

# ТРЕХМЕРНЫЕ ДИСПЛЕИ: ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СУЩНОСТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Ежов В.А., ИОФРАН

**Аннотация.** Все технические решения в сфере трехмерных (3Д) дисплеев классифицированы по двум фундаментальным физическим критериям – по характеру и по размерности информационного светового потока (пространственного распределения света), создаваемого в рабочей среде 3Д дисплея. Критерии выбраны с учетом психофизиологических свойств трехмерного зрения человека. Свойства полученных 4-х физических классов позволяют объективно оценить реализуемость и перспективность любого технического решения по 3Д дисплеям (для прогнозируемого уровня техники на ближайших 10-20 лет).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Трехмерные (3Д) дисплеи принципиально отличаются от 2Д (моноскопических) дисплеев представлением объективной информации о глубине отображаемой 3Д сцены, однозначно воспринимаемой бинокулярным зрением человека (см. раздел 2.2).

Под термином «трехмерный дисплей» («3Д дисплей») подразумевается информационный 3Д дисплей, отображающий 3Д сцены с надлежащим информационным качеством (с надлежащим пространственным разрешением, цветовыми характеристиками и другими важными параметрами, не уступающими в идеале соответствующим параметрам современных 2Д дисплеев). Краеугольным камнем 3Д дисплея является рабочая среда, в реальном времени создающая информационный световой поток и снабженная электронным входом, поскольку практически все современные источники информации о реальных или виртуальных (синтезированных на компьютере) 3Д сценах генерируют электронные выходные сигналы.

## 2. 3Д ЗРЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА И ФИЗИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ КЛАССИФИКАЦИИ

### 2.1. Характер светового распределения, способного представлять 3Д сцены

Произвольный объект наблюдаемой 3Д сцены можно представить совокупностью  $S$  точечных

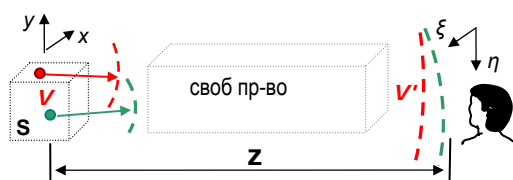


Рис.1 Оптическая схема наблюдения 3Д сцены

источников света (рис.1), которые порождают световое распределение  $V$ , распространяющееся в качестве оптической волны через слой (объем) свободного пространства протяженностью  $Z$  и достигающее глаз наблюдателя в форме светового распределения  $V'$ , которое связано с распределением  $V$  известной интегральной формулой Френеля-Кирхгофа (1).

Зрение человека воспринимает световое распределение  $V'$ , по результатам этого восприятия в сознании человека формируется виртуальный образ 3Д сцены, т.е. восстановленное в виртуальном виде распределение  $V$ .

$$V'(\xi, \eta) \cong \frac{\exp(ikZ)}{Z} \iint_{\infty} V(x, y) \exp\left\{\frac{ik}{2Z} [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]\right\} dx dy \quad (1)$$

Для элементарного 3Д объекта в виде одиночного точечного источника света с координатами  $(x_0, y_0)$  соответствующее световое распределение  $V$  выражается дельта-функцией  $\delta(x_0, y_0)$  (2), подстановка которой в (1)

$$\delta(x, y) = \infty \text{ at } x = x_0; \quad \delta(x, y) = 0 \text{ at } x \neq x_0; \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(x, y) = 1 \quad (2)$$

дает поступающее в глаза наблюдателя световое распределение  $V'_0(\xi, \eta)$  (3) в форме сферической волны, радиус кривизны которой несет информацию о расстоянии  $Z$  от наблюдателя до данного источника, интенсивность которой пропорциональна интенсивности источника и обратно пропорциональна расстоянию  $Z$ , а угол наклона фронта сферической волны (относительно уровня расположения глаз наблюдателя) определяется координатами  $(x_0, y_0)$  источника. Произвольная 3Д сцена, представ-

$$V'_0(\xi, \eta) \cong \frac{\exp(ikZ)}{Z} \exp\left[ik \left(\frac{x_0^2 \xi^2 + y_0^2 \eta^2}{2Z}\right)\right] \quad (3)$$

Произвольная 3Д сцена, представ-

ленная суперпозицией точечных источников света, воспринимается зрением в форме углового спектра сферических волн (1), который можно обозначить как френелевский пространственный спектр (или кратко – френелевский спектр).

