

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра графики, конструирования и информационных технологий  
в промышленном дизайне

**ТЕОРИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к выполнению самостоятельных работ  
для обучающихся по направлению 54.03.01 «Дизайн»  
(профиль «Промышленный дизайн») всех форм обучения

Воронеж 2021

УДК 004.946:681.3(07)  
ББК 32.973я7

**Составители:** А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, Ю. С. Золототрубова

**Теория виртуальной реальности:** методические указания к выполнению самостоятельных работ для обучающихся по направлению 54.03.01 «Дизайн» (профиль «Промышленный дизайн») всех форм обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: А. В. Кузовкин, А. П. Суворов, Ю. С. Золототрубова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2021. – 29 с.

Приводится описание выполнения самостоятельных работ по курсу «Теория виртуальной реальности».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению 54.03.01 «Дизайн» (профиль «Промышленный дизайн») всех форм обучения.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле CP\_ TBR. pdf.

Ил. 17. Библиогр.: 14 назв.

**УДК 004.946:681.3(07)**  
**ББК 32.973я7**

**Рецензент** - А. А. Болдырев, канд. техн. наук, доцент  
кафедры технологии машиностроения ВГТУ

*Рекомендовано методическим семинаром кафедры ГКПД и  
методической комиссией ФИТКБ Воронежского  
государственного технического университета в качестве  
методических материалов*

## Введение

Рассмотрим три основные существующие технологии: виртуальной, дополненной и смешанной реальностей. Для каждой из них присущи некоторые характерные особенности построения теоретических основ. На самостоятельных работах студентам следует воспользоваться настоящими методическими указаниями для углубленного понимания существенных различий в теории виртуальной реальности для разных технологий.

Технология виртуальной реальности формирует виртуальный мир, который не имеет ничего общего с окружающим нас реальным пространством. Визуально мы воспринимаем только виртуальный мир. Этот мир окружает нас со всех сторон. Мы можем менять направление взгляда, поворачивать голову и тело, двигаться и визуально ощущать все эти изменения. Т.е. мы полностью погружаемся в виртуальный мир, разрушить естественность восприятия могут только рассогласования визуального восприятия с другими органами чувств. Например, мы можем налететь на реальную стену, которой нет в виртуальном мире, или упасть на ровном полу, спускаясь с виртуальной лестницы. Поэтому возможность рассогласования виртуального и реального миров это основная проблема технологии виртуальной реальности. Технология виртуальной реальности предполагает достаточно пассивное восприятие виртуального мира, когда не возникает необходимости контакта с реальным миром. Одним из таких применений является видео 360, которое позволяет человеку смотреть кино, находясь внутри сцены. Другой пример – это компьютерные игры, в которых игрок не должен выходить за рамки определенного пространства.

Аналогично технологии виртуальной реальности технология смешанной реальности формирует виртуальный мир, но этот виртуальный мир естественным образом накладывается на реальный, смешивая виртуальные и реальные объекты в единое целое. Виртуальные объекты располагаются в реальном пространстве и человек уже не теряется в виртуальном пространстве, поскольку оно обладает ограничениями реального мира. Человек может свободно передвигаться в пространстве, не боясь налететь на реальные объекты или упасть с виртуальной лестницы.

Естественным применением систем смешанной реальности является средство «улучшения» реального мира, т.е. виртуальное прототипирование, когда мы расширяем реальный мир объектами, которые мы бы хотели там видеть, но по ряду причин, например, затраты на изготовление, мы не можем туда их поместить. Это особенно актуально при работах связанных с проектированием, когда в имеющееся пространство надо оптимальным образом вписать новые объекты. Например, можно выбрать и расставить мебель в пустом помещении, провести анализ архитектурного проекта, представить вариант ландшафтного дизайна и т.п.

Технология дополненной реальности стоит некоторым особняком от технологий смешанной и виртуальной реальностей. Ее главная цель – информирование человека об окружающей обстановке и предоставление всей необходимой информации об окружающих объектах (как визуальной, так и звуковой). Системы дополненной реальности могут использоваться как автономно, например, индикаторы на лобовом стекле автомобилей, самолетов, вертолетов, так и совместно с системами виртуальной и смешанной реальностей как дополнительные информационные системы и элементы интерфейса. Системы дополненной реальности первыми нашли свое коммерческое применение. Это были информационные системы наשלемых индикаторов и индикаторов на лобовом стекле, которые выводили всю необходимую информацию о полете непосредственно перед глазами и помогали пилоту ориентироваться в пространстве, не отвлекаясь на чтение информации с приборных панелей. В дальнейшем эти технологии были интегрированы в более компактные системы очков дополненной и смешанной реальностей. Как правило системы дополненной реальности снабжаются дополнительными датчиками, необходимыми для анализа окружающего пространства. Например, датчик, распознающий штрих код, может сразу вывести всю информацию о товаре перед глазами человека.

Рассмотрим, как формируется изображение виртуальных объектов в системах виртуальной реальности [1]. На данный момент существует два основных подхода к формированию систем виртуальной реальности. Во-первых, это виртуальная комната, а, во-вторых, носимые устройства виртуальной реальности. В первом случае строится специальное помещение, окруженное стереоскопическими экранами, на которые транслируется изображение виртуального мира. Человек помещается в некий аналог кругового стереоскопического кинозала, за пределами которого располагается виртуальный мир. Основным преимуществом такой системы является возможность нахождения и взаимодействия группы людей в одном виртуальном мире. Все носимые устройства виртуальной реальности лишены этого преимущества.

Кроме того, отсутствие дополнительного устройства на голове и неограниченное поле зрения человека у человека, находящегося в виртуальном пространстве, являются неоспоримыми преимуществами систем виртуальных комнат. Неявным преимуществом таких систем является возможность подключения значительных вычислительных ресурсов к таким системам и, следовательно, возможность синтеза изображения виртуального мира с большей степенью реализма, что в конечном счете повышает естественность восприятия виртуальной реальности. К недостаткам таких систем можно отнести очень высокую стоимость, отсутствие мобильности и необходимость создания специального помещения. Эти недостатки значительно ограничивают возможность практического использования систем виртуальной реальности.

К носимым устройствам виртуальной реальности относятся нагнетные индикаторы и очки виртуальной реальности. Основная задача таких систем – это формирование стереоскопического изображения на сетчатке глаз человека. Простейшим устройством формирования стереоскопического изображения является стереоскоп, представленный на рис. 1. Он позволяет наблюдать стереоскопическое изображение пары слайдов, фотографирующих один объект с двух положений камеры [3].

