

Условия воспроизведения высококачественных изображений в стереоскопическом кинематографе

Г.В. Мамчев

Установлена зависимость между допустимой глубиной рассматриваемых физических объектов и необходимыми геометрическими размерами стереоскопических изображений. Показана целесообразность использования одного видеопроектора.

Ключевые слова: бинокулярный параллакс, плоскости конвергенции и аккомодации, глубина наблюдаемого пространства, геометрические размеры стереоизображений.

1. Введение

Стремление к наиболее естественному воспроизведению всего им виденного заложено в самой природе человека.

Вопросы трёхмерного восприятия реальных предметов интересовали людей ещё в глубокой древности. История свидетельствует, что первые попытки разгадать механизм объёмного зрения были предприняты ещё в III веке до Нашей эры древнегреческим математиком Евклидом. В XV веке стереоскопическим эффектом интересовался великий итальянский художник и учёный эпохи Возрождения Леонардо да Винчи. Однако наиболее правильное научное объяснение свойству зрения видеть мир трёхмерным было высказано итальянским учёным де ла Порта в 1593 году. Он установил, что каждый глаз человека видит своё, несколько отличное от другого двухмерное изображение, а в нашем сознании оба изображения сливаются в одно объёмное.

Первые работы по созданию технических устройств, позволяющих человеку искусственно наблюдать стереоскопический эффект, относятся к середине XIX века. В это время были созданы зеркальный и линзовый стереоскопы, работа которых основывается на раздельном представлении глазам наблюдателя двух изображений объекта (стереопары), полученных из двух смещённых в пространстве точек. Эта идея стала отправной для дальнейшего развития нескольких научно-технических направлений в области средств отображения визуальной информации трёхмерного типа, а именно: стереофотографии, стереокинематографа, а затем и стереотелевидения.

Впервые массовый интерес зрителей к стереокино проявился в пятидесятые годы прошлого столетия, что было связано с открытием первых стереокинотеатров, использующих растровые стереоз экраны конструкции российского изобретателя С.П.Иванова в качестве устройства селекции изображений стереопары. Вторая волна интереса к стереокино связана с разработкой российской системы производства стереофильмов «Стерео-70», за которую сотрудники НИКФИ (научно-исследовательский кино-фото институт) в 1991 году получили премию Американской академии киноискусства «Оскар» за технические достижения.

Наконец, новый ренессанс стереокино совпал с появлением современных систем цифрового кинематографа, с разработкой технологии стереоконверсии (dimensionalization, что означает изменение мерности пространства), позволяющей превращать двумерные фильмы-блокбастеры в стереоскопические посредством цифровой обработки оригинального кинома-

териала. Дело в том, что киносъёмка стереоскопических фильмов двумя рядом расположенными малогабаритными теле- и видеокамерами высокой чёткости обходится достаточно дорого. Новая технология стереоконверсии в значительной степени удешевляет процесс получения стереоскопических кинофильмов.

Активными сторонниками технологии цифрового кинематографа являются такие ведущие продюсеры и режиссеры Голливуда, как Джордж Лукас, Джеймс Камерон, Роберт Земекс, Роберт Родригес, Рандал Клейсер. По их общему мнению, цифровая стереопроекция является следующим неизбежным этапом развития кинематографа, способным вернуть массового зрителя в кинотеатры.

При этом для обеспечения эргономически комфортных условий визуального восприятия стереоизображений выбор основных параметров стереоскопического кинематографа должен осуществляться в обязательном соответствии с основными законами функционирования зрительной системы человека.

2. Особенности стереоскопического зрения человека

Различные объекты и их пространственное расположение зрительно воспринимаются как при монокулярном (одним глазом), так и при бинокулярном зрении (двумя глазами) в случае восприятия левого и правого изображений объекта, т.е. его стереопары. Однако наиболее устойчивое восприятие стереоэффекта возникает только при бинокулярном зрении. При этом основную роль играет расстояние между зрительными осями при рассматривании удалённых предметов, называемое глазным базисом b_0 . Средним стереоскопическим базисом считается межзрачковое расстояние, равное 65 мм. Левый и правый глаза человека смотрят на объект наблюдения в этом случае с разных позиций, т.е. с разных ракурсов. При этом изображения одного и того же объемного объекта для левого и правого глаза человека будут несколько отличаться из-за пространственного сдвига глаз. Так, расстояние между одними и теми же точками объекта A_1 и A_2 в изображениях на сетчатках глаз будет различным, т.е. $a'_1 a'_2 \neq a''_1 a''_2$ (рис. 1).