Рассмотрим, по каким признакам зрение человека распознает 3Д сцену.

## 2.2. Основные свойства 3Д зрения человека

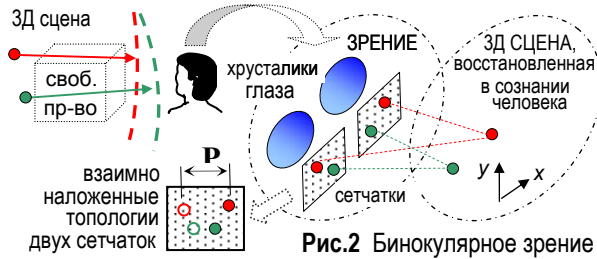


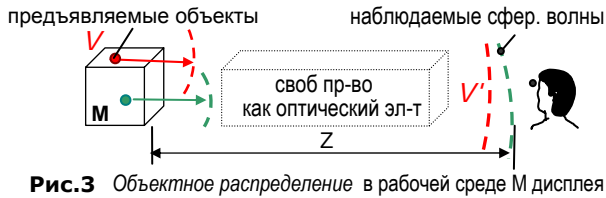
Рис.2 Бинокулярное зрение

В «аппарате» зрения человека отсутствует прямой трехкоординатный анализатор световых распределений. Глаза воспринимают совокупность сферических волн, трактуемые зрением как «размытые» действием свободного пространства точечные источники света, над которыми проводится операция сжатия (обратную «размывающему» действию свободного пространства) хрусталиками

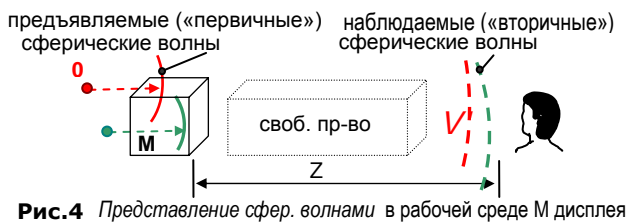
глаз, фокусирующими («сжимающими») световые источники на поверхности сетчатки, формируя тем самым информацию о 3Д сцене в виде пары ее плоских (двумерных) проекций (рис.2) для последующего анализа сознанием (мозгом) человека. Глубина 3Д сцены «вычисляется» мозгом по геометрическим различиям между этими плоскими проекциями, и итоговая 3Д сцена возникает в виртуальном виде в сознании человека. В этом суть **бинокулярного зрения**, являющегося основой трехмерного видения человека.

**ПЕРВЫЙ КРИТЕРИЙ КЛАССИФИКАЦИИ.** Зрение человека успешно распознает 3Д сцену по результатам восприятия светового распределения  $V'$ , если в рабочей среде 3Д дисплея световое распределение  $V$  представляет 3Д сцену следующим образом:

- **объектное** представление или
- представление **френелевским спектром** (представление **сферическими волнами**).



*Объектное* представление 3Д сцены есть представление «по точкам» объектов этой сцены в световом распределении  $V(x,y)$ , порождаемым рабочей средой М (рис.3). В этом случае зрение воспринимает совокупность сферических волн  $V'$ .



Представление 3Д сцены *френелевским спектром* есть представление этой сцены в рабочей среде М *сферическими волнами* (назовем их «первичными»), которые после прохождения слоя Z пространства воспринимаются зрением в форме «вторичных» волн (рис. 4). Как «первичные», так и «вторичные» сферические волны описываются формулой (1), представляющей

пространственный угловой спектр  $V(\xi, \eta)$  сферических волн, представляющих 3Д сцену посредством френелевской дифракции.

Рассмотрим требуемую **размерность** светового распределения, формируемого в рабочей среде М дисплея, т.е. число пространственных координат, необходимых для описания этого распределения.

**ВТОРОЙ КРИТЕРИЙ КЛАССИФИКАЦИИ.** Формируемое в рабочей среде 3Д дисплея световое распределение может быть: • **трехкоординатным** (3Д) или • **двухкоординатным** (2Д).

Способность *трехкоординатного* (3Д) светового распределения самостоятельно представлять 3Д сцену очевидна. Способность *двухкоординатного* (2Д) светового распределения самостоятельно представлять 3Д сцену вытекает из свойств бинокулярного зрения человека (см. раздел 2.2).

