

# Определение условий неискажённого воспроизведения стереофильмов в цифровых кинотеатрах

Г. В. Мамчев

В статье анализируются причины возникновения муаровых искажений в стереоскопических изображениях, полученных с помощью растрового стереоэкрана. Произведена оценка их уровня. Показано, что единственно возможным способом уменьшения шума пространственной дискретизации является увеличение числа растровых элементов в горизонтальном направлении.

*Ключевые слова:* растровый стереоэкран, дискретизация изображений стереопары, муаровые искажения, отношение сигнал/шум пространственной дискретизации, оптические фильтры.

## 1. Введение

С появлением систем электронного кинематографа широкое распространение получили цифровые кинотеатры формата 3D, оборудованные растровым стереоэкраном (рис. 1), обеспечивающим коллективный просмотр стереофильмов достаточно большому числу зрителей без использования индивидуальных наглазных приспособлений (стереоочков) [1].

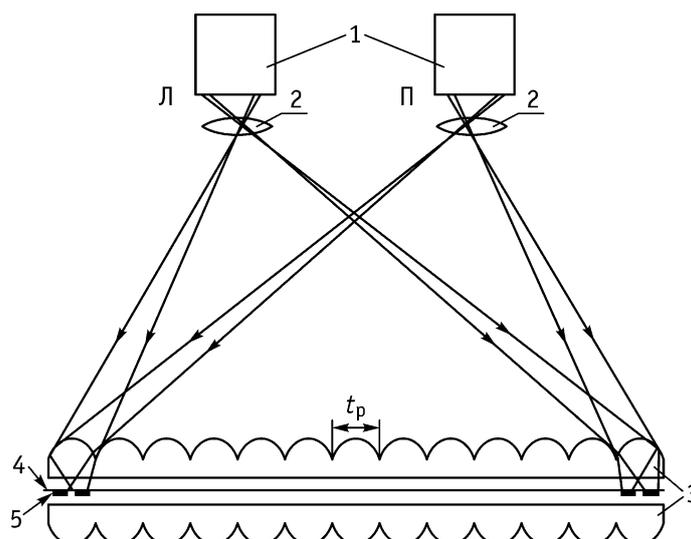


Рис. 1. Оптическая схема системы воспроизведения стереофильмов  
в цифровых кинотеатрах:

- 1 – видеопроекторы; 2 – проекционные объективы; 3 – оптические растры стереоэкрана;  
4 – диффузно-рассеивающий экран;  
5 – элементарные штрихи кодированного стереоизображения

При воспроизведении многоракурсных изображений оптическая схема будет отличаться только бóльшим количеством видеопроекторов и проекционных объективов.

При прохождении световых лучей через растр, состоящий из однородных вертикально расположенных цилиндрических линзочек (lenticular – лентиккулярная структура), например, при проецировании изображения, сформированного модулирующим устройством видеопроектора, с помощью проекционного объектива в плоскость оптического растра, на диффузно-рассеивающем экране, находящемся на фокусном расстоянии цилиндрических линзочек, изображение будет представлено в штриховой форме. Допустим, что теперь проецируются два изображения стереопары объекта наблюдения двумя проекционными объективами, расположенными перед оптическим растром. В этом случае на диффузно-рассеивающем экране будет образовано кодированное стереоизображение, представляющее собой совокупность чередующихся пикселей дискретизированных изображений отдельных ракурсов объекта. Причем под каждой вертикально расположенной линзочкой оптического растра оказывается пара вертикальных полос (штрихов): одна от левого изображения стереопары, другая от правого. Для пространственной селекции изображений стереопары световые лучи от кодированного изображения на диффузно-рассеивающем экране должны второй раз пройти через оптический растр, аналогичный растру при кодировании. С этой целью диффузно-рассеивающий экран иногда делают отражающим, вследствие чего световые лучи от разделяемых изображений стереопары дважды проходят через один и тот же оптический растр.

Световые лучи от всех элементов (штрихов) кодированного изображения каждого ракурса стереопары, проходя через оптический растр, собираются в определённой точке схода, в которой и образуется зона видения изображения данного ракурса.

