

УДК 004.353

МЕТОДЫ ОТОБРАЖЕНИЯ ТРЕХМЕРНОЙ ИНФОРМАЦИИ

А.А. ДЕРЮШЕВ, Д.П. КУКИН, И.Л. СВИТО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 21 марта 2008

Дана классификация методов отображения трехмерной информации. Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, на основе которого описан современный уровень развития методов объемной визуализации. Очерчены границы практической применимости рассмотренных методов.

Ключевые слова: отображение трехмерной информации, дисплей, стереоскопия, зрение человека.

Введение

Восприятие объема рассматриваемого пространства является неотъемлемой и естественной чертой зрения человека, позволяющей получить значительно больше информации об окружающей действительности. При развитии технологий, позволяющих сначала передать вид существующего окружающего мира (фотография, кинематограф, приборы медицинской диагностики), а затем и спроектировать его будущее состояние (системы автоматизированного проектирования), всегда подразумевалось, что получаемая человеком информация будет трехмерной. В 60-х гг. прошлого века казалось, что вопрос разработки хороших методов отображения объемной информации решится в самом недалеком будущем [1, 2]. Были развиты различные методы передачи объема изображаемого пространства, однако каждый из них наряду с достоинствами имел и целый ряд недостатков, сильно ограничивающих практическое использование.

В настоящее время достигнут ряд значительных успехов в развитии вычислительной техники, что позволило улучшить обработку данных в многих областях: радиолокации, медицине, геологии, физике и астрофизике, машиностроении и т.д. Широко используется трехмерное моделирование, однако конечная информация выдается оператору в двухмерном виде, что связано с несовершенством и большой стоимостью существующих трехмерных дисплеев и проекционных систем. На преодоление разрыва между возможностями создания и отображения трехмерной информации направлены усилия большой группы ученых и инженеров как на территории СНГ, так и за рубежом; ниже рассматривается современное состояние проблемы отображения объемной информации.

Классификация методов

По используемым физическим принципам все методы отображения объемной информации можно разбить на четыре группы:

- 1) оптические;
- 2) пространственные (volumetric);

- 3) учитывающие особенности зрения человека;
- 4) комбинированные.

По необходимости использования для восприятия изображения дополнительных технических средств методы делятся на автостереоскопические (не требующее наличия у оператора очков либо других приспособлений) и очковые.

По соотношению видимого изображения и размеров проектирующей системы все методы можно разделить на экранные (максимальный размер элемента формирующей изображение системы больше либо равен видимому в каждый текущий момент размеру изображения) и безэкранные.

Оптические методы

Оптические методы основаны на восстановлении волнового фронта либо хода лучей, приближающегося к волновому фронту либо ходу лучей от изображаемого объекта. К числу оптических методов относятся:

- голография;
- интегральная фотография Липпмана;
- использование зеркал;
- использование линз больших размеров.

Использование оптических методов позволяет, как правило, создать автостереоскопическое устройство, а также зафиксировать полученное изображение с помощью технических средств (например фотоаппарата). В то же время угловой размер видимого изображения ограничен видимыми угловыми размерами дисплея; линейный рост требуемых размеров изображения вызывает экспоненциальный рост стоимости устройства.

Наибольшее соответствие между реальным предметом и изображением дает использование голографических методов, полностью восстанавливающих волновой фронт объекта. Использование в качестве модулирующих опорного пучка элементов специальных жидкокристаллических индикаторов (ЖКИ) позволяет создавать изменяющиеся во времени изображения, в том числе с использованием технологии CGH (computer generated hologram — голограммы, сгенерированные на компьютере) [3, 4]. Для создания динамических изображений может применяться также акустическая голограмма [5]. К недостаткам голографических методов формирования изображений относятся: необходимость использования когерентных источников света; размер формирующих изображение элементов, соизмеримый с длиной волны, что налагает жесткие ограничения на качество обработки узлов дисплея и изоляцию от воздействия внешних факторов. В то же время практически все используемые приемники, для которых и формируется изображение (в том числе и глаз человека), не обладают чувствительностью к фазе падающей волны, а реагируют только на ее интенсивность и направление прихода.

Отказавшись от точного восстановления фазы падающей от объекта волны при сохранении направления лучей, можно предложить метод, позволяющий существенно упростить техническую реализацию дисплея при сохранении той же (с точки зрения приемника) информации об объекте.