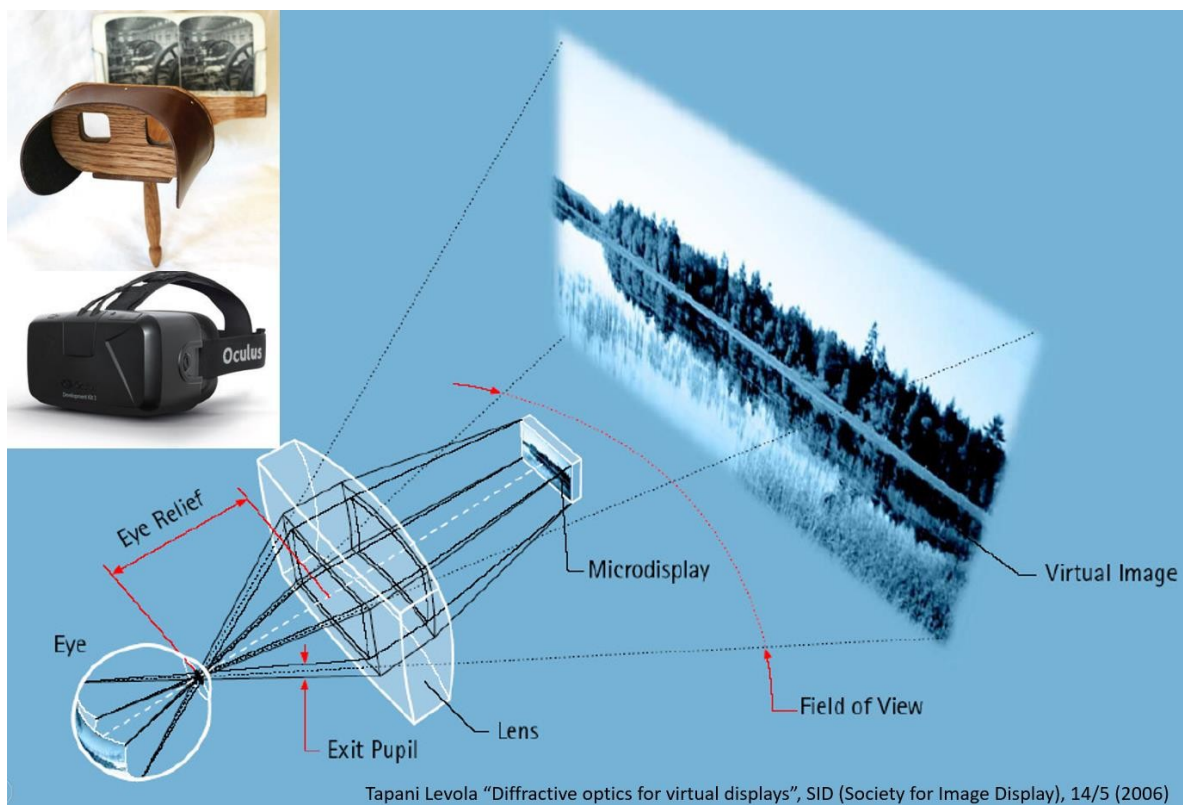
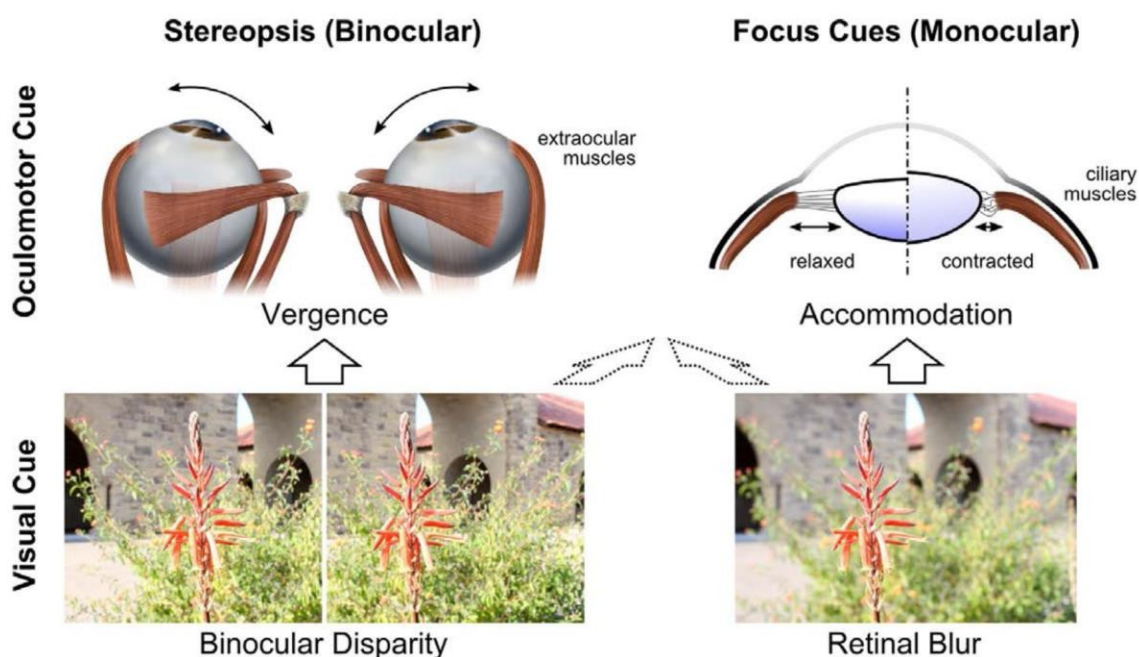


Рис. 1. Принцип работы носимых устройств виртуальной реальности

Современные очки виртуальной реальности, показанные на рис.1, представляют собой сложный прибор, оптическая часть которого работает по принципу старинного стереоскопа, т.е. формирует изображение слайда на сетчатке глаза человека. Основное отличие от стереоскопа это микродисплеи, на которых формируются изображения для левого и правого глаза. Как показано на принципиальной оптической схеме, изображение, формируемое на микродисплее, проецируется оптической системой (в данном случае лупой) на расстояние, на котором человек ожидает увидеть виртуальный объект. Это мнимое изображение формируется перед наблюдателем и человеческий глаз аккомодируется на дистанцию до мнимого виртуального изображения. Если мы хотим видеть виртуальный объект на большом расстоянии (практической бесконечности), то микродисплей располагается в фокусе оптической системы. При приближении микродисплея к оптической системе мнимый виртуальный объект приближается к наблюдателю. Для формирования стереоскопического изображения необходимо синтезировать изображения для каждого из глаз независимо, т.е. левый и правый глаз будут видеть один и тот же объект под разным ракурсом, и в предельных случаях, например, когда человек сфокусировал взгляд на близком объекте, изображения дальнего плана могут сильно отличаться [1, 2]. Рис. 2 иллюстрирует этот эффект.



Gordon Wetzstein. A personalized VR/AR system that adapts to the user is crucial to deliver the best possible experience // The BRIDGE, Vol. 46, No. 4, Winter 2016

Рис. 2. Эффекты аккомодации и вергенции человеческого зрения

Стереоскопичность восприятия человеческого зрения есть совместное действие двух эффектов. Во-первых, это вергенция, т.е. сведение двух глаз на точку наблюдения и формирование двух изображений для правого и левого глаза в направлении их зрения. Во-вторых, это аккомодация, т.е. фокусировка хрусталика глаза (напряжение или расслабление мышцы хрусталика глаза) на рассматриваемый объект. Когда вергенция глаз и их аккомодация находятся в согласованном состоянии, человек естественным образом воспринимает объем окружающего мира. Поэтому задача системы виртуальной реальности – формирование изображений на микродисплеях правого и левого глаза, соответствующих параметрам виртуального мира, куда помещается человек. Для осуществления привязки человека к системе координат виртуального мира очки виртуальной реальности снабжаются набором датчиков, позволяющих определить положение и ориентацию очков в реальном пространстве. Кроме того, программное обеспечение, встроенное в данные системы, позволяет предсказать возможное положение головы человека в следующий момент времени. Все эти системы позволяют «сгладить» визуальные дефекты, возникающие при перестроении изображения вследствие поворота или смещения головы человека. В дополнение к перечисленным датчикам системы виртуальной реальности могут содержать системы отслеживания положения зрачков человека. Информация о положении зрачков человека позволяет определить направления взгляда, выделить объект, на который смотрит человек, и синтезировать изображения с правильной вергенцией на выбранный объект. В результате, информация о положении зрачков человека может помочь формированию изображения с правильной аккомодацией и тем самым обеспечить максимально комфортные условия восприятия виртуального изображения, неотличимого от изображения реального мира. С технологической точки зрения очки дополненной реальности достаточно простое устройство [4], компонентная база которого представлена на рис. 3.

Как правило, основными компонентами таких устройств являются корпус, микродисплей (в ряде случаев в качестве микродисплея используется экран сотового телефона, который синтезирует изображение виртуального мира для левого и правого глаза на левой и правой половине экрана соответственно), два окуляра, набор многоосевых датчиков движения, микроконтроллеры и ряд других вспомогательных элементов. К основным оптическим характеристикам систем дополненной реальности можно отнести разрешение микродисплея (видимый размер пикселя экрана дисплея), разрешение оптики (угловое разрешение, которое может обеспечить окуляр), поле зрения (угловая часть пространства, которую человек может увидеть в данной системе) и размер зрачка (“eye box” - та

область, в пределах которой глаз может двигаться и видеть виртуальный мир без каких-либо искажений). Как правило системы виртуальной реальности, в отличие от систем дополненной и смешанной реальностей, имеют высокие оптические характеристики и при достаточном разрешении микродисплея могут создавать высококачественные виртуальные изображения, неотличимые от изображения реального мира.