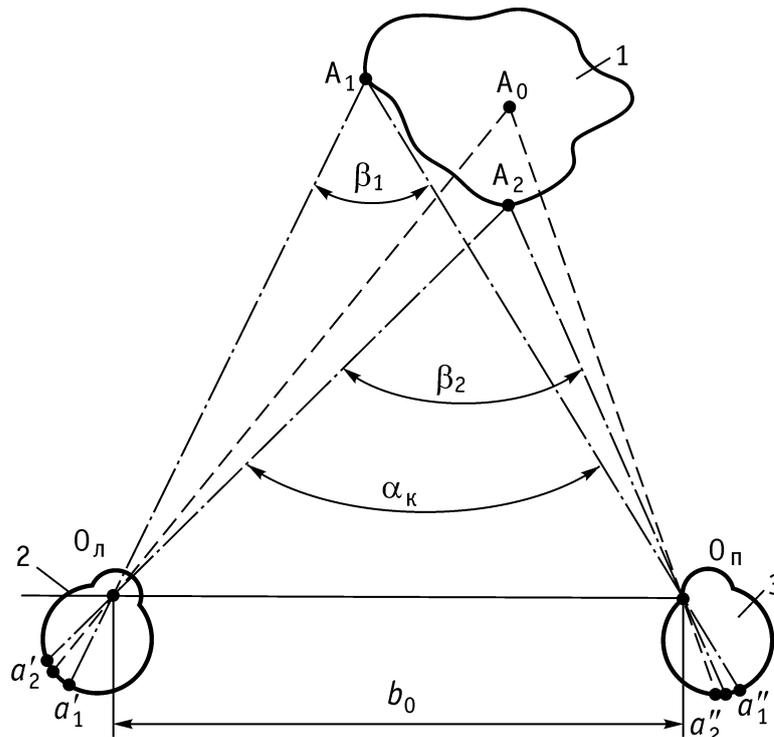


Рис. 1. Схема бинокулярного видения объекта:
1 – объект рассматривания; 2 – левый глаз; 3 – правый глаз

Угол между визирными линиями глаз называется углом конвергенции (угол α_k на рисунке 1), а их направление определяется фиксируемой точкой объекта. При смещении наблюдаемого объекта происходит как изменение угла конвергенции, так и аккомодация, т.е. изменение кривизны глазных хрусталиков. Аккомодация обеспечивает резкость изображений объектов на сетчатках при различных расстояниях их от наблюдателя. При бинокулярном зрении происходит одновременность двух процессов – конвергенции и аккомодации, т.е. каждому углу конвергенции соответствует определённое состояние аккомодации глаз. Зрительный аппарат человека допускает небольшой разрыв между плоскостями конвергенции и аккомодации в пределах ± 1 дптр [1]. Превышение этого предела приводит к относительной слабости зрения (астенопии), которая проявляется в снижении зрительной работоспособности (утомлении), в мышечных расстройствах зрительного аппарата, в постепенном ухудшении остроты зрения.

Смещение какой-либо точки объекта наблюдения, например A_1 на рис. 1, в изображении на сетчатке одного глаза относительно соответствующей точки изображения на сетчатке другого глаза носит название бинокулярного параллакса, значение которого можно оценить как в угловых, так и в линейных единицах. Бинокулярный параллакс $\Delta\beta$, измеренный в угловых единицах, определяется разностью параллактических углов β_1 и β_2 , образуемых визирными линиями глаз, т.е. $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$. При этом чем больше глубинные размеры наблюдаемых объектов, тем больше бинокулярный параллакс.

Оцениваемый в линейных единицах бинокулярный параллакс p часто называют линейным параллаксом и определяют разностью расстояний между проекциями одних и тех же точек объекта, например A_1 и A_2 , в изображениях на сетчатках левого и правого глаз человека (см. рис. 1):

$$p = a'_2 a'_1 - a''_2 a''_1 \approx f_{\Gamma} \Delta\beta,$$

где f_{Γ} – фокусное расстояние глаз человека.