Как правило, число вертикальных линзочек оптических растров выбирается таким, чтобы их структура не была заметна глазу наблюдателя. В этом случае ширина вертикальных линз, равная шагу оптического растра  $t_p$  с расстояния рассматривания, соответствующего трём высотам стереоэкрана, должна восприниматься зрителями под углом, примерно равным  $1'$ . Следовательно, оптические растры, предназначенные для применения в стереотелевизионных устройствах, должны в горизонтальном направлении содержать не менее 1920 вертикальных линзочек.

Однако в процессе практического использования растровых стереоэкранов было установлено, что в большинстве случаев при рассматривании стереоизображений зрители наблюдают искажения типа муар (результат интерференции пространственных частот растровых структур). Конкретный вид муаровых искажений зависит от особенностей пространственных спектров изображений стереопары. При наличии в исходном стереоскопическом изображении хорошо выраженных периодических составляющих искажения могут проявляться в виде появления новых периодических составляющих, часто имеющих вид муара. Для устранения причин возникновения совокупности муаровых искажений, приводящих к значительному ухудшению качества наблюдаемых стереоизображений, а в некоторых случаях даже нарушающих восприятие стереоэффекта, следует провести теоретический анализ способа растровой селекции изображений стереопары, базирующийся на элементах дискретизации многомерных сообщений, что и является целью настоящей статьи.

## **2. Оценка искажений изображений стереопары, вызванных их дискретизацией в горизонтальном направлении с помощью оптических растров**

С целью определения уровня муаровых искажений стереоскопических изображений, вызванных их пространственной дискретизацией по горизонтали, и условий их снижения рассмотрим оптическую схему воспроизводящего устройства на основе растрового стереоэкрана (рис. 1.).

В случае растровой селекции оптическое изображение, формируемое проекционным объективом и описываемое функцией яркости  $L(x, y)$ , где  $x, y$  – декартовы координаты, относительно которых определяется распределение яркости в изображениях, подвергается фильтрации посредством первого оптического растра стереоэкрана (фильтр  $\Phi_1$ ). На выходе фильтра  $\Phi_1$  изображение, в котором подавлены высокие пространственные частоты, характеризуется функцией  $L_1(x, y)$ . Кроме того, линзы растра осуществляют дискретизацию изображений, в результате чего в плоскости стереоэкрана получается кодированное стереоизображение, представляющее собой чередующиеся штрихи, дискретизированных в горизонтальном направлении изображений отдельных ракурсов, которое описывается функцией  $L_2(x, y)$ . Сложное штриховое изображение рассматривается через второй оптический растр стереоэкрана, который также обладает фильтрующими свойствами (фильтр  $\Phi_2$ ). Поэтому воспринимаемое наблюдателем изображение определяется функцией  $L_3(x, y)$ .

Число отсчётов дискретизированного изображения каждого ракурса определяется шагом оптических растров  $t_p$ . Согласно обобщённой теоремы Котельникова, дискретизация функции  $L_1(x, y)$  в горизонтальном направлении с интервалом  $t_p$  допустима при условии, что спектр пространственных частот изображений ограничен частотой  $\nu_{x\max} = 1/2t_p$  по горизонтали. Следовательно, действие фильтра должно характеризоваться выражением

$$L_1(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \frac{\sin \frac{\pi}{t_p}(x - x_1)}{\pi(x - x_1)} dx_1, \quad (1)$$

которое представляет собой свёртку функции  $L(x, y)$  с импульсной реакцией идеального фильтра с частотной характеристикой, ограниченной частотой  $\nu_{x\max}$ . Для определения функции  $L_2(x, y)$  воспользуемся растровой функцией  $\varphi(x)$  следующего вида:

$$\varphi(x) = A \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(x - K^* t_p) = A \sum_{-\infty}^{\infty} a_l e^{il\omega_D x}, \quad (2)$$

где  $A$  – постоянный коэффициент;  $\delta(x)$  – дельта-функция;  $K^*, l$  – целые числа;  $\omega_D = 2\pi/t_p$  – круговая частота дискретизации в горизонтальном направлении;  $a_l$  – коэффициенты Фурье,