В [6] для сохранения и передачи информации об объекте также используется явление интерференции, однако интерферируют между собой не объектная и опорная волны, как в голографическом методе, а только волна, приходящая от объекта; явление интерференции позволяет сохранить угловые падающих координаты лучей. При этом происходит значительное уменьшение разности хода интерферирующих лучей, что, в свою очередь, позволяет использовать обычные некогерентные источники как для записи, так и для восстановления изображения.

Так как лучи света в однородном пространстве распространяются по прямой линии, то для сохранения направления лучей без использования интерференции можно задать для каждого луча две опорные точки в пространстве, через которые он должен проходить. Для этого можно использовать две ЖК панели, расположенные в различных плоскостях [7].

Пространственные методы

К пространственным методам формирования трехмерных изображений относятся методы, основанные на излучении, поглощении либо рассеивании излучения точками среды, находящимися в точках формируемого изображения [8].

К достоинствам данных методов формирования изображения относится обеспечение кругового обзора созданного изображения, автостереоскопичность, возможность фотографирования. В то же время размер отображаемого пространства совпадает с пространством, занимаемым устройством визуализации, что делает проблематичным вывод больших изображений.

В настоящее время существуют две основные разновидности методов пространственного формирования изображений: динамический и статический. Динамический метод предполагает использование вращающихся экранов [9]; устройства, реализующие статический метод, не имеют движущихся частей [10].

Динамический метод позволяет уменьшить физический объем, занимаемый устройством; увеличение эффективного занимаемого объема до размеров изображения производится путем изменения положения формирующего изображение элемента. В патенте [11] в качестве формирующего изображение элемента используется диффузно-отражающая полупрозрачная поверхность, которой придается вращательное либо возвратно-поступательное движение. Синхронно с перемещением поверхности на нее проецируют изображение соответствующего сечения изображаемого объекта. Динамический метод предполагает использование как плоских поверхностей, так и поверхностей в виде спирали либо имеющих более сложную форму [12]. Для устранения мерцаний и уменьшения видимости самого экрана частоту вращения выбирают достаточно большой (типичное значение — 900–1000 об/мин); при этом заметным оказывается влияние сопротивления воздуха, для устранения которого вращающуюся поверхность помещают в баллон с вакуумом.

Статические методы позволяют спроектировать дисплейное устройство, в котором отсутствуют макроскопические движущиеся части. В простейшем случае используются отображающие элементы, непрозрачные либо светящиеся во включенном состоянии и прозрачные в выключенном. Включая нужные элементы дисплейного массива, можно получать требуемые изображения. В качестве таких элементов могут использоваться: светодиоды, набор световодов, пиксели набора ЖК матриц, специальное стекло, содержащее редкоземельные элементы, свечение в котором возбуждается электронными методами либо с помощью лазера. В патенте [13] используется трехмерный набор шарообразных элементов, выполненных из полиметилметакрилата и содержащий флуоресцентный краситель. Свечение каждого элемента активируется путем подвода по индивидуальному световоду ультрафиолетового либо видимого света. Для получения цветного изображения используются излучающие элементы трех цветов: красного, зеленого и синего; изменяя интенсивность каждой составляющей, можно получить нужный цвет так же, как это происходит в обычном телевизоре. В [14] описан процесс получения изображения в специальном стекле, в [15] — в парах рубидия.

Отсутствие движущихся частей позволяет устранить необходимость точной синхронизации текущего положения экрана и выводимого изображения, однако практическая реализация статических методов формирования объемных изображений имеет целый ряд трудностей. Так, значительно усложняется формирование полноцветных изображений, поскольку каждый редкоземельный элемент обладает своим цветом свечения, а создание требуемого геометрического распределения нескольких редкоземельных элементов в нужных концентрациях в цельном объеме стекла представляет собой сложную задачу. При возрастании объема изображения масса устройства возрастает пропорционально объему (т.е. как третья степень линейного размера). Как правило, в настоящий момент статические пространственные дисплеи используются для вывода небольших одноцветных изображений компьютерной графики.