Нормальное восприятие стереоэффекта, при котором осуществляется слияние отдельных изображений стереопары в сознании наблюдателя в стереоскопическую модель объекта, происходит при условии, если значение параллакса на сетчатке глаза не превышает размеров зоны Панума, которая определяет максимально допустимое значение параллакса на сетчатках глаз. Среднее значение размера зоны Панума в угловых единицах при восприятии стереоскопических изображений достигает $55'$ [1]. В случае превышения параллаксов на сетчатках глаз размера зоны Панума изображения стереопары дwoятся, что приводит к потере стереоэффекта.

Стереоскопическая модель физических объектов, воспринимаемая зрителями в стереокинематографе, представляет собой поверхность, образованную попарным пересечением лучей, проходящих через центры хрусталиков глаз и идентичные точки стереопары, воспроизводимой на киноэкране видеопроекторами. При этом часть стереоскопической модели зрителями воспринимается за плоскостью киноэкрана, т.е. в заэкранном пространстве, а другая часть стереомодели воспринимается перед плоскостью киноэкрана, т.е. в предэкранном стереоскопическом пространстве. При полном совмещении двух изображений стереопары, т.е. в случае отсутствия в них параллельных сдвигов, наблюдаемые объекты отображаются в плоскости киноэкрана. Следовательно, наблюдение стереофильмов в цифровом кинематографе будет сопровождаться обязательным разрывом между плоскостями конвергенции и аккомодации. При этом очень важным является обеспечение таких условий просмотра стереофильмов, чтобы этот разрыв был в пределах допустимых значений.

3. Определение геометрических размеров изображений в стереоскопическом кинематографе

Геометрические размеры стереоскопических киноизображений должны выбираться в зависимости от предполагаемого расстояния их рассматривания l с учётом психологически обоснованных угловых размеров киноэкрана, т.е.

$$b_{\mathcal{D}} \approx 2l \operatorname{tg}(\varepsilon_{\Gamma}/2), \quad (1)$$

где ε_{Γ} – оптимальный угол обзора киноизображения в горизонтальной плоскости; $b_{\mathcal{D}}$ – ширина, т.е. горизонтальный размер киноэкрана. В случае обеспечения оптимальных условий рассматривания стереоскопических изображений ($\varepsilon_{\Gamma} \approx 35^{\circ}$) между l и $b_{\mathcal{D}}$ необходимо выдерживать следующее соотношение: $l \approx 1.6b_{\mathcal{D}}$ или $l \approx 2.85h_{\mathcal{D}}$,

где $h_{\mathcal{D}}$ – высота, т.е. вертикальный размер киноэкрана.

Таким образом, при бинокулярном восприятии изображений стереопары выбор геометрических размеров стереоскопических киноизображений должен осуществляться с учётом глубинной протяжённости наблюдаемых объектов.

Оценим количественно способность кинозрителей воспринимать глубинные соотношения объектов в стереоскопическом изображении без его двоения. Для этого установим аналитическую зависимость между допустимой глубиной воспринимаемого трёхмерного пространства и расстоянием наблюдения. Из рассмотрения рис. 2 следует, что параллакс заэкранного пространства на сетчатках глаза будет определяться разностью параллактических углов $\beta_0 - \beta_1$, значения которых устанавливаются соотношениями:

$$\operatorname{tg}\beta_0 = b_0/l; \quad \operatorname{tg}\beta_1 = b_0/(l + l_{\text{зэк}}),$$

где $l_{\text{зэк}}$ – допустимая глубина воспринимаемого заэкранного пространства.

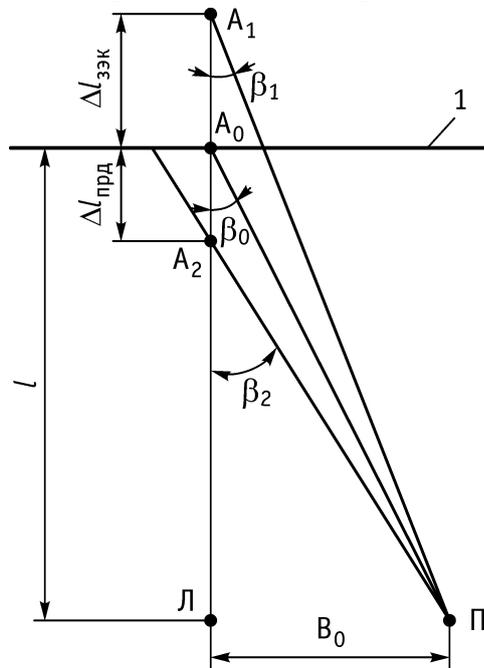


Рис. 2. Схема восприятия отдельных точек объекта в стереоскопическом пространстве цифрового кинематографа (1 – плоскость стереозэкрана)