равные  $a_l = \frac{1}{t_p} \int_0^{t_p} [\delta(x) + \delta(x - t_p)] e^{-il\omega_D x} dx = \frac{1}{t_p}$ . При этом  $\varphi(x) = \frac{A}{t_p} \sum_{-\infty}^{\infty} e^{il\omega_D x}$ . В дальней-

шем удобно принять  $A/t_p = 1$ . Произведя перемножение  $L_1(x, y)$  на растровую функцию  $\varphi(x)$ , определяемую соотношением (2), получим выражение для распределения яркости в дискретизированном изображении:

$$L_2(x, y) = L_1(x, y) \sum_{K^*=-\infty}^{K^*=\infty} \delta(x - K^* t_p) = L_1(x, y) \sum_{l=-\infty}^{l=\infty} a_l e^{il\omega_D x}. \quad (3)$$

Для восстановления функции  $L_1(x, y)$  по её дискретным значениям требуется использование фильтра  $\Phi_2$  стереоэкрана, действие которого по горизонтали должно описываться выражением

$$L_3(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} L_2(x, y) \frac{\sin \frac{\pi}{t_p}(x-x_2)}{\pi(x-x_2)} dx_2. \quad (4)$$

Подставив соотношения (1) в (3), а затем (3) в (4) и произведя интегрирование по  $x_2$ , получим

$$L_3(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \frac{\sin \frac{\pi}{t_p}(x-x_1)}{\pi(x-x_1)} \sum_{K^*=-\infty}^{K^*=\infty} \frac{\sin \frac{\pi}{t_p}(x-K^*t_p)}{\pi(x-K^*t_p)} dx_1,$$

или после суммирования

$$L_3(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) \frac{\sin \frac{\pi}{t_p}(x-x_1)}{\pi(x-x_1)} dx_1. \quad (5)$$

Из сравнения выражений (1) с (5) следует, что

$$L_1(x, y) = L_3(x, y),$$

то есть теоретически имеется возможность точного восстановления функции  $L_1(x, y)$  по функции  $L_2(x, y)$ . Однако для этого необходимо использовать идеальные фильтры  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ . Причём за счёт действия фильтра  $\Phi_1$  функция  $L_1(x, y)$  отлична от исходной  $L(x, y)$ .

Частотный спектр функции  $L_2(x, y)$  может быть найден как свёртка спектров функций, произведением которых она является. Частотные спектры данных функций можно найти, применив преобразование Фурье. Например, спектр функции  $L_1(x, y)$  определяется спектральной функцией вида

$$S_1(\omega_x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} L(x, y) e^{-i\omega_x x} dx,$$

где  $\omega_x$  – круговая пространственная частота спектра в направлении оси  $x$ , а спектр суммы дельта-функций представлен соотношением

$$S'_1(\omega_x) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{K^*=-\infty}^{\infty} \delta(x-K^*t_p) e^{-i\omega_x x} dx = \sum_{K^*=-\infty}^{\infty} \delta\left(\omega_x - \frac{2\pi K^*}{t_p}\right).$$

После нахождения свёртки обеих спектральных функций и выполнения интегрирования получаем спектр функции  $L_2(x, y)$ .

$$S_2(\omega_x, y) = \sum_{K^*=-\infty}^{\infty} S_1\left(\omega_x - \frac{2\pi K^*}{t_p}, y\right).$$

Из полученного выражения следует, что в результате дискретизации изображений спектральное пространство оказывается разбитым на множество дискретных точек с координатами  $2\pi K^*/t_p$  (рис. 2). Спектральные составляющие, соответствующие этим точкам, как бы модулируются исходным спектром  $S_1(\omega_x, y)$ , в результате чего пространство возле каждой

точки оказывается заполненным смещённым исходным спектром. Если фильтр  $\Phi_1$  идеален, то основной (заштрихованный) и каждый побочный спектры не перекрывают друг друга. Для восстановления неискажённого изображения  $L_1(x, y)$  необходимо при помощи фильтра  $\Phi_2$  выделить только исходный спектр, а все остальные побочные спектры устранить.