Для увеличения объема изображения при сохранении приемлемых габаритов проекционного устройства предложено в качестве рабочей среды использовать воздух [16]. Для формирования элементов изображения используют сфокусированное излучение мощного инфракрасного лазера, наносекундные импульсы которого вызывают появление шарика плазмы вблизи фокуса. Сканирование лазерного луча по координатам X и Y обеспечивают гальванометриче-

ские зеркала, изменение положения фокуса по оси Z достигается изменением положения фокусирующей линзы. Частота повторения лазерных импульсов составляет 100 Гц, что с учетом инерции зрительного восприятия человека позволяет формировать простейшие геометрические фигуры. При этом изображение не ограничено размерами устройства, а может быть сформировано в любой точке пространства (в описанной работе расстояние от устройства до изображения составляло несколько метров).

Разработчики фирмы Beta minds (Великобритания) в качестве рабочей среды выбрали мелкораспыленную воду, на которую обычным оптическим путем проецируется требуемое изображение. В отличие от предыдущего способа, формируется не трехмерное, а двумерное изображение; однако при рассматривании человеком создается иллюзия трехмерности за счет отсутствия видимой плоскости локализации изображения. Область формирования изображения не представляет опасности для человека, поэтому появляется возможность организовать интерактивное взаимодействие оператора и формируемого изображения [17]. Процесс формирования изображения зависит от относительной влажности воздуха и силы воздушных потоков.

Методы, учитывающие особенности зрения человека

Как правило, формируемое трехмерное изображение предназначено не для последующего документирования (например путем фотографирования), а для непосредственного наблюдения человеком. Процесс восприятия изображения не является чисто оптическим, а включает в себя и психофизиологические особенности.

Учет особенностей восприятия пространства человеком позволяет облегчить процесс получения трехмерного изображения. Как правило, каждый метод учитывает только одну особенность, что позволяет предельно упростить практическую реализацию, однако сказывается на качестве формируемой пространственной картины.

К настоящему моменту наибольшее распространение получили следующие методы:

- устранение видимости плоскости локализации изображения;
- создание ощущения объемности за счет обеспечения нужной конвергенции зрительных осей глаз;
- показ каждому глазу отличающихся изображений (использование стереопар);
- динамическое чередование различных изображений.

Устранение видимости плоскости, на которую проецируется изображение, может осуществляться тремя основными путями:

- путем перемещения рамки, ограничивающей плоскость проекции;
- путем увеличения плоскости проекции до размеров, превышающих размеры поля зрения человека (технология Imax и т.д.);
- путем проекции изображения на почти прозрачную плоскость.

Для обеспечения нужной конвергенции широко используются методы, известные как Sirds (Single image random dot stereogram — стереограмма одного рисунка на основе случайных точек), Sirts (Single image random text stereogram — стереограмма одного рисунка на основе случайного текста), Sis (Single image stereogram — стереограмма одного рисунка) [18–20]. В соответствии с этими методами производят проекцию каждой точки изображаемого объекта на плоскость изображения, проводя соответствующие прямые из расчетного положения каждого глаза наблюдателя в точку объекта; пересечение каждой прямой с экранной плоскостью и дает необходимую точку изображения. Для уменьшения требуемых точек в изображении (количество которых ограничено разрешающей способностью и размерами устройства вывода информации) расчет производят последовательно так, чтобы одна точка на изображении соответствовала хотя бы двум точкам на объекте (при рассматривании различными глазами). Упрощение получения требуемой конвергенции достигается при заполнении плоскости отображения повторяющимся узором. В настоящее время данные методы широко используются при производстве полиграфической продукции, так как не требуют для рассматривания применения дополнительных устройств. В то же время методы обладают целым рядом недостатков: наблюдение трехмерного объекта возможно только вблизи расчетной точки, цвета и текстура объекта не сохраняются; для наблюдения объекта нужна некоторая тренировка (5–10% людей не способны

использовать эту технологию), получаемое изображение в каждый момент доступно только для одного наблюдателя.

В настоящее время наибольшее распространение получили методы, основанные на показе стереопар. Стереопара представляет собой два изображения, снятые с различных точек, соответствующих положениям левого и правого глаз наблюдателя (либо рассчитанные машинными методами для этих положений глаз). В отличие от других методов этой группы, стереоскопические изображения позволяют добиться наиболее сильного ощущения объема пространства при незначительных затратах на практическое осуществление.

Для разделения изображений, предназначенных для разных глаз наблюдателя, используются:

- разделение по цвету;
- поляризационное разделение;
- разделение с помощью растров;
- пространственное разделение с помощью механических устройств – стереоскопов;
- временное разделение показа двух изображений и соответствующее закрывание каждого глаза с помощью обтюрационных или жидкокристаллических очков.

