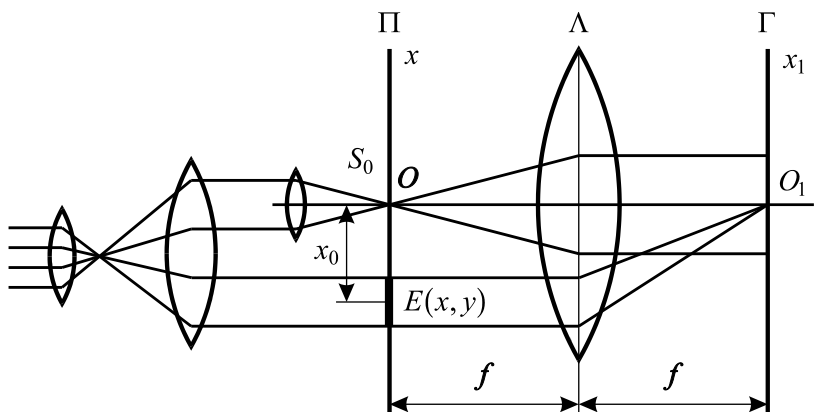


Рис.3

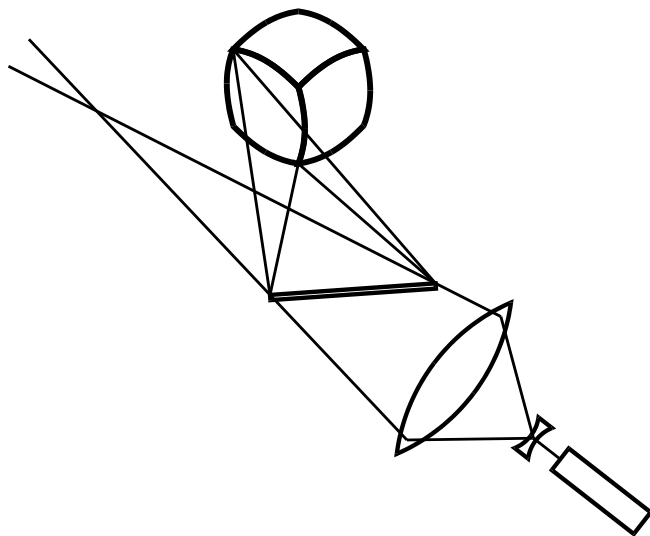


Рис.4

При регистрации фазовой голограммы видеосигнал, который несет информацию о координатах графического элемента интерференционной картины, поступает на горизонтальный и вертикальный элементы матрицы электродов. Разряд электричества изменяет толщину пластины электрострикционного материала в точке пересечения горизонтального и вертикального электродов, и в соответствии с толщиной материала в точке пересечения изменяется фаза отраженной световой волны.

Следовательно, при восстановлении изображения фаза опорного волнового фронта изменяется при переходе от одной точки к другой точке поверхности голограммы. Результатом прохождения опорного волнового фронта сквозь голограмму является формирование поля световых волн, которое в точности воспроизводит поле световых волн, отраженных от геометрического объекта. Рассмотрим воспроизведение трехмерного изображения методом реконструкции волнового фронта. Формирование изображений без aberrаций, изменений размеров или искажений возможно при условии, что при записи и восстановлении голограммы применяется свет, который имеет одну и ту же длину волны. Кроме того, необходимо, чтобы направление распространения и форма волнового фронта, подающего на голограмму при восстановлении изображения, в точности соответствовали опорному волновому фронту, который использовался при записи голограммы, или комплексно-сопряженному потоку света. При этом комплексно-сопряженным называется волновой фронт, который имеет одинаковую форму с исходным световым пучком, но распространяется в противоположном направлении [8, 9].

Принципиальная схема восстановления действительного изображения приведена на рис.5. Как показано на рис.5, луч света, испускаемый лазером, преобразуется в поток плоских световых волн, который направляется на фазовую голограмму и после ее прохождения формирует в пространстве трехмерное изображение, соответствующее исходному объекту. Реализация этой схемы осложняется наличием проблемы, которая заключается в том, что наблюдение действительного изображения осуществляется значительно труднее, чем мнимого или сопряженного изображения. Одним из решений этой проблемы является окрашивание внутренней поверхности «виртуальной сферы» в совершенно черный цвет, который поглощает световые волны, падающие на внутреннюю поверхность, и выделяет сформированное из сходящихся световых фронтов изображение. Кроме того, можно использовать при регистрации и реконструкции изображения пучок света, частота волны которого принадлежит той части диапазона электромагнитных волн, где находятся самые короткие волны, воспринимаемые глазом человека. Это будет способствовать лучшему рассеянию сходящихся световых фронтов, формирующих изображение, на твердых частицах, взвешенных в воздухе, заполняющем «виртуальную сферу».