Разность параллактических углов не должна превышать размеры зоны Панума, т.е. $\beta_0 - \beta_1 \leq 55'$. Из тригонометрических преобразований получаем

$$b_0/l - b_0/(l + l_{зэк}) / \left[2 + b_0^2 / l(l + l_{зэк}) \right] \leq \text{tg}55',$$

откуда при $b_0 = 0.065$ м

$$\begin{aligned} l_{зэк} &\leq (0.016l^2 + 0.672 \cdot 10^{-4}) / (0.065 - 0.016l) \approx \\ &\approx 0.016l^2 / (b_0 - 0.016l). \end{aligned} \quad (2)$$

Для предэкранного пространства (см. рис. 2) должно выполняться следующее соотношение: $\beta_2 - \beta_0 \leq 55'$. Аналогичным способом определим глубину предэкранного пространства $l_{нр\delta}$

$$\begin{aligned} l_{нр\delta} &\leq (0.016l^2 + 0.672 \cdot 10^{-4}) / (0.065 + 0.016l) \approx \\ &\approx 0.016l^2 / (b_0 + 0.016l). \end{aligned} \quad (3)$$

Для сравнения различных факторов, влияющих на глубинное восприятие стереоскопической модели объекта, установим аналитические зависимости вида $l_{зэк} = f_1(l)$ и $l_{нр\delta} = f_2(l)$ при условии, когда разрыв между конвергенцией и аккомодацией находится в зоне комфорта. Из рассмотрения рис. 2 следует, что

$$1/(l + l_{зэк}) = 1/l - 1\delta nmp; 1/(l - l_{нр\delta}) = 1/l + 1\delta nmp.$$

Преобразовывая данные соотношения, получаем

$$\begin{aligned} l_{зэк} &= l^2 / (1 - l); \\ l_{нр\delta} &= l^2 / (1 + l). \end{aligned}$$

На рис. 3 представлены графические зависимости $l_{зэк} = f_{1,2}(l)$, $l_{нр\delta} = f_{3,4}(l)$ при условии отсутствия двоения отдельных изображений стереопары, построенные по соотношениям (2) ... (5), (кривые 1, 3 соответствуют случаю, когда разрыв между конвергенцией и аккомодацией находится в допустимых пределах, а кривые 2, 4 – случаю, когда параллакс на сетчатках глаз не превышает зоны Панума).