Рис. 3. Компонентная база очков виртуальной реальности

Принцип работы систем дополненной реальности значительным образом отличается от принципа работы систем виртуальной реальности, и основное отличие заключается в том, что вместо реалистичного изображения виртуального мира формируется информационно-справочное изображение, наложенное на видимую картину реального мира, которое отсутствует в системах виртуальной реальности. Системы дополненной реальности можно классифицировать по двум основным признакам: стационарные и носимые. К стационарным системам можно отнести различного рода индикаторы на лобовом стекле. Рис. 4 иллюстрирует принцип работы оптической части индикатора на лобовом стекле.

На принципиальной схеме видно [5], что информация с дисплея высокой яркости через систему зеркал передается на лобовое стекло автомобиля и, частично отражаясь от него, проецируется на дорогу перед автомобилем. Для повышения яркости виртуального изображения лобовое стекло автомобиля должно иметь специальное спектрально-селективное зеркальное покрытие, отражающее узкую спектральную составляющую



светового излучения, идущего от дисплея, и пропускающее весь оставшийся широкий спектральный диапазон. В результате водитель четко видит всю необходимую навигационную информацию там, где ее наиболее естественно ожидать и не отвлекается на чтение информации с навигационных приборов. Аналогичным образом работают навигационные индикаторы на лобовых стеклах самолетов и вертолетов.

Носимые устройства дополненной реальности могут быть выполнены в виде нашлемных индикаторов или очков дополненной реальности. Основное технологическое отличие между системами дополненной и виртуальной реальности — это то, что человек видит весь окружающий мир сквозь систему дополненной реальности, в то время как в системах виртуальной реальности информация о внешнем мире полностью отсутствует. Совмещение двух пространств в одном оптическом устройстве является сложной технологической задачей и поэтому большинство оптических характеристик у систем дополненной реальности значительно ниже, чем у систем виртуальной реальности. Как правило системы дополненной реальности имеют небольшое поле зрения и небольшое значение “eye box”.

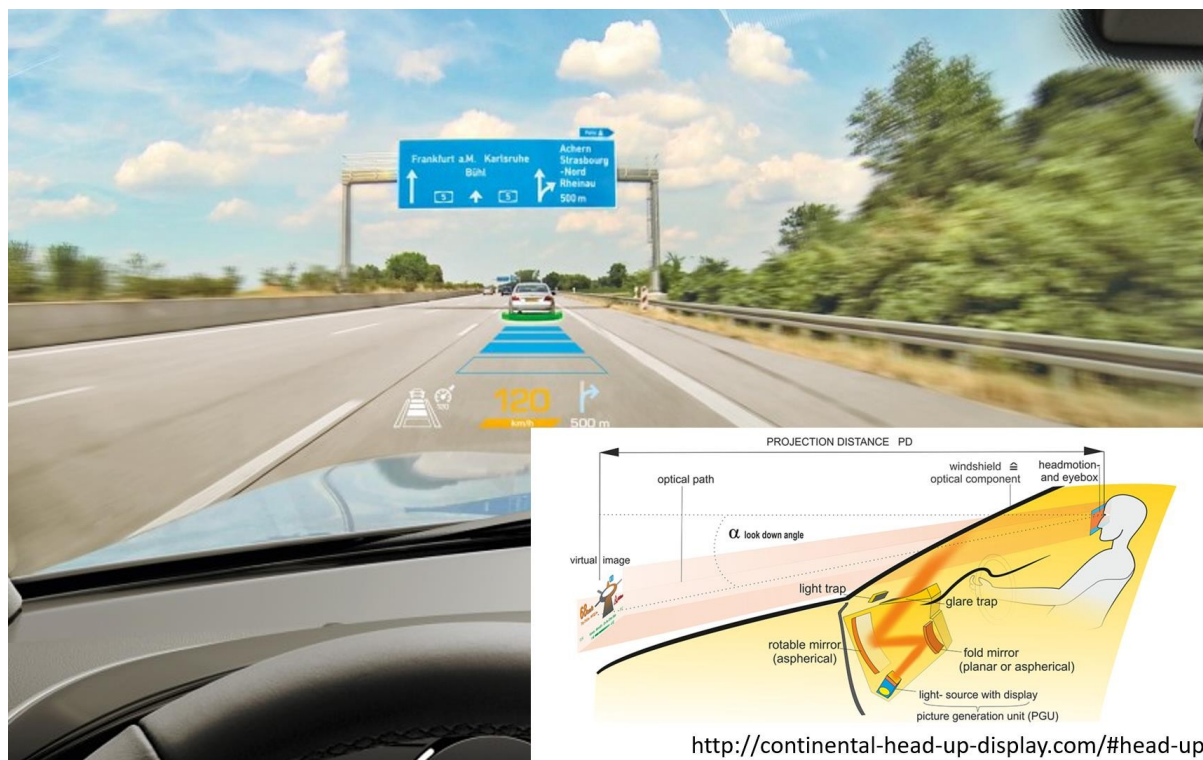


Рис. 4. Принцип работы оптической части индикатора на лобовом стекле

Для систем дополненной реальности имеется широкий спектр технологических решений, основанный на различных принципах

совмещения виртуального и реального изображений. Простейшая оптическая система дополненной реальности основана на так называемой “bird bath” архитектуре. Принцип работы данной системы проиллюстрирован на рис. 5 и заключается в следующем. Изображение, формируемое на микродисплее, передается в светопроводящую пластину, проходит сквозь полупрозрачное зеркало, отражается от задней стенки светопроводящей пластины и попадает обратно на полупрозрачное зеркало, которое проецирует изображение микродисплея в глаз наблюдателя. В результате человек видит, как изображение, сформированное на микродисплее, так и весь окружающий мир сквозь простые очки. Данная архитектура была использована в очках Google Glass и позволяла выводить информацию на один глаз наблюдателя. Данная схема имела большое количество недостатков, начиная от очень низких оптических характеристик, таких как незначительный “eye box” и малое поле зрения, и заканчивая неудобством ее использования, когда дополнительное изображение выводится на периферию человеческого зрения и для чтения информации необходимо было постоянно косить глаз. Кроме того, световое излучение от реального мира, проходящее через светопроводящую пластину, будет искажено, что также снижает эксплуатационные характеристики данного решения.

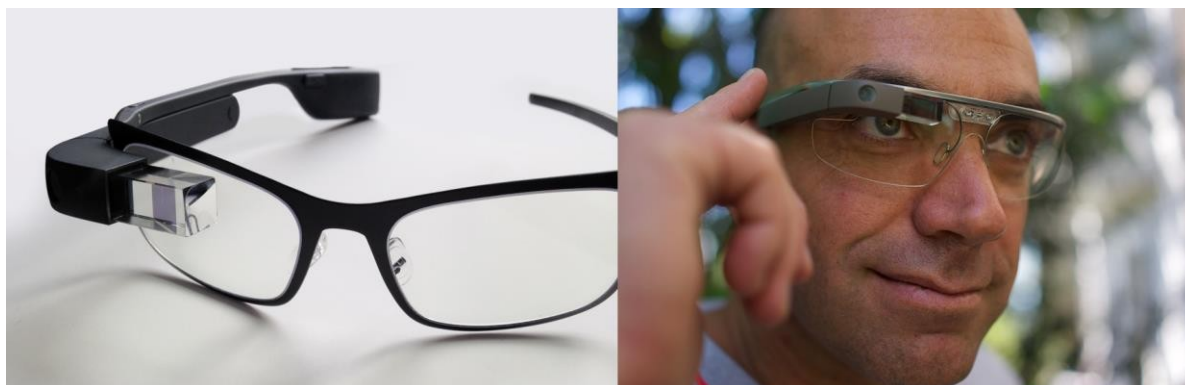


Рис. 5. “Bird bath” архитектура оптической системы дополненной реальности

Другим технологическим решением можно считать систему нашлемного индикатора [6]. Принципиальная схема работы такой системы представлена на рис. 6.

Данная оптическая схема практически полностью повторяет оптическую схему индикатора на лобовом стекле. Принципиальным отличием является то, что все устройство смонтировано на шлеме, как правило, летчика, а вместо лобового стекла используются либо покрывное секло шлема, либо отдельные спектрально-селективные зеркала. Как правило, такие системы имеют большое поле зрения и достаточное

значение “eye box”. К основным недостаткам таких систем можно отнести большой габарит и вес таких устройств.