Практически все методы для сепарации изображений (за исключением растрового) предполагают использование каждым пользователем персонального наблюдательного прибора, который, как правило, выполнен в виде очков.

При использовании разделения по цвету стекла очков представляют собой светофильтры с дополнительными цветами (красный-голубой, оранжевый-синий и т.д.), который позволяют выделить из проецируемого изображения частичные изображения для каждого глаза. Несмотря на то что каждое частичное изображение не является полноцветным, пользователь видит цветное изображение, за исключением некоторых цветов (при использовании красно-голубых светофильтров нельзя получить ярко-красные и ярко-синие цвета). Вторым недостатком данного способа является уменьшение яркости видимого изображения. К достоинствам этого способа следует отнести простоту реализации (может использоваться обычный монитор либо мультимедиа-проектор) и небольшие дополнительные затраты (необходимо только приобрести нужное количество недорогих очков).

Поляризационное разделение позволяет воспроизводить весь диапазон цветов объекта, однако при проекционном способе воспроизведение изображений требует применения экрана, не изменяющего поляризацию падающего света. Для создания двух изображений с различными способами поляризации используют либо два устройства со статическим положением плоскости поляризации, либо один дисплей с изменяемой во времени плоскостью поляризации формируемого изображения. Другим возможным решением является использование сложного рисунка направлений поляризации, что позволяет одновременно проектировать изображения для правого и левого глаза [21]. Однако в этом случае возрастают требования к разрешающей способности дисплея.

В простейшем случае используется линейная поляризация. Для наблюдения изображения каждый наблюдатель должен использовать очки с поляроидами, плоскости поляризации которых совпадают с плоскостями поляризации изображения для каждого глаза. Для улучшения качества стереоизображения за счет ликвидации мерцаний изображения для любых условий наблюдения в патенте [22] использованы формователи эллиптической поляризации светового потока с параметрами эллиптической поляризации в виде выражений типа \arctg или \arccos от отношения амплитуд сигналов временной развертки для представления левого и правого ракурсов трехмерной сцены в параметрах двух взаимно ортогональных состояний эллиптической поляризации. Для наблюдения изображения используются очки, состоящие из двух анализаторов эллиптической поляризации с взаимно ортогональными поляризационными характеристиками.

К недостаткам поляризационных методов следует отнести необходимость использования очков, а также сложности показа много ракурсных изображений.

Разделение изображений стереопары с помощью растров позволяет создать автостереоскопичное выводное устройство, обладающее повышенным комфортом для наблюдателя. По принципу действия все растры можно разделить на линзовые и щелевые. Щелевые растры бо-

лее просты в изготовлении, так как они представляют собой просто набор прозрачных и непрозрачных участков; однако за счет наличия поглощающих свет элементов светотехнические характеристики щелевых растров сильно уступают характеристикам линзовых. Линзовый растр представляет собой набор сферических, цилиндрических либо других линз, выполненных из стекла либо прозрачного пластика с точно известным показателем преломления. При массовом производстве цена растра получается относительно невысокой, что позволяет использовать его в широком круге устройств.

Увеличение числа воспроизводимых ракурсов позволяет повысить качество изображения. В [23] для формирования изображения предложено использовать четыре ракурса, что позволяет передать информацию об объеме не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскостях. Для обеспечения возможности регулировки интервала глубины восприятия пространства предлагаемый растр содержит механизм прогиба, изменяющий кривизну и фокусное расстояние оптических элементов растра.

Для получения эффекта оглядывания могут быть использованы различные методы. Если разрешающая способность формирующего изображение устройства достаточно высока, то могут формироваться более двух изображений, соответствующих различным положениям головы наблюдателя. Однако такой подход неприемлем при небольшом формируемом числе точек изображения. В этом случае используется отслеживание положения глаз наблюдателя и производится коррекция формируемых изображений стереопары. При увеличении числа зрителей возрастает и техническая сложность системы вывода изображений (так, в патенте [24] число проекторов равно числу наблюдателей, при этом используется такое же число датчиков для определения расположения глаз каждого зрителя). В патенте [25] для формирования требуемых в данный момент ракурсов изображения в дисплейное устройство включен специальный селектор ракурсов, выполненный в виде оптического модулятора с двумя областями в форме полуплоскостей (или более сложных поверхностей), граница между которыми выполнена с возможностью параллельного сдвига вдоль направления бинокулярного параллакса.