Рассмотрим, есть ли смысл выделять *однокоординатное* (1Д) световое распределение как самостоятельное в данной классификации. Одномерное световое распределение само по себе не

способно представить полноценную информацию обо всех трех координатах 3Д сцены, но его возможно использовать в 3Д дисплее за счет использования свойства кратковременной памяти зрения человека, которое способно объединять в единую 2Д картину ряд предъявляемых (последовательно во времени) 1Д световых распределений, если частота предъявления не ниже некоторой критической частоты  $F_{\min} = 9,6 \lg(E+2,3)$ , где  $E$  – световая экспозиция глаз (световой поток в люксах). Поэтому всегда использование 1Д световых распределений сводится к формированию эквивалентных 2Д световых распределений на сетчатках глаза или на промежуточных экранах (характеризующихся свойством кратковременной памяти), следовательно, 1Д световое распределение не имеет смысла выделять как самостоятельный параметр классификации.

**Условие комфортного восприятия 3Д изображений.** 3Д дисплей должен обеспечивать условия комфортного наблюдения отображаемых 3Д сцен (как при наблюдении натуральных сцен в природе). Зрение человека характеризуется двумя психофизиологическими свойствами - аккомодацией и конвергенцией - которые должны быть взаимно согласованы при наблюдении сцен (рис.5). Аккомодация есть фокусировка хрусталиков глаз на наблюдаемом объекте (точке 0) за счет усилий глазных мышц хрусталика (условно поверхность фокусировки обозначена как 1). Конвергенция есть пересечение зрительных осей 2 и 3 глаз на наблюдаемом объекте за счет соответствующего поворота глаз. Согласование аккомодации и конвергенции означает пересечение поверхности 1 и осей 2, 3 в одной и той же точке 0 пространства. Отсутствие указанного согласования может вызвать дискомфорт зрения.

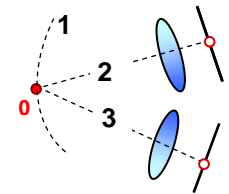


Рис.5 Аккомодация и конвергенция

### 2.3. Дополнительные свойства 3Д зрения человека

Ряд вспомогательных механизмов зрения помогает бинокулярному зрению в получении более реалистичного восприятия 3Д сцен и в однозначном распознавании протяженности 3Д сцен в «трудных» случаях. Создание конкурентноспособных 3Д дисплеев с высокой верностью воспроизведения невозможно без учета всех существенных для решаемой задачи свойств 3Д зрения человека.

#### Разрешение глаза и угловые характеристики восприятия объема.

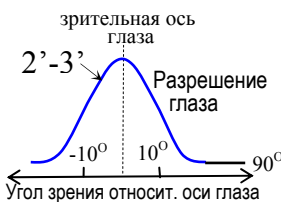


Рис.6

Приближенная зависимость разрешения глаза от угла восприятия относительно зрительной оси глаза показана на рис.6. Максимальное разрешение (несколько угловых минут) характерно только для центрального ( $20^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ) углового поля зрения (УПЗ). Полное суммарное УПЗ двух глаз составляет около  $180^{\circ}$  по горизонтали и  $135^{\circ}$  по вертикали, однако УПЗ восприятия объемного изображения составляет  $120^{\circ} \times 135^{\circ}$  ( $120^{\circ}$  есть общая область УПЗ для обоих глаз). Размер зрачка глаза колеблется в среднем от 2 до 8 мм в зависимости от освещенности сцены.

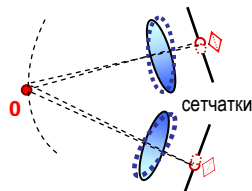


Рис.7

**Саккады.** Интересным психофизиологическим свойством зрения человека являются *саккады* – произвольные микродвижения глаз в процессе рассматривания объектов сцены. Основное назначение саккад – обеспечить биохимическое функционирование оптических рецепторов сетчатки, которые в случае *непрерывного* светового потока теряют чувствительность (перестают воспринимать свет). Присутствие саккад вводит временную модуляцию в интенсивность светового потока для каждого из

рецепторов, предотвращая тем самым потерю чувствительности рецепторов даже в случае полностью неподвижных наблюдателя и воспринимаемого им визуального объекта. Наличие саккад, как полагает ряд исследователей, является важным также и для формирования натуральности, «живости» наблюдаемых 3Д сцен, поскольку микродвижения глаз приводят к соответствующим микроизменениям в угле зрения на наблюдаемый объект 0 (рис. 7), что позволяет глазам всегда оглядывать объект со «слегка» разных позиций.