Ashok Sisodia, etc. Advanced Helmet Mounted Display (AHMD) //Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, May 2007

Рис. 6. Оптическая система нашлемного индикатора

В последнее время широкое развитие получают системы дополненной реальности, основанные на принципе передачи изображения по световодным и волноводным каналам. Общий принцип работы таких систем показан на рис. 7.



Рис. 7. Оптические системы дополненной реальности, построенные на принципе передачи изображения по свето- и волноводным каналам

Световое излучение, формируемое на экране микродисплея, вводится в светопроводящую пластину. Излучение может вводиться либо с

помощью призматических элементов, приклеенных к светопроводящей пластине (как показано на двух левых изображениях рис. 7), либо с помощью голографического элемента, нанесенного на поверхность светопроводящей пластины. Далее световое излучение распространяется внутри светопроводящего слоя пластины до тех пор, пока оно не будет перенаправлено в глаз наблюдателя одним из возможных способов. На рис. 7 представлено три возможных способа вывода светового излучения. Начиная слева направо, это может быть силовой полупрозрачный рефлектор, встроенный в тело светопроводящей пластины. Этот рефлектор имеет спектрально-селективное отражение для узкого диапазона длин волн излучения микродисплея. Для всего остального широкого видимого спектрального диапазона данный рефлектор прозрачный и не мешает просмотру сквозь него. Поэтому, в отличие от системы, построенной на архитектуре “bird bath”, рефлектор не вносит никаких искажений в излучение, приходящее от реального мира и, кроме того, изображение дополненной реальности может располагаться в любой области поля зрения человека, включая его центральную часть. К основному недостатку такого типа решений можно отнести относительно небольшую область “eye box”, вызванную ограниченным размером рефлектора. Следующее решение повторяет предыдущее за исключением того, что вместо одного рефлектора появляется целый ряд небольших полупрозрачных рефлекторов, каждый из которых может сформировать изображение дополненной реальности. Все рефлекторы формируют одно и то же изображение, потому глаз может свободно перемещаться от одного микрорефлектора к другому и не чувствовать никакой разницы. Кроме того, поскольку зрачок человеческого глаза захватывает изображение сразу от ряда микрорефлекторов, коэффициенты отражения микрорефлекторов должны быть рассчитаны таким образом, чтобы видимая яркость микродисплея не зависела от того, через какой набор микрорефлекторов человек видит изображение. Такое распределение одного рефлектора на ряд микрорефлекторов позволяет повысить поле зрения системы и увеличить область “eye box”. И последнее решение основано на использовании свойств голографических структур (дифракционных решеток) по вводу и выводу светового излучения из волновода. Для ввода излучения, формируемого микродисплеем, используется высокочастотная дифракционная решетка (вместо призматического элемента, используемого в предыдущих решениях). Далее набор микрорефлекторов заменяется высокочастотной дифракционной решеткой с незначительной дифракционной эффективностью на отражение в первом дифракционном порядке и высокой дифракционной эффективностью в нулевом порядке. Данная дифракционная решетка работает аналогично набору микрорефлекторов, т.е. по всей своей поверхности перенаправляет

излучение микродисплея в глаз наблюдателя и одновременно пропускает излучение внешнего мира. Естественно, поле зрения и область “eye box” в данном решении выше, чем первом (с одиночным рефлектором).

Необходимо отметить, что в большинстве случаев системы дополненной реальности не являются стереоскопическими и дополнительное изображение может подаваться только на один глаз. Такое ограничение обуславливается как экономическими (нет необходимости формировать реалистичное стереоскопическое изображение для визуализации текстовой или символической информации), так и эксплуатационными соображениями (в тяжелых полевых условиях возможна вибрация и случайное дрожание / перекося изображения правого и левого глаза, что может привести к повышенной утомляемости оператора, использующего данное устройство). Формирование стереоскопического изображения является скорее прерогативой систем смешанной реальности.

Технология смешанной реальности предоставляет возможность совместить два визуальных мира: реальный и виртуальный [7, 8]. Несмотря на принципиальные отличия технологий дополненной и смешанной реальностей основные оптические схемы и решения, используемые в этих технологиях, в значительной степени повторяют друг друга. Основные отличия – это обязательная стереоскопичность оптической системы и «носимость» устройства смешанной реальности. Естественно, существует значительное отличие в программно-аппаратной начинке этих устройств.



<https://www.microsoft.com/en-us/hololens>

Рис. 8. Принцип работы устройства смешанной реальности

В системах смешанной реальности происходит совмещение изображений двух миров: реального и виртуального. Реальный и виртуальный миры визуализируются с помощью технологий дополненной реальности, которые позволяют совмещать изображения виртуального и реального миров, а синтезируется изображение виртуального мира с помощью технологий виртуальной реальности. Основная специфика, связанная с синтезом изображения виртуального мира, заключается в необходимости привязки его к реальному миру. При этом привязка должна быть как геометрической, т.е. все объекты виртуального мира должны находиться в рамках реального мира, так и оптической, когда оптические свойства реального мира воздействуют на видимость объектов виртуального мира и наоборот. Несогласованность между видимостью объектов реального и виртуального миров может вызывать дискомфорт зрительного восприятия.

Для устранения геометрической несогласованности необходимо определить геометрию окружающей сцены. Геометрия может быть определена заранее, например, геометрия помещения, где будет использоваться система смешанной реальности, а далее осуществляется привязка к реальной геометрии. Или геометрия может определяться в процессе использования системы смешанной реальности. Последний способ более дорогостоящий как со стороны компоновки системы дополнительными датчиками, так и со стороны необходимости дополнительной обработки информации с этих датчиков. Геометрия реальной сцены необходима не только для того, чтобы правильно вписать объекты виртуального мира в реальное пространство, например, нельзя увидеть виртуальный объект, расположенный за стеной, но и для того, чтобы правильно рассчитать освещение объектов виртуального мира и освещение объектов реального мира виртуальными источниками света.

Световая несогласованность между реальным и виртуальным мирами заключается в том, что реальный и виртуальный миры оказывают друг на друга непосредственное воздействие. Так, реальные источники света должны освещать виртуальные объекты, и наоборот, виртуальные объекты освещают реальный мир. Например, если геометрия и оптические свойства реального мира известны, то можно осветить его виртуальным источником света и свободно в нем перемещаться. Поэтому система смешанной реальности - это расширенная модель виртуальной реальности, в которой сцена состоит как из реальных, так и из виртуальных объектов. Неестественность восприятия заключается в том, что человеческий мозг находит несоответствия между тем, как он видит изображения виртуальных объектов, и тем, что он ожидает увидеть. Простейший пример такого несоответствия - это отсутствие отражения в зеркале. Например, если сцена содержит зеркало, и мы видим отражение ряда объектов в этом

зеркале, то отсутствие отражения у виртуального объекта выглядит неестественным. Другой пример – это ориентация теней на изображении. Если все объекты отбрасывают тень в одну сторону, а виртуальные – в другую (или вообще не отбрасывают тени), то изображение выглядит неестественным.

В ряде случаев оптические свойства объектов и параметры источников света реального мира неизвестны, и основная задача заключается в разработке алгоритмов и программных решений, позволяющих быстро и с высокой степенью точности определить параметры источников света и восстановить оптические свойства объектов сцены [9-13]. При наличии достоверной информации о геометрии сцены можно естественным образом вписать объекты виртуального мира в реальный мир.

## **2. Проблемы формирования изображения в системах виртуальной, дополненной и смешанной реальностей**

Для формирования естественного восприятия изображения виртуального мира должен быть выполнен ряд обязательных условий. Ряд этих условий вполне естественен и требует только упоминания. Во-первых, синтезированное изображение виртуального мира должно быть высокого качества и реалистичным. Первое говорит о том, что угловой размер пикселя экрана должен быть меньше углового разрешения человеческого глаза и наблюдатель не должен видеть отдельных пикселей, составляющих изображение объекта. На данный момент это требование едва ли выполнимо, поскольку для этого требуется микродисплей с разрешением 8К. Однако при ограниченном поле зрения, которое существует у большинства систем дополненной и смешанной реальностей, это требование может быть снижено до 4К или 2К, что уже вполне соответствует современным технологическим возможностям.