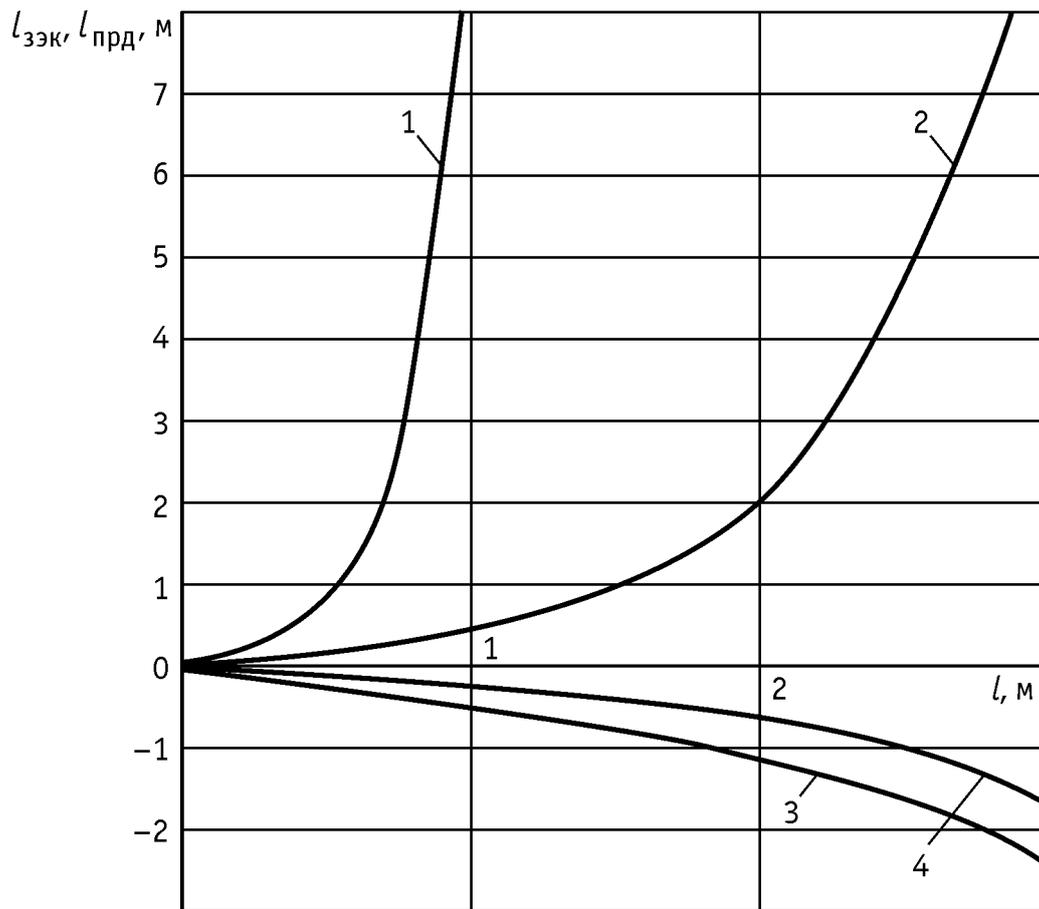


Рис. 3. Графические зависимости $l_{зэк} = f_{1,2} l$ и $l_{прд} = f_{3,4} l$ при отсутствии двоения отдельных изображений стереопары

Из рис. 3 видно, что глубина как предэкранного, так и заэкранного пространства, воспринимаемого без двоения изображений стереопары, определяется в первую очередь условием, при котором значение параллакса на сетчатках глаз не превышает размера зоны Панума.

При проектировании стереоскопических цифровых кинотеатров наибольший практический интерес представляет зависимость между допустимым глубинным размером N непосредственно самих физических объектов, наблюдаемых при условии отсутствия двоения отдельных изображений стереопары, и необходимыми геометрическими размерами воспроизводимых в плоскости киноэкрана изображений, например, их горизонтальным размером b_3 .

В стереоскопическом кинематографе при выполнении условий воспроизведения геометрически правильной стереомодели объектов справедливо следующее равенство:

$$N = \Delta L_{\Sigma} / M, \quad (6)$$

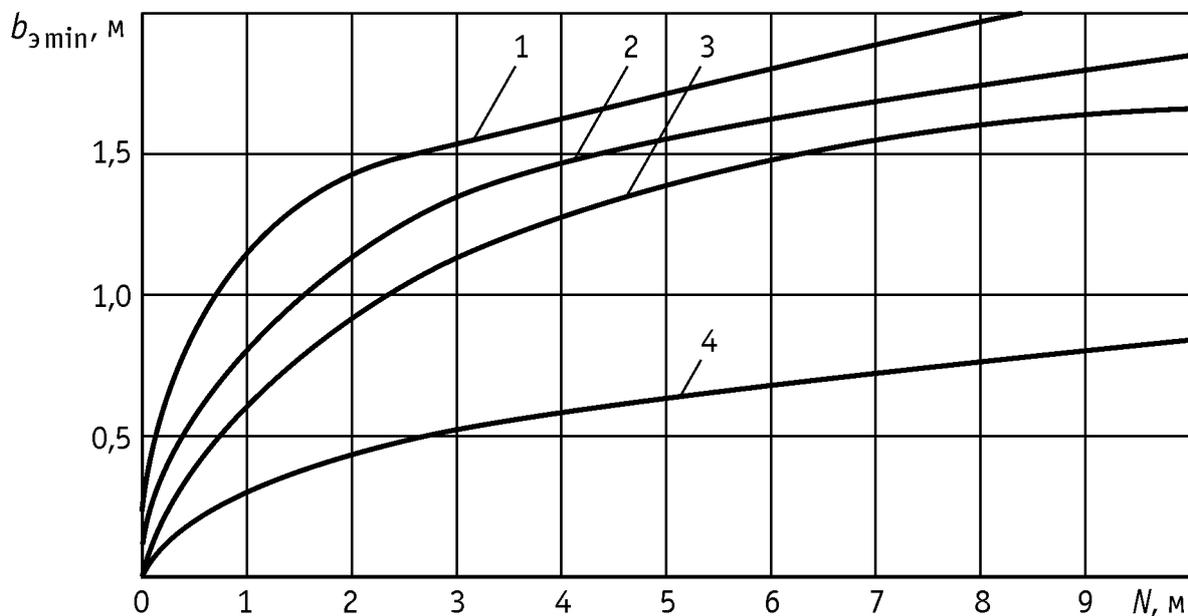
где ΔL_{Σ} – результирующая глубина стереопространства, воспринимаемая без искажений в стереоскопическом кинематографе. Для определения ΔL_{Σ} необходимо просуммировать величины $l_{зэк}$ и $l_{прд}$, характеризуемые соотношениями (2), (3):