**Прочие свойства 3Д зрения.** Существует ряд *семантических* признаков изображения, по которым сознание человека способно распознавать протяженность наблюдаемых 3Д сцен, например, перекрытие (occlusion) дальних объектов непрозрачными ближними, линейная и воздушная перспектива сцены, параллакс вследствие движения (motion parallax) объектов, взаимное затемнение, изменение контраста, цветового тона (chromostereopsis) и степени размытости текстуры

(texture gradient) объектов в зависимости от их удаленности. Изображение 3Д сцены, формируемое дисплеем, должно быть противоречивым, указывая на несоответствие кадрам в реальном случае 3Д дисплей не будет конкурентноспособным по реалистичности отображения.

### 3. ТЕХНИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ КАЖДОГО КЛАССА 3Д ДИСПЛЕЕВ

В соответствии с двумя рассмотренными критериями образуются 4 класса 3Д дисплеев:

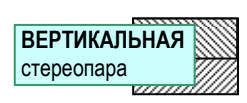

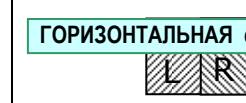




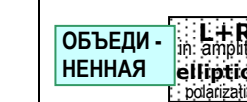
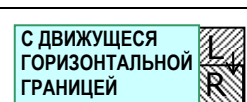
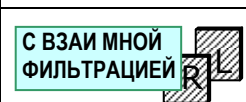
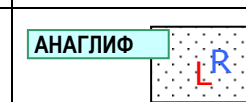

1. Класс «**Объектное двухкоординатное** представление».
2. Класс «**Объектное трехкоординатное** представление».
3. Класс «**Двухкоординатное** представление **френелевским спектром**».
4. Класс «**Трехкоординатное** представление **френелевским спектром**».

#### 3.1. Класс «Объектное двухкоординатное представление» (содержит все СТЕРЕОСКОПИЧЕСКИЕ дисплеи)

Если каждому из глаз человека порознь предъявлять левый L и правый R ракурс 3Д сцены (в форме левого и правого 2Д изображения), то в силу свойств бинокулярного зрения в сознании человека возникнет виртуальный трехмерный образ указанной сцены. Такие 3Д дисплеи принято именовать *стереоскопическими*.

В Табл. 1 приведена субклассификация стереоскопических дисплеев в соответствии с форматами (топологией) представления на экране 2Д изображений левого L и правого R ракурсов.

**Табл.1** Стереоскопические форматы

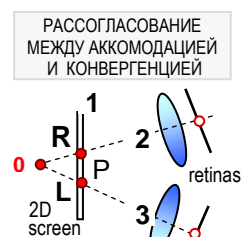
 <b>ВЕРТИКАЛЬНАЯ</b> стереопара <b>ВС</b>	 <b>ПОПЕРЕМЕННАЯ</b> ст. <b>ПС</b>	 <b>ГОРИЗОНТАЛЬНАЯ</b> ст. <b>ГС</b>	 <b>ЧЕРЕССТРОЧНАЯ</b> совмест. стереопара <b>ЧСС</b>
 <b>ЧЕРЕССТРОЧНАЯ</b> попеременная ст. <b>ЧПС</b>	 <b>МАТРИЧНАЯ</b> стереопара <b>МС</b>	 <b>С ВЗАИМНЫМ</b> наложением <b>ВНС</b>	 <b>ОБЪЕДИ-</b> <b>НЕННАЯ</b> <b>ОС</b>
 <b>С ДВИЖУЩЕЙСЯ</b> горизонтальной границей <b>ДГС</b>	 <b>С ВЗАИМНОЙ</b> фильтрацией <b>ВФС</b>	 <b>АНАГЛИФ</b> <b>АС</b>	 <b>ПОПЕРЕМЕННЫЙ АНАГЛИФ</b> <b>ПАС</b>

Присутствие в ячейке таблицы двух кадров означает разную топологию представления в двух соседних кадрах (полях) изображения на экране. Справа – аббревиатура названия формата.