Второе немаловажное требование – это реализм синтезированного изображения. Современные технологии компьютерной графики не в состоянии обеспечить реализм изображения, синтезируемого в режиме реального времени. Компьютерная графика в состоянии синтезировать очень «красивые» изображения, но при этом они могут быть нереалистичными. Это связано со спецификой зрительного восприятия визуальных образов. Если у человека в голове хранится визуальный образ знакомого объекта, то незначительные отклонения изображения виртуального объекта от знакомого ему образа будут вызывать у него диссонанс, который в конечном итоге приводит к повышенной утомляемости восприятия виртуальной реальности. Это хорошо заметно при визуализации синтезированных изображений человеческих лиц, которые, в большинстве случаев, воспринимаются как искусственные, поскольку графика реального времени не в состоянии передать всех деталей человеческого лица. С другой стороны, человеческий мозг прекрасно воспринимает незнакомые ему объекты, что объясняется тем, что у него нет того объекта, с которым он мог бы провести сравнение и оценить достоверность изображения. Поэтому, если на одном кадре синтезировать изображение человека и изображение внеземного существа, то скорее всего человек будет восприниматься как кукла, а внеземное существо будет выглядеть «естественным» образом.

Важным фактором в формировании естественного восприятия является качество, с которым оптическая система передает изображение с микродисплея в глаз человека. Здесь необходимо отделять внешние характеристики оптической системы, такие как поле зрения и “eye box”, от



собственно качества, т.е. aberrаций оптической системы. Значительные aberrации оптической системы могут разрушить весь реализм, который был получен при синтезе изображения виртуального мира на микродисплее. В системах виртуальной реальности aberrации обуславливаются сочетанием двух факторов: небольшим размером зрачка глаза (порядка двух миллиметров) и большим полем зрения оптики, которое превышает  $100^\circ$ . Поэтому основными aberrациями в очулярах систем виртуальной реальности является дисторсия и хроматизм увеличения (хроматическая дисторсия) [14]. Левая часть рис. 9 иллюстрирует эффект геометрической и хроматической дисторсии очуляра.

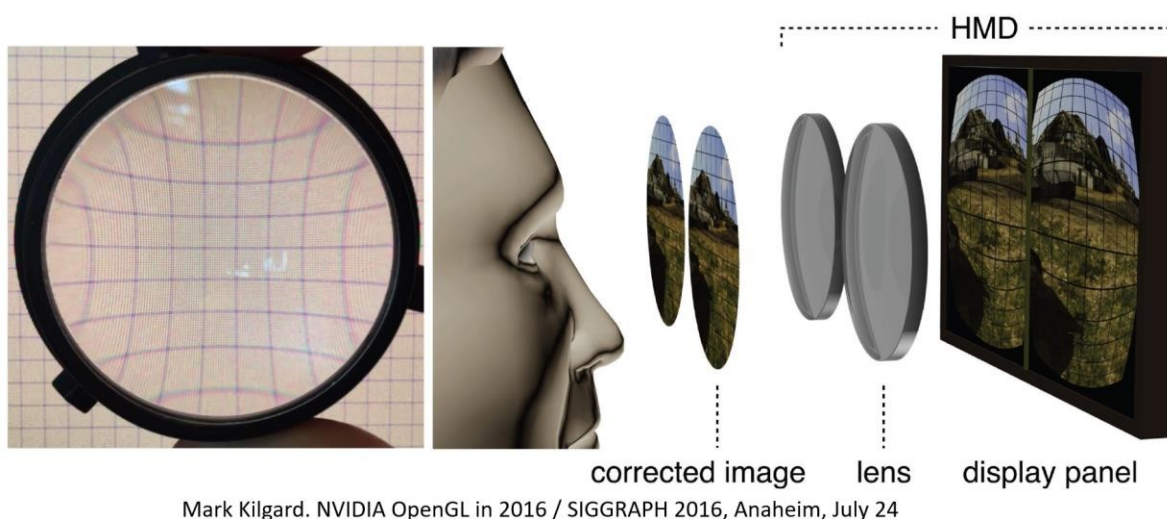


Рис. 9. Дисторсия и исправление дисторсии в очулярах систем виртуальной реальности

Эти две aberrации могут быть исправлены при синтезе изображения виртуальной реальности. Для коррекции дисторсии достаточно внести обратное дисторсионное искажение в изображение, формируемое на экране микродисплея. Правая часть рис. 9 показывает принцип коррекции дисторсии в системе виртуальной реальности.

Однако высокое качество оптики, реализм изображения виртуального мира и высокое разрешение микродисплея не в состоянии обеспечить естественность восприятия виртуального мира. Для естественности восприятия необходимо обеспечить согласование между вергенцией и аккомодацией глаз человека. Наибольшие проблемы в этом плане могут возникнуть у стереоскопических систем видео 360 [2]. В данных системах съемка одного участка сцены ведется парой сонаправленных камер, смещенных друг относительно друга на среднюю

величину межцентрового расстояния человеческих глаз. Это соответствует практической бесконечности при наблюдении реального мира. Рис.10 иллюстрирует процесс съемки и просмотра этого видео. При просмотре такого видео наблюдатель может комфортно воспринимать объекты, находящиеся на практической бесконечности. Если в поле зрения попал объект, находящийся вблизи камеры, то при попытке сконвертировать взгляд на этот объект, возникнет двоение изображения, поскольку направление съемки соответствовало бесконечно удаленному объекту. Данная проблема не может быть устранена в рамках просмотра видео 360 и поэтому возможная рекомендация по уменьшению влияния этой проблемы заключается в организации самой съемки без ближнего плана.

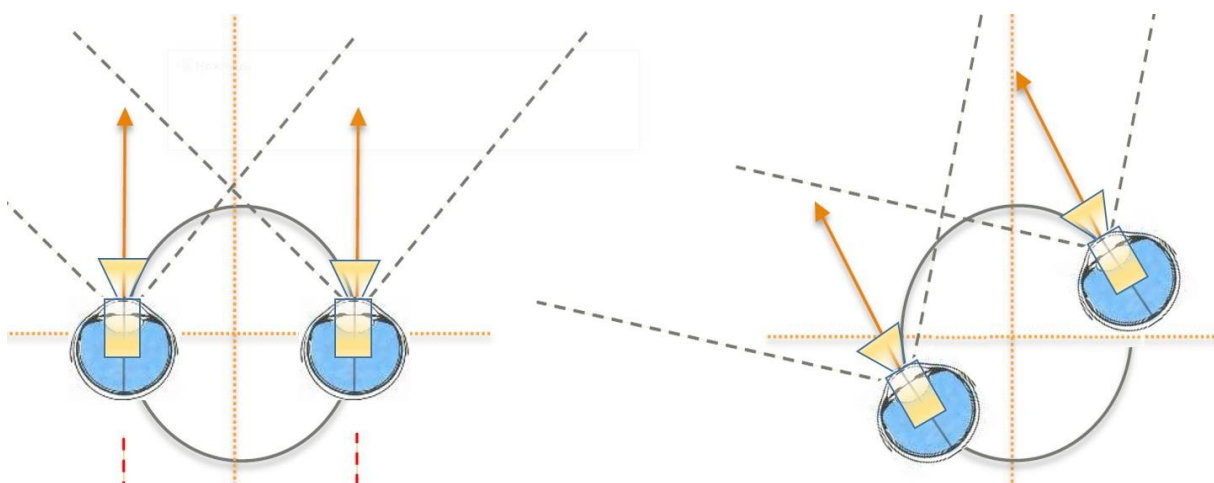


Рис. 10. Проблема конвергенции при съемке и просмотре видео 360

В системах виртуальной реальности данная проблема может быть частично решена. При изменении направления взгляда, т.е. при фокусировке взгляда на выбранный объект виртуального мира, необходимо тут же синтезировать два новых изображения виртуальной сцены, соответствующих направлению взгляда правого и левого глаза. Естественно, для синтеза новых изображений необходимо определить новое направление взгляда. Это положение определяется с помощью специальных устройств отслеживания положения зрачка (eye tracking).