Для использования растровых методов необходимо обеспечить точное согласование формирующих изображение элементов с оптическими элементами растра. Такое согласование легко произвести при жестко фиксированной дискретной структуре изображения (например, в ЖК экранах каждый пиксель изображения имеет постоянные координаты, заданные на этапе изготовления матрицы, в то время как светящийся элемент электронно-лучевой трубки определяется положением электронного луча, которое несколько меняется как в процессе прогрева устройства, так и в процессе его старения).

Комбинированные методы

Комбинированные методы позволяют повысить качество воспроизведения объема либо упростить техническую реализацию устройства за счет совместного использования различных описанных выше методов.

Для обеспечения возможности безочкового наблюдения стереопар с разделением по цвету (анаглифов) инженеры проекта StereoStep предложили использовать бирастр – комбинацию, составленную из двух оптических растров и цветного светофильтра. Кроме обеспечения возможности безочкового наблюдения такой метод позволяет использовать в качестве источника изображения ЭЛТ, а также использовать растры и ЖКИ с несогласованным шагом растра. Метод также можно использовать для получения стереоизображений с обычных мультимедиа-проекторов, так как в этом случае размер получаемого изображения жестко не ограничен разрешением проектора. Другие недостатки анаглифного метода при этом не устраняются. При замене цветного светофильтра на поляризационный можно реализовать безочковый просмотр стереопар с поляризационным разделением.

Перспективным направлением развития методов отображения трехмерной информации является отказ от использования диффузно-рассеивающих экранов, а проекция информации непосредственно в глаз человека. Одной из первых подобных разработок является VRD (Virtual retinal display — виртуальный сетчаточный дисплей), изобретенный в Вашингтонском университете в лаборатории технологий интерфейса с человеком (Human Interface Technology Lab)

[26–28]. Для достижения восприятия объема также используется демонстрация каждому глазу человека своего изображения, однако изображения формируются не на внешнем экране, а проецируются через зрачок непосредственно на сетчатку. Такой подход позволяет значительно повысить яркость изображения, так как излучаемая энергия не рассеивается по всем направлениям экраном, а вся направляется на приемник излучения. Кроме того, яркость излучения не связана с разрешающей способностью обратной зависимостью (у обычных мониторов повышение разрешения связано с уменьшением размера зерна люминофора, при этом уменьшается излучаемая им энергия). Видимый размер изображения может быть значительно большим размеров дисплейного модуля, т.е. реализуется безыканный способ показа изображения. VRD включает в себя набор лазерных излучателей трех основных цветов, интенсивность излучения которых синхронизирована с процессом развертки, механическое сканирующее устройство для перемещения луча по вертикали и гальванометрическое зеркало для развертки луча по вертикали. Первоначальные реализации устройства требовали совмещения глаза наблюдателя с выходным зрачком устройства, более поздние модели производят автоматическое определение положений глаз. Регулируя яркость изображения, можно обеспечить видимость как только проецируемого изображения, так и совместного наблюдения проецируемого объекта и окружающей реальности, что позволяет поместить компьютерные модели в реальную обстановку. К настоящему моменту изображения доступны для восприятия только одному пользователю, однако в будущем возможно появление и многопользовательской системы.

Заключение

Наиболее перспективными для практического применения являются растровый метод, метод проекции на вращающийся экран и метод проекции изображения непосредственно в глаз наблюдателя. Растровый метод получит широкое распространение в аппаратуре для бытовых целей как недорогой метод, обеспечивающий приемлемое качество формируемого изображения. В приборах медицинской диагностики, радиолокаторах и других применениях, где важна высокая точность соответствия изображения оригиналу, возможность его документальной фиксации и широкое поле зрения, найдет применение метод проекции на вращающийся экран. Метод проекции изображения непосредственно на сетчатку в ближайшем будущем будет использоваться в военных приложениях (например летчиками-истребителями), так как позволяет достичь высокой яркости изображения, совместить выводимую информацию и окружающую реальность. В дальнейшем, при удешевлении устройств слежения за положением глаз и уменьшением размеров устройств (например сотовых телефонов), метод найдет применение и в бытовой аппаратуре.