Английские аналоги названий форматов стереопар: вертикальная – over/under (above/below), попеременная – alternating (устар. – page-flipping), горизонтальная – side-by-side, *чересстрочная совместная* – interleaved, *чересстрочная попеременная* – interlaced, *матричная (мозаичная)* – matrix (mosaic), *с взаимным наложением* – mutually imposed, *объединенная* – joint, *с подвижной (движущейся) границей* – moving boundary, *с взаимной фильтрацией* – mutual filtering, анаглиф – anaglyph, *попеременный анаглиф* – alternating anaglyph. Курсивом помечены термины (сочетания терминов), впервые введенные автором данной статьи.

**Достоинства объектного двумерного представления (стереоскопических дисплеев).** □ наивысшая совместимость с стандартными 2Д дисплеями, источниками видеосигнала (видеокамерами, компьютерами) и каналами связи, □ наивысшая функциональная гибкость, включая возможность создания панорамных 3Д дисплеев, позволяющих наблюдателю «погрузиться» в наблюдаемую сцену, в том числе адаптивных систем (сочетание высокоразрешающей центральной зоны отображения, положение которой отслеживает направление взора, с низкоразрешающей периферийной зоной, что отвечает кривой разрешения глаза и позволяет минимизировать полосу частот пропускания электроники дисплея практически без ущерба для качества изображения).

**Недостатки.** □ рассогласование между аккомодацией и конвергенцией зрения (рис.9), поскольку аккомодация (фокусировка) глаз осуществляется на плоскости 1 расположения левого L и правого R ракурсов, представляющих точку 0, а конвергенция зрительных осей 2, 3 глаз осуществляется в области пространства за экраном в виртуальной точке 0.

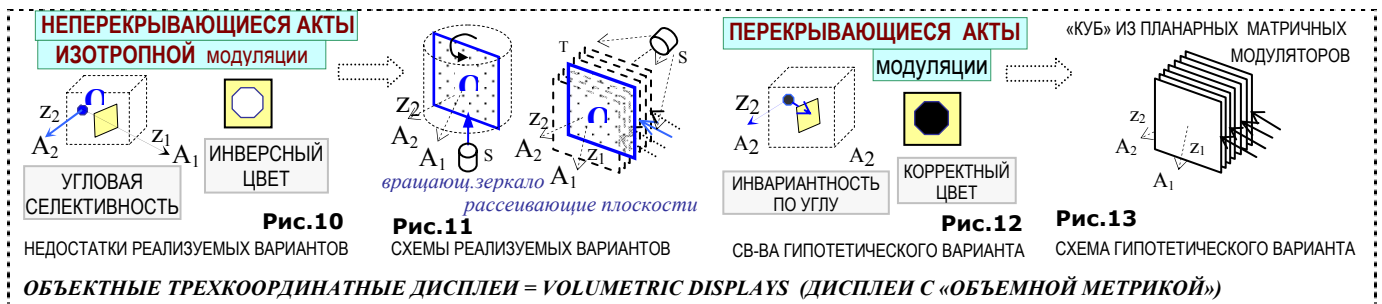


**Fig.9** Недостаток стереоскопических дисплеев

Минимизация рассогласования осуществляется минимизацией величины параллакса Р, увеличением расстояния наблюдателя от экрана, а также применением различных корректирующих оптических элементов (например, сферического зеркала).

### 3.2. Класс «Объектное трехкоординатное представление» (содержит дисплеи «с объемной метрикой» - volumetric displays)

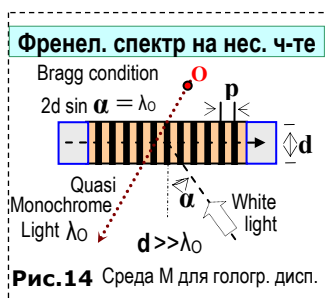
Субклассификация технических решений по световым распределениям с *неперекрывающимися* во времени (*последовательными*) и *перекрывающимися* во времени (*одновременными*) элементарными актами модуляции света в трехмерном пространстве рабочей среды иллюстрируется рис. 10-13.



**Достоинства объектного трехкоординатного представления.** □ аккомодация согласована с конвергенцией. **Недостатки реализуемых вариантов (рис. 10-11).** □ строгая угловая селективность, не позволяющая осуществлять «круговой осмотр» произвольного изображения («круговой осмотр» возможен только для «каркасных» или совершенно прозрачных объектов), □ инверсность цветовой характеристики (обусловленная аддитивным характером смешения цветов вместо необходимого в данном случае субтрактивного), □ очень высокая требуемая полоса частот сигнала (около 10 Gbit/s) для реализации 3Д сцен даже с умеренным разрешением. Вариант без таких недостатков (рис. 12-13) нереализуем в обозримом будущем из-за крайне высоких световых потерь, множества переотражений и сложности реализации изотропной по углу модуляции.