Устройства отслеживания положения зрачка могут работать на различных принципах. Это могут быть контактные методы, когда на глаз надеваются контактные линзы со специальными зеркальными отражателями либо с миниатюрными излучателями магнитного поля. При этом оптические или магнитные датчики фиксируют изменения положения глаз. Кроме того, изменение положения зрачков глаз может фиксироваться специальными датчиками электрического поля, располагаемыми вокруг

глаз человека. Однако в системах виртуальной реальности нашло применение более простое бесконтактное решение. Это решение основано на ряде особенностей человеческого глаза. Во-первых, глаз не реагирует на ближнее инфракрасное излучение малой мощности, во-вторых, зрачок глаза бликует при освещении его по оси зрения (эффект красных глаз) и, в-третьих, при освещении глаза внеосевым пучком света блик от роговицы глаза смещается относительно блика от хрусталика глаза и это смещение определяет направление взгляда. На рис. 11 показан принцип работы системы отслеживания положения зрачка, основанный на анализе расхождения бликов от роговицы и хрусталика глаза при освещении его внеосевым источником ближнего инфракрасного света.

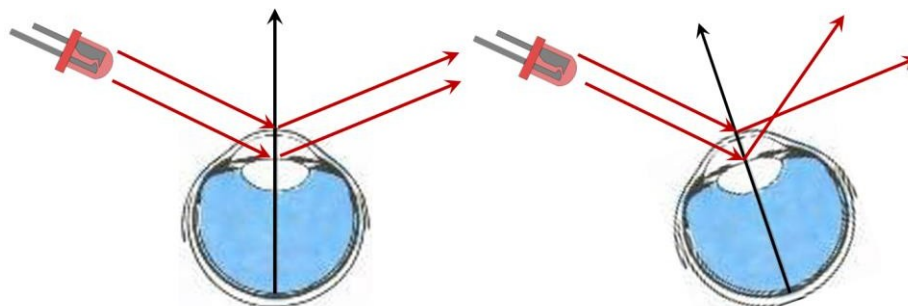


Рис. 11. Принцип работы системы отслеживания положения зрачка

Однако правильная ориентация камер соответствующих направлению взгляда левого и правого глаза, используемых при синтезе изображения реального мира, еще не является достаточным условием формирования естественного восприятия изображения виртуального мира. Достаточным условием является согласованность аккомодации и вергенции человеческого зрения [2]. Поэтому, когда человек смотрит на объект, он не только сводит направления взглядов левого и правого глаза на этом объекте, но и фокусируется на нем, т.е. сжимает или расслабляет хрусталик, для того, чтобы видеть этот объект максимально четко (при этом остальные объекты размываются). Рис. 12 иллюстрирует эффект аккомодации человеческого зрения.

Эффект размытия изображения, связанный с аккомодацией глаз, обуславливается конечным размером зрачка глаза. С оптической точки зрения глаз представляет собой фотографический объектив с переменным фокусным расстоянием. Он может фокусироваться на определенные объекты, но из-за конечного размера зрачка объекты, находящиеся вне плоскости фокусировки, размываются.

Величина размытия зависит от величины смещения объекта от плоскости фокусировки (дефокусировка) и от размера зрачка. Чем больше

дефокусировка и чем больше размер зрачка, тем больше размытие. Системы компьютерной графики, синтезирующие изображение виртуального мира, как правило используют модель идеальной точечной камеры с бесконечно малым размером зрачка, в результате чего они свободны от эффектов дефокусировки и размытия изображения. Если система компьютерной графики синтезирует изображение, сфокусированное на некоторую плоскость наблюдения, то изображение объектов, находящихся в этой плоскости будет четким.



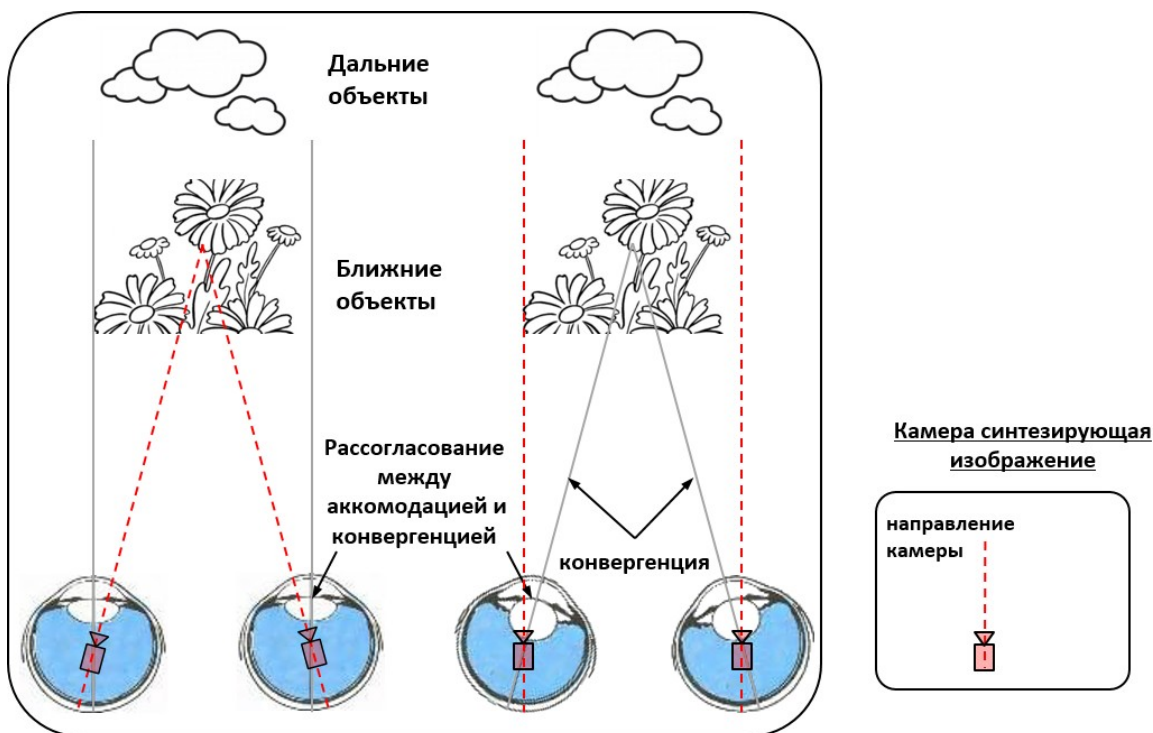
Karakoy Gulls by LASZLO ILYES (<https://flic.kr/p/738ydf>) / CC BY 2.0

Рис. 12. Эффект аккомодации человеческого зрения

Кроме того, для того, чтобы видеть это изображение четким, необходимо выполнить соответствующую диоптрийную подвижку окуляра, т.е. согласовать положение окуляра с текущей аккомодацией глаза. В этом случае изображение в плоскости наблюдения будет четким и выглядеть естественным образом. Однако изображение всех остальных объектов, находящихся вне этой плоскости, будет также четким. И это будет выглядеть неестественно и вызовет дискомфорт. Рис. 13 иллюстрирует этот эффект.

С другой стороны, отсутствие окулярной подвижки приведет к дефокусировке всего изображения, что также вызовет дискомфорт зрительного восприятия виртуального мира. Поэтому задача согласования

эффектов вергенции и аккомодации заключается в формировании такого изображения, которое было бы четким в плоскости конвергенции глаз человека и естественным образом дефокусировано (в соответствии с аккомодацией глаз) вне этой плоскости. Рис. 14 иллюстрирует процесс совмещения вергенции и аккомодации при формировании изображений для левого и правого глаза.