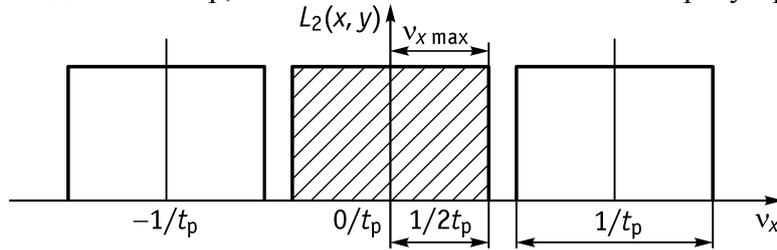


Рис. 2. Спектральное пространство изображения отдельного ракурса после его дискретизации

В реальном растровом стереоэкране из-за погрешностей изготовления оптических растров невозможно реализовать идеальный фильтр  $\Phi_1$ . Поэтому спектр функции  $L_1(x, y)$  содержит пространственные частоты  $\nu_x > \nu_{x\max}$ . В этом случае побочные спектры частично перекрывают основной спектр (рис. 3). Если изображение  $L_1(x, y)$  имеет периодически повторяющиеся элементы по горизонтали с пространственной частотой  $\nu_{x0}$ , причём  $1/t_p > \nu_{x0} > \nu_{x\max}$ , то в основном спектре появляются ложные низкочастотные компоненты с частотой  $(1/t_p) - \nu_{x0}$ . Эти компоненты вызывают искажения изображения типа муар-эффекта, то есть шум пространственной дискретизации.

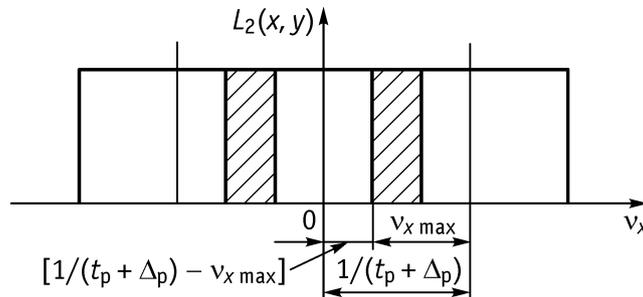


Рис. 3. Спектральное пространство изображения отдельного ракурса после его дискретизации при  $[\nu_{x0} = 1/(t_p + \Delta_p)] > \nu_{x\max}$

Для оценки степени заметности муар-эффекта определим отношение сигнал/шум пространственной дискретизации  $\Psi_D$  в воспроизводимых стереоизображениях. В общем случае

$$\Psi_D = U_C / \sqrt{U_{ш}^2}, \quad (6)$$

где видеосигнал

$$U_C = \frac{c}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} |S_3(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y = c\xi, \quad (7)$$

соответствующий воспринимаемому изображению  $L_3(x, y)$ ;  $c$  – постоянный коэффициент;  $\omega_y$  – круговая пространственная частота спектра в направлении оси  $y$ ; спектральная функция изображения  $L_3(x, y)$

$$S_3(\omega_x, \omega_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_3(x, y) e^{-i(\omega_x x + \omega_y y)} dx dy;$$

энергия изображения  $L_3(x, y)$

$$\xi = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L_3^2(x, y) dx dy;$$

среднее значение квадрата сигнала, соответствующего шуму пространственной дискретизации,

$$\bar{U}_{ш}^2 = \frac{c^2}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} J_{шD}(\omega_x, \omega_y) |S_3(\omega_x, \omega_y)|^2 d\omega_x d\omega_y; \quad (8)$$

$J_{шD}(\omega_x, \omega_y)$  – спектральная интенсивность шума пространственной дискретизации на наблюдаемом изображении, которая не содержит информации о фазовых соотношениях частотных составляющих, а характеризует лишь распределение энергии по пространственным частотам.

При этом

$$J_{из}(\omega_x, \omega_y) S_{пл} = |S(\omega_x, \omega_y)|^2, \quad (9)$$

где  $S_{пл}$  – площадь изображения;  $J_{из}(\omega_x, \omega_y)$  – спектральная интенсивность изображения.