3D INFORMATION DISPLAY METHODS

A.A. DERYUSHEV, D.P. KUKIN, I.L. SVITO

Abstract

Classification of 3D information display methods is presented. The analysis of the national and foreign literature is carried out; the description of a modern level of development of 3D visualization methods is given. Borders of practical applicability of the considered methods are outlined

Литература

1. *Валюс Н.А.* Стереоскопия. М., 1962.
2. *Комар В.Г., Серов О.Б.* Изобразительная голография и голографический кинематограф. М., 1987.
3. Пат. № 6195184 US. High-resolution large-field-of view three-dimensional hologram display system and method thereof / Tien-Hsin Chao, F.W. Mintz, P. Tsou, N.A. Bryant. Publ. 27.02.2001.

4. Пат. 1813298 SU. Голографическое телевизионное устройство / Сафронов Г.С., Титарь В.П. Оpubл. 27.03.1995.
5. Пат. № 2115148 RU. Устройство для электронного формирования трехмерного голографического изображения / Петров В.В. Оpubл. 10.07.1998.
6. Пат. № 2104502 RU. Способ формирования и воспроизведения объемного изображения и устройство для формирования и воспроизведения объемного изображения / Якубович Е.И. Оpubл. 10.02.1998.
7. Пат. № 2164702 RU. Устройство для демонстрации стереоскопических изображений / Никонов А.В., Долгов В.М., Долгов Ю.М., Никонов А.А. Оpubл. 27.03.2001.
8. *Blundell B.G., Schwarz A.J.* Volumetric three-dimensional display systems. New York, 2000.
9. *Tsao C.-C., Chen J.* // Proc. of SPIE. 1998. Vol. 3296. P. 191–197.
10. *Downing E., Hesselink L., Ralston J., Macfarlane R.* // Science. 1996. Vol. 273. P. 1185–1189.
11. Пат. № 2239858 RU. Способ формирования трехмерных изображений / Мышкин В.Ф. Оpubл. 10.11.2004.
12. *Favalora G.E., Dorval R.K., Hall D.M. et al.* // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4297. P. 227–235.
13. Пат. № 5801666 US. Three-dimensional monitor / D.L. MacFarlane. Publ. 01.09.1998.
14. *Langhans K., Bezecny D., Homann D. et al.* // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3296. P. 204–216.
15. *Kim I.I., Korevaar E., Hakakha H.* // Proc. of SPIE. 1996. Vol. 2650. P. 274–284.
16. True 3D display using laser plasma in the air // AIST today. 2006. Vol. 6, № 4. P. 16–19.
17. *Grossman T., Wigdor D., Balakrishnan R.* // Proc. of UIST. 2004, pp. 61–70.
18. *Подбельская Е.В.* // Приложение к журналу "Информационные технологии". 2002. № 9.
19. *Ninio J.* // Spatial vision. 2007. Vol. 21. P. 185–200.
20. Stereo Computer Graphics and other True 3D Technologies / D.F. McAllister (ed.). Princeton, 1993.
21. Пат. № 5537144 US. Electro-optical display system for visually displaying polarized spatially multiplexed images of 3D-objects for use in stereoscopically viewing the same with high image quality and resolution / S.M. Faris. Publ. 16.07.1996.
22. Пат. № 2306680 RU. Способ наблюдения стереоизображений с объединенным предъявлением ракурсов и устройство для его реализации / Ежов В.А. Оpubл. 20.09.2007.
23. Пат. № 2082256 RU. Плоский экран / Будзиловский В.В., Новик И.А., Ивченко С.В., Засемков В.С. Оpubл. 20.06.1997.
24. Пат. № 2221350 RU. Стереоскопическая система / Арсенич С.И. Оpubл. 10.01.2004.
25. Пат. № 2306678 RU. Автостереоскопический дисплей с квазинепрерывным спектром ракурсов / Ежов В.А., Студенцов С.А. Оpubл. 20.09.2007.
26. *McQuaide S.* Three-dimensional virtual retinal display using a deformable membrane mirror: vaster's thesis. Washington, 2002.
27. Пат. № 5355181 US. Apparatus for direct display of an image on the retina of the eye using a scanning laser / Ashizaki K., Yamamoto M., Miyaoka S., Tamada S. Publ. 11.10.1994.
28. *Johnston R.S., Willey S.* // Proc. of helmet- and head-mounted displays and symbology design. 1995. P. 2–13.