### 3.2. Классы «Двух- и трехкоординатное представление френелевским спектром» (содержит ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ дисплеи)

На существующем уровне техники только голографическими методами можно «запоминать» и воспроизводить оптические сферические волны, представляющие 3Д сцены. Достоинство: наиболее высокое потенциальное качество отображения трехмерных сцен по сравнению с другими вариантами дисплеев, включая возможность задействования саккад для повышения реалистичности восприятия из-за высокой угловой плотности ракурсов, воспроизводимой голограммой. Однако присущая голограмме многоракурсность (с практически непрерывным угловым спектром ракурсов) вызывает необходимость применять электрически адресуемую рабочую среду с разрешением в несколько тысяч лин/мм, работающую в реальном времени.



В настоящее время для реализации прототипов голографических дисплеев могут быть использованы только одноканальные акустооптические модуляторы (АОМ), работающие в режиме высокоэффективной (многие десятки процентов) дифракции Брэгга, реализующие «бегущие» голограммы Денисюка (рис.14) с полосой частот электронного сигнала 10-20 ГГц, при этом величина рабочей апертуры таких АОМ ограничена величиной порядка тысячи пикселей из-за сильного затухания акустических волн на таких высоких частотах. Проблемой является чрезмерная громоздкость оптических схем, необходимых для информативного отображения 3Д сцен одноканальными АОМ, особенно в цветном варианте.

Методы *нелинейно-оптической* динамической голографии крайне проблематично использовать для создания 3Д дисплеев в силу малой оптической эффективности (проценты-доли процентов) нелинейно-оптических эффектов при крайней сложности создания информативного устройства (только простые визуальные эффекты продемонстрированы в данном случае).

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Краткие физические имена-идентификаторы предложенных классов по 3Д дисплеям и входящие в эти классы традиционно-именованные виды 3Д дисплеев сведены в табл. 1.

Табл.1. Краткие наименования классов

<b>Физическое наименование класса дисплеев</b>	<b>Традиционные названия 3Д дисплеев</b>
Объектно-двухкоординатные (ОД) дисплеи	Стереоскопические дисплеи
Объектно-трехкоординатные (ОТ) дисплеи	Дисплеи с «объемной метрикой» (volumetric displays)
Дисплеи с двухкоординатным френелевским спектром (ДФС)	Дисплеи с динамической планарной («тонкослойной») голограммой
Дисплеи с трехкоординатным френелевским спектром (ТФС)	Дисплеи с динамической объемной («толстослойной») голограммой

Любое техническое решение по 3Д дисплеям может быть либо целиком отнесено к одному из указанных 4-х классов, либо подобно вектору «разложено» на компоненты по указанным классам как по координатам.

В результате обеспечивается объективная однозначная идентификация технической сущности любого 3Д дисплея независимо от субъективных точек зрения или исторически-сложившихся определений-названий, некоторые из которых безнадежно устарели. Например, определение «volumetric display» (дисплей с «объемной метрикой») в настоящее время являются физически неопределенным (некорректным), поскольку свойство «объемная метрика» можно отнести к размерности как рабочей среды дисплея, так и к формируемому им изображению или даже к изображению, восстанавливаемому в сознании наблюдателя (тогда все 3Д дисплеи характеризуются упомянутой метрикой). Определение «стереоскопический дисплей» оправданно только с исторической точки зрения, а с позиции физической сущности может вызвать путаницу, например, когда ряд исследователей принимает решение именовать бинокулярное зрение стереоскопическим, тогда с этой точки зрения любые 3Д дисплеи (в том числе голографические) «станут» стереоскопическими (поскольку любой 3Д дисплей создает изображение с обязательным использованием бинокулярного зрения). Определение «голографический дисплей» продолжает оставаться достаточно однозначным и корректным, однако оно является более узким, чем «дисплей с френелевским спектром», поскольку в будущем не исключено возможное изобретение *неголографических* методов записи-восстановления углового спектра волн, представляющего 3Д сцену.