Для спектральной интенсивности дискретизированного изображения справедливо выражение вида:

$$J_{изD}(\omega_x, \omega_y) = \sum_{-\infty}^{\infty} J_{из}(K^* \omega_D + \omega_x, \omega_y), \quad (10)$$

где спектральная интенсивность недискретизированного изображения, найденная экспериментально, аппроксимируется выражением [2]

$$J_{из}(\omega_x, \omega_y) = \frac{4a_s^2 \xi}{(a_s^2 + \omega_x^2)(a_s^2 + \omega_y^2) S_{пл}}, \quad (11)$$

в котором  $a_s$  – параметр, определяемый размерами изображения.

В выражение (10) только слагаемое, для которого  $K^* = 0$ , представляет непосредственно спектральную интенсивность изображения, все же остальные члены ряда являются составляющими спектра интенсивности шума пространственной дискретизации.

$$J_{шD}(\omega_x, \omega_y) = \sum_{-\infty}^{\infty} J_{из}(K^* \omega_D + \omega_x, \omega_y) \quad (12)$$

за исключением  $K^* = 0$ .

Подставляя значение  $J_{из}(\omega_x, \omega_y)$  из выражения (11) в уравнение (12), получим интенсивность шума пространственной дискретизации

$$J_{шD}(\omega_x, \omega_y) = \frac{4a_s^2 \xi}{S_{пл} (a_s^2 + \omega_y^2)} \sum_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a_s^2 + (K^* \omega_D + \omega_x)^2}, \quad (13)$$

за исключением  $K^* = 0$ .

Из соотношения (13) следует, что спектральная интенсивность шума пространственной дискретизации прямо пропорциональна энергии изображения, то есть он представляет собой мультипликативную помеху.

Подставляя полученные значения спектральной интенсивности  $J_{из}(\omega_x, \omega_y)$ ,  $J_{шD}(\omega_x, \omega_y)$  в уравнения (7), (8), (9), определим по выражению (6) величину  $\Psi_D$ . Учитывая, что  $S_{пл} = ht_p N_p$ , где  $h$  – высота изображения,  $N_p$  – число растровых элементов в горизонтальном направлении, получаем, что

$$\Psi_D = \sqrt{6hN_p/t_p}. \quad (14)$$

### 3. Выводы

Из соотношения (14) следует, что единственно возможным способом уменьшения шума пространственной дискретизации является увеличение числа растровых элементов в горизонтальном направлении.

Если в растровом стереоэкране фильтр  $\Phi_1$  идеальный, а фильтр  $\Phi_2$  реальный, то есть пропускающий пространственные частоты  $\nu_x > 1/2t_p$ , то в воспринимаемом стереоизображении будут наблюдаться высокочастотные составляющие, отсутствующие в спектре исходного изображения. В этом случае возникнут искажения, которые будут восприниматься как дискретность изображения. Дискретность наиболее заметна, когда в спектре наблюдаемого изображения имеются пространственные частоты  $\nu_x = K^*/t_p$ . Поэтому фильтр  $\Phi_2$  в первую очередь должен обеспечить подавление пространственных частот  $\nu_x$ , кратных  $1/t_p$ .

В этом случае при использовании растровой селекции в воспринимаемых стереоизображениях будут отсутствовать как муар-эффект, так и явление дискретности изображений.

### Литература

1. Мамчев Г.В. Системы цифрового кинематографа: Монография / СибГУТИ. – Новосибирск: 2005. – 291 с.
2. Красильников Н.Н. Статистическая теория передачи изображений. М.: Связь, 1976. – 184 с.

**Мамчев Геннадий Владимирович**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиовещания и телевидения  
СибГУТИ, тел. (383) 269-82-62, e-mail: mamtchev@sibsutis.ru

**Determination of conditions of undistorted three-dimensional film in digital movie theaters****G.V. Mamtchev**

Origins of moiré distortions in stereoscopic images obtained with the help of raster stereo screen are analyzed in this article. Level assessment is produced. It is demonstrated that the only possible way of noise reduction of spatial discretization is increasing the number of raster elements in horizontal direction.

*Keywords:* raster stereo screen, discretization of stereo pair images, moiré distortions, ratio signal/noise of spatial discretization, optical filters.