**Дискомфорт зрительного восприятия**

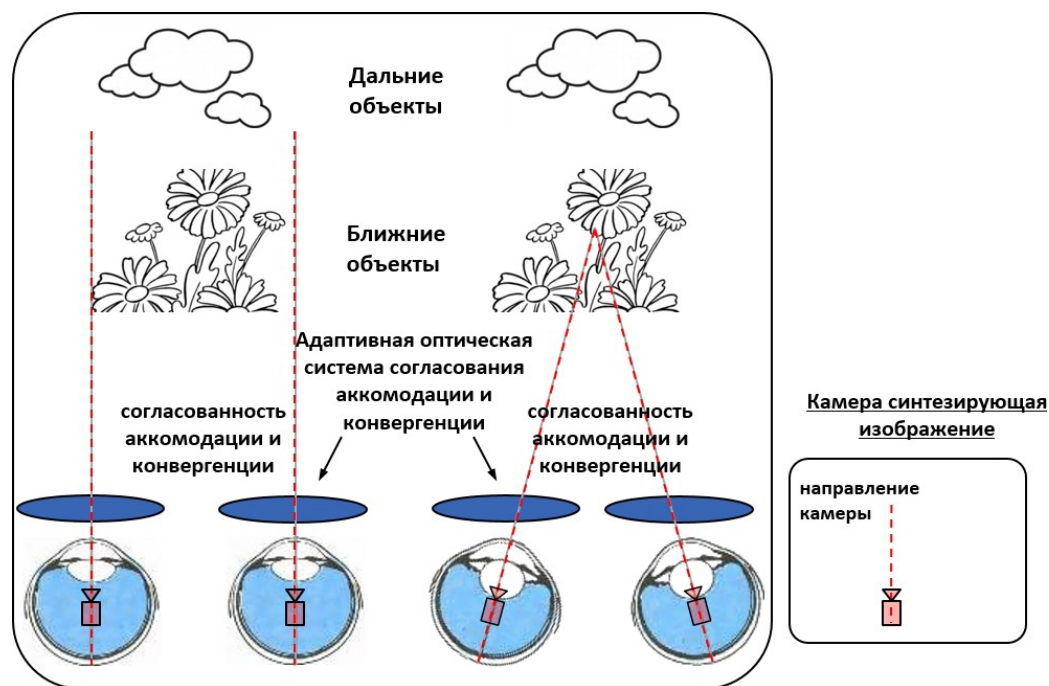
- Конвергенция глаз соответствует выбранной точки объекта
- Аккомодация глаз соответствует дистанции до изображения стереопары

Рис. 13. Эффект рассогласования аккомодации и вергенции человеческого зрения

Для решения проблемы согласования вергенции и аккомодации в изображении виртуального мира существует несколько путей [15-17]. Два основных пути, это либо формирование корректно дефокусированного изображения для окуляра с адаптивным фокусным расстоянием, либо преобразование плоского изображения на микродисплее в псевдообъемное с глубиной, соответствующей глубине сцены.

В первом случае моделируется эффект дефокусировки, вызываемой естественной аккомодацией человеческого зрения. Эффект дефокусировки представляет собой абберацию первого порядка и функцию рассеивания

точки в виде цилиндра, радиус которого пропорционален значению дефокусировки. Такой эффект дефокусировки может быть легко воспроизведен в любой системе компьютерной графики. Однако, для естественной визуализации дефокусированного изображения окуляр должен осуществить фокусировку на плоскость наблюдения в пространстве виртуальной сцены. Система фокусировки окуляра должна быть адаптивной и непосредственно связанной с системой трекинга зрачка. Изменение направления взгляда должно отслеживаться системой трекинга зрачка и автоматически фокусировать окуляр на новую плоскость наблюдения. При этом изображения для правого и левого глаза автоматически перестраиваются в соответствии с направлением наблюдения и фокусируются на текущую плоскость наблюдения. В результате дискомфорт восприятия виртуального мира пропадает. Единственная сложность предложенного решения заключается в том, что реализация адаптивной фокусировки окуляра представляет собой серьезную научно-техническую проблему, которая до сих пор еще не была решена.



Комфортное зрительное восприятие

Адаптивная оптическая система в реальном времени согласует аккомодацию с расстоянием до наблюдаемого объекта.

Рис. 14. Корректное совмещение вергенции и аккомодации при формировании изображений для левого и правого глаза

Преобразование плоского изображения на микродисплее в псевдообъемное с глубиной, соответствующей глубине сцены, также представляет собой серьезную научно-техническую проблему. Для решения этой проблемы используют различного рода модуляторы изображения. Модуляция изображения осуществляется следующим образом. Виртуальная сцена разбивается на ряд слоев, ортогональных направлению зрения и для каждого слоя строится собственное изображение. Затем модулятор изображает каждый слой со своим фазовым (пространственным) сдвигом. Если количество слоев достаточно большое, то человек видит практически объемное изображение с согласованной вергенцией и аккомодацией. Способы модуляции слоев могут сильно отличаться, например, механическая модуляция адаптивными зеркалами или жидкокристаллическими фазовыми матрицами.

Аберрации оптической системы и рассогласование вергенции и аккомодации не единственные эффекты, которые могут ухудшить восприятие виртуального мира. При построении изображения дополненной реальности в системах на шлемных индикаторах или индикаторах на лобовом стекле может возникнуть так называемый эффект рирпроекции [18]. Этот эффект возникает в случае замены излучающего микродисплея на жидкокристаллическую матрицу, отражающую или пропускающую излучение мощного источника света. Такие решения используются для обеспечения работы систем дополненной реальности в условиях мощного внешнего освещения. Например, дисплей дополненной реальности должен обеспечивать видимость информационных знаков и текста в условиях яркого солнечного освещения, когда солнце или яркая облачность находятся в поле зрения системы дополненной реальности. Как правило, микродисплей не в состоянии обеспечить требуемую яркость формируемого изображения. Рис. 15 иллюстрирует принцип работы проекционного устройства дополненной реальности. Осветительная оптика собирает излучение мощного источника квазимонохроматического поляризованного света и равномерно распределяет его на поверхности жидкокристаллической матрицы, формирующей изображение дополненной реальности. Далее проекционный объектив переносит изображение с жидкокристаллической матрицы на диффузор, совпадающий с плоскостью промежуточного изображения. И наконец, наблюдатель рассматривает изображение, сформированное на диффузном экране с помощью коллимационной линзы (лупы) и полупрозрачного комбинера, который отражает узкое спектральное излучение, идущее от источника света и пропускает излучение в широком спектральном диапазоне от внешнего реального окружения.