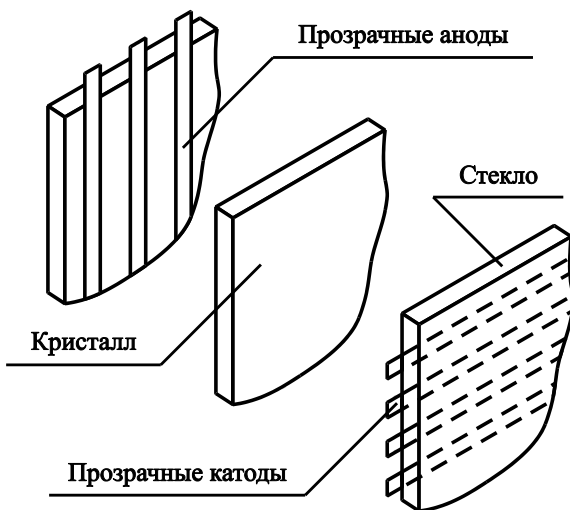


Рис.5

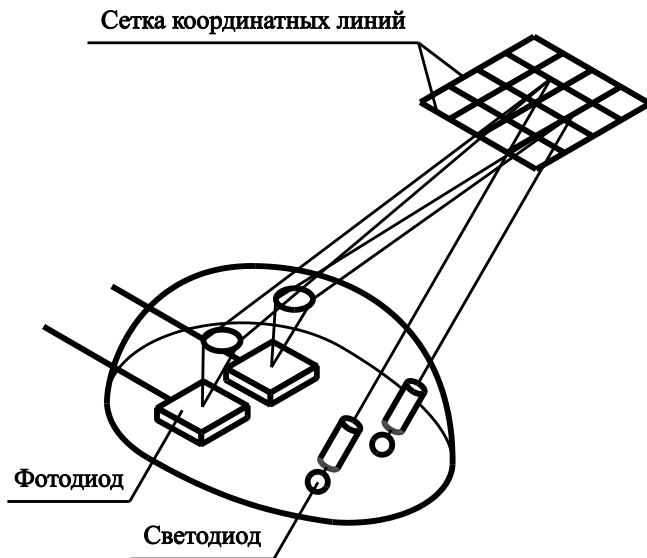


Рис.6

Как было сказано выше, состояние визуальной среды «виртуальной сферы» реагирует на каждое движение оператора. Предположим, что трехмерная картина, заполняющая пространство сфероидальной оболочки, определяется положением головы наблюдателя. Реализация данного проекта состоит в том, что в шлем, надеваемый на голову оператора, монтируются два светодиода, которые излучают лучи света заданных цветов. Лучи света, отраженные от внутренней поверхности «виртуальной сферы», попадают в фотодиоды, которые регистрируют информацию о положении головы оператора в полярной системе координат, привязанной к центру сфероидального купола. Эта информация преобразуется в данные о направлении взгляда наблюдателя, обращенного на геометрические модели объектов, заданные в евклидовом пространстве. Принципиальная схема устройства по определению сферических координат положения головы оператора представлена на рис.6.

Выводы. Предложенные схемы вычисления интерференционной картины, формирования фазовой голограммы и воспроизведения трехмерного изображения основываются на геометрической модели психофизического пространства. Решение задачи преобразования евклидова пространства в риманово пространство положительной кривизны и конечного объема является составной частью математического обеспечения тренажера. Применение в компьютерных симуляторах трехмерных изображений повышает эффективность подготовки персонала к управлению сложными техническими системами.

Список литературы: 1. Оптическая голография: В 2 т. / *Априль Ж., Арсено А. и др.*: Под ред. *Колфилда Г.*: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Т.1. – 374 с. 2. Оптическая голография: В 2 т. / *Априль Ж., Арсено А. и др.*: Под ред. *Колфилда Г.*: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Т.2. – 735 с. 3. *Милер М.* Голография. Теория, эксперимент, применение: Пер. с чеш. – М.: Машиностроение, 1979. – 207 с. 4. *Ковалев Ю.Н.* Геометрическое моделирование эргатических систем: разработка аппарата. – К.: КМУГА, 1996. – 134 с. 5. *Ницин О.Ю.* Геометрична модель просторової картини світу у свідомості людини // Прикладна геометрія та інженерна графіка: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К.: КНУБА, 1999. – Вип.65. – С. 92-95. 6. *Федоров Б.Ф.* Цифровая голография. Синтез голограмм простейших объектов и восстановление изображений. – М.: Наука, 1976. – 151 с. 7. *Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С.* Цифровая голография. – М.: Наука, 1982. – 220 с. 8. *Франсон М.* Голография. – М.: Мир, 1972. – 246 с. 9. *Кольер Р.* Оптическая голография: Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – 680 с.

Поступила в редакцию 20.04.06