$$\Delta L_{\Sigma} \leq 0.032 b_0 l^2 / (b_0^2 - 0.0003 l^2). \quad (7)$$

Преобразуя выражение (7) с учётом соотношений (1), (6), получаем зависимость между требуемым горизонтальным размером стереоизображения b_3 и глубинным размером N наблюдаемого без двоения объекта [2]:

$$b_{\text{э}} \geq \sqrt{b_0^2 N / (0,0008N + 0,082b_0 / M)}.$$

Для примера на рис. 4 приведены графические зависимости $b_{\text{э min}} = f(N)$ при различных значениях M .



1 – $M = 2$; 2 – $M = 1$; 3 – $M = 0,5$; 4 – $M = 0,1$

Рис. 4. Графические зависимости $b_{\text{э min}} = f(N)$ при различных значениях масштабного коэффициента стереоскопического устройства воспроизведения кинофильмов

4. Технические аспекты стереоскопической кинопроекции

В первых цифровых кинотеатрах для электронной демонстрации стереофильмов требовалось два видеопроектора для воспроизведения левого и правого изображений, т.е. стереопары. Сегодня практически все современные цифровые киноvideопроекторы высокого разрешения (с разрешающей способностью 2k или 4k) и соответствующей для стереопроекции световой мощностью, изготовленные по технологии DLP (Digital Light Processing – цифровая обработка света), обладают более высоким быстродействием. Все это позволяет воспроизводить попеременно с частотой 120 Гц изображения, предназначенные для левого или правого глаза кинозрителей. Фактически достигнутая частота смены изображений (60 Гц для каждого глаза) является приемлемой, чтобы зрители в стереокинотеатре не замечали мельканий наиболее ярких деталей воспроизводимых стереоизображений. Перемеживание проецируемых изображений в данном случае приводит к временному рассовмещению левых и правых кадров стереопары на период частоты 120 Гц, т.е. на 8,3 мс, однако это практически незаметно. Поэтому в цифровом кинотеатре для демонстрации стереофильмов требуется установка только одного современного киноvideопроектора, изготовленного такими фирмами, как Barco (Бельгия), Christie Digital Systems (США) или NEC (Япония).

Литература

1. Мамчев Г.В. Стереотелевизионные устройства отображения информации. М.: Радио и связь, 1983, 96 с.
2. Мамчев Г.В. Теория и проектирование стереотелевизионных устройств: Учебное пособие. Новосибирск: СибГУТИ, 1999, 230 с.

Статья поступила в редакцию 12.10.2009

Мамчев Геннадий Владимирович

д.т.н., профессор, завкафедрой радиовещания и телевидения СибГУТИ
тел. (383) 269-82-62; e-mail: mamtchev@sibsutis.ru

Conditions of reproduction high-quality images in stereoscopic cinematograph

G.V. Mamtchev

Dependence between permissible depth of visible physical objects and necessary geometric sizes of stereoimages is established. Expediency utilization of one projector is proved.

Keywords: binocular parallax, planes of convergence and accommodation, depth of visible space, geometric sizes of stereoimages.