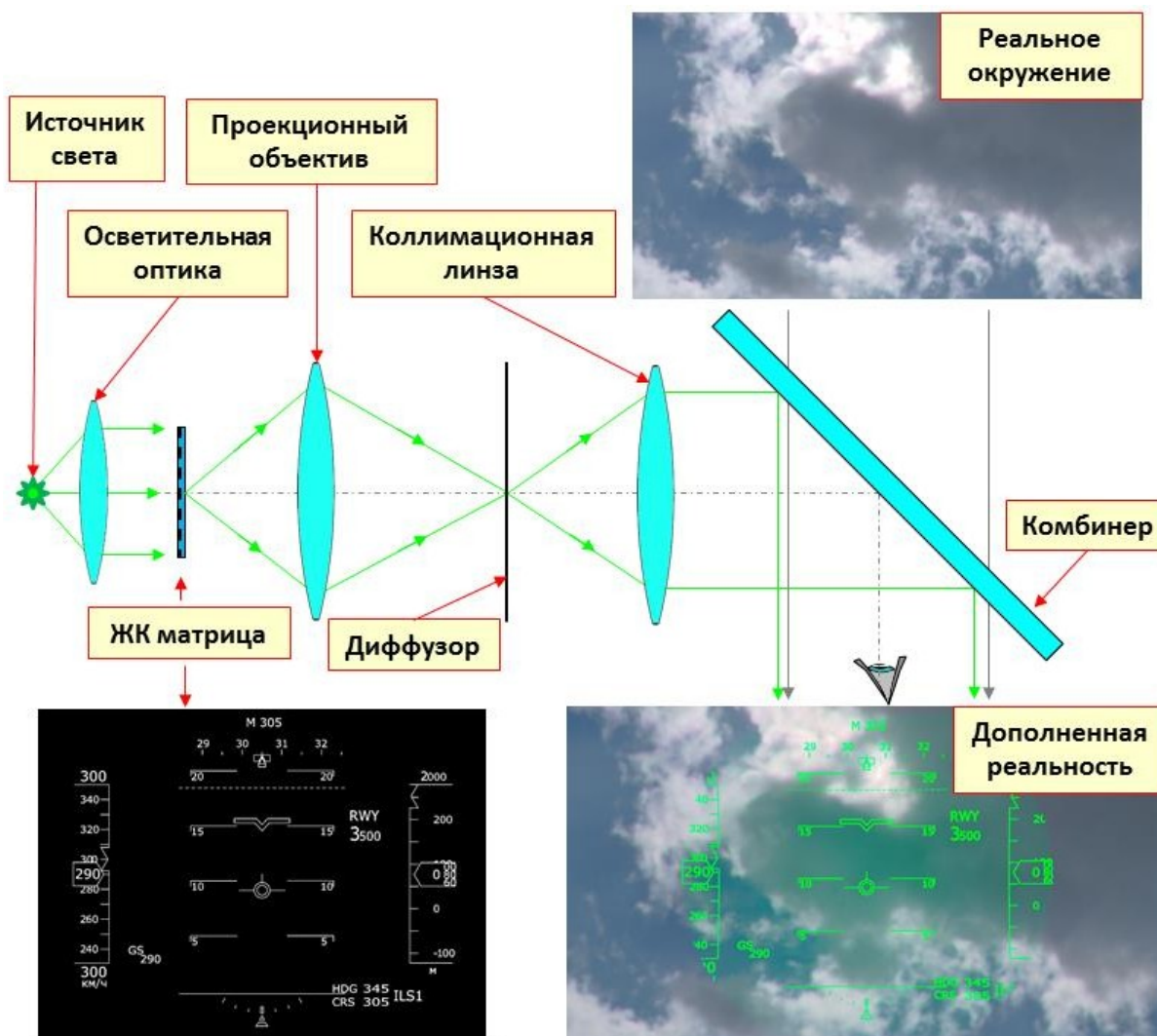


Рис. 15. Принципиальная схема работы проекционного устройства дополненной реальности

Основной недостаток данной схемы заключается в том, что жидкокристаллическая матрица не является абсолютно непрозрачной для черного цвета. Поэтому часть светового излучения, которое не должна была пропустить жидкокристаллическая матрица, проходит и изображается в виде светлого ореола на фоне информации дополненной реальности. Несмотря на то, что пропускание матрицы в непрозрачной области незначительно (порядка  $1/300$ ), светлый ореол может выглядеть очень ярким. Его яркость зависит от адаптации глаза к среднему уровню яркости видимого пространства. Если пространство темное, то ореол визуально выглядит очень ярким, хотя его реальная яркость в 300 раз ниже яркости полезной информации. Рис. 16 иллюстрирует этот эффект.



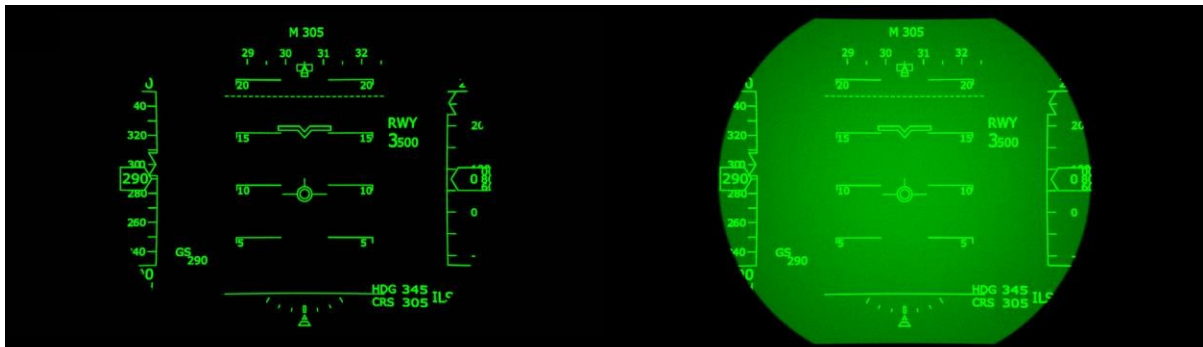


Рис. 16. Изображения, видимые на индикаторе на лобовом стекле в тестовых условиях

На левой части рис. 16 представлено изображение, видимое на индикаторе на лобовом стекле в случае использования жидкокристаллической матрицы с абсолютным контрастом. На правой части рис. 16 представлено аналогичное изображение, полученное при контрасте жидкокристаллической матрицы равным  $1/300$ . Оба изображения были построены на черном фоне с одинаковыми параметрами световой адаптации глаз.

Для комфортного визуального анализа окружающей обстановки и информации, выдаваемой на лобовое стекло, необходимо выполнение двух основных условий. Во-первых, вся информация выводимая на лобовое стекло, должна легко различаться на фоне окружающей обстановки, во-вторых, ложный ореол должен быть невидим или, по крайней мере, не закрывать полезную информацию об окружающей обстановке. Для этого мощность источника излучения должна выбираться исходя из средней яркости окружающего пространства и параметров световой адаптации глаза. Рис. 17 иллюстрирует возможность выбора мощности источника излучения таким образом, что ореол полностью становится невидим.



Рис. 17. Изображения, видимые на индикаторе на лобовом стекле в реальных условиях

Левая и правая части рис. 17 были получены при одинаковых параметрах световой адаптации глаза. На левой части рисунка ореол хорошо виден, а на правой части, после снижения мощности источника света ореол пропал, хотя визуальный контраст дополнительной информации практически сохранился. Адаптация мощности источника света может происходить автоматическим образом (например, в результате анализа датчиков яркости) или вручную по результатам визуального контроля.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Steven M. LaValle. VIRTUAL REALITY, University of Illinois, Cambridge University Press, Copyright Steven M. LaValle, 2017, URL: <http://vr.cs.uiuc.edu>
2. Gordon Wetzstein. A personalized VR/AR system that adapts to the user is crucial to deliver the best possible experience // The BRIDGE, Vol. 46, No. 4, Winter 2016
3. Tapani Levola. “Diffractive optics for virtual displays” // SID (Society for Image Display), 14/5, 2006
4. Walter Galan, Oculus Rift Development Kit 2 Teardown. URL: <https://www.ifixit.com/Teardown/Oculus+Rift+Development+Kit+2+Teardown/27613>
5. Head-up displays. URL: <http://continental-head-up-display.com/#head-up>
6. Ashok Sisodia, Michael Bayer, Paul Townley-Smith, Brian Nash, Jay Little, William Cassarly, Anurag Gupta. Advanced Helmet Mounted Display (AHMD) // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, May 2007
7. Hololens reference. URL: <https://www.microsoft.com/en-us/hololens>
8. Meta2 reference. URL: <http://www.metavision.com/>
9. Claus B Madsen, Rune Laursen. A scalable GPU-based approach to shading and shadowing for shotorealistic real-time augmented reality // International Conference on Graphics Theory and Applications, 2007: 252-261.
10. Liangliang Nan, Ke Xie, Andrei Sharf. A Search-Classify Approach for Cluttered Indoor Scene Understanding / ACM. 2014
11. Zhou Ya, YAN Lei, ZHAO Hu. Study on the Lighting Model of the Real World in Augmented Reality // Journal of Image and Graphics, 2004, 9(8):968-971.
12. Feng Yan. Research on Seamless Fusion of Real and Virtual Scenes in Augmented Reality System // Shanghai University, 2007.
13. Xu-yang Wang; Dmitry D. Zhdanov; Igor S. Potemin; Ying Wang and Han Cheng. The efficient model to define a single light source position by use of high dynamic range image of 3D scene // *Proc. SPIE* 10020, Optoelectronic Imaging and Multimedia Technology IV, 100200I (October 31, 2016)
14. Mark Kilgard. NVIDIA OpenGL in 2016 / SIGGRAPH 2016, Anaheim, July 24

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение в технологии виртуальной, дополненной и смешанной реальностей.....	3
Проблемы формирования изображения в системах виртуальной, дополненной и смешанной реальностей.....	16
Библиографический список.....	27

# **ТЕОРИЯ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к выполнению самостоятельных работ  
для обучающихся по направлению 54.03.01 «Дизайн»  
(профиль «Промышленный дизайн») всех форм обучения

## **Составители:**

**Кузовкин Алексей Викторович**  
**Суворов Александр Петрович**  
**Золототрубова Юлия Сергеевна**

Издается в авторской редакции

Подписано в печать 15.11.2021.

Уч.-изд. л. 1,8.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
396026 Воронеж, Московский просп., 14