

СИНТЕЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ АВТОСТЕРЕОСКОПИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Введение

Настоящая работа посвящена проблеме синтеза изображений для автостереоскопических систем, с помощью которых наблюдатель может видеть объемное изображение без помощи всевозможных дополнительных приспособлений типа очков (в англоязычной литературе такие устройства называют auto-stereoscopic или naked-eyes). Для того чтобы увидеть объем, нужно, чтобы в левый и правый глаза наблюдателя попадали различные изображения, которые соответствуют различным ракурсам воспроизводимой сцены. Проще всего это сделать принудительно путем добавления параллакс-барьера, т.е. между экраном и зрителем поместить специальную маску, которая препятствует проникновению изображения, которое предназначено правому глазу, в левый глаз, и наоборот. Простейшей маской является прозрачная пленка, на которую нанесены вертикальные непрозрачные полосы – Рис. 1А. Используются также маски из миниатюрных цилиндрических линз Рис. 1Б. В силу способа формирования стереоизображения эти устройства имеют периодическую структуру – изображения для левого и правого глаз выводятся полосами. Для устройств этого типа характерны следующие недостатки: снижение яркости изображения, наличие «ложных» зон, в которых наблюдатель левым глазом видит изображение, предназначенное правому и наоборот, а также очень узкие зоны стереоэффекта.

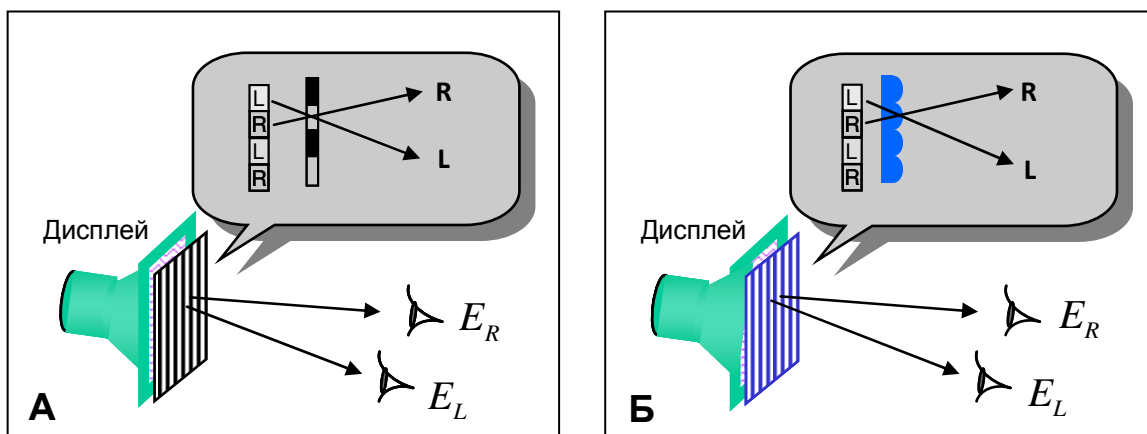


Рис. 1. Автостереоскопические системы с параллакс-барьером. А – со щелевой маской, Б – с микролинзовым растром.

В настоящей работе рассматриваются стереодисплей и проекционная система, в которых объемный эффект достигается за счет интегрирования нескольких непрерывных специальным образом подготовленных изображений и использования эффекта рассеяния света, что позволяет получить объемное изображение в достаточно широкой области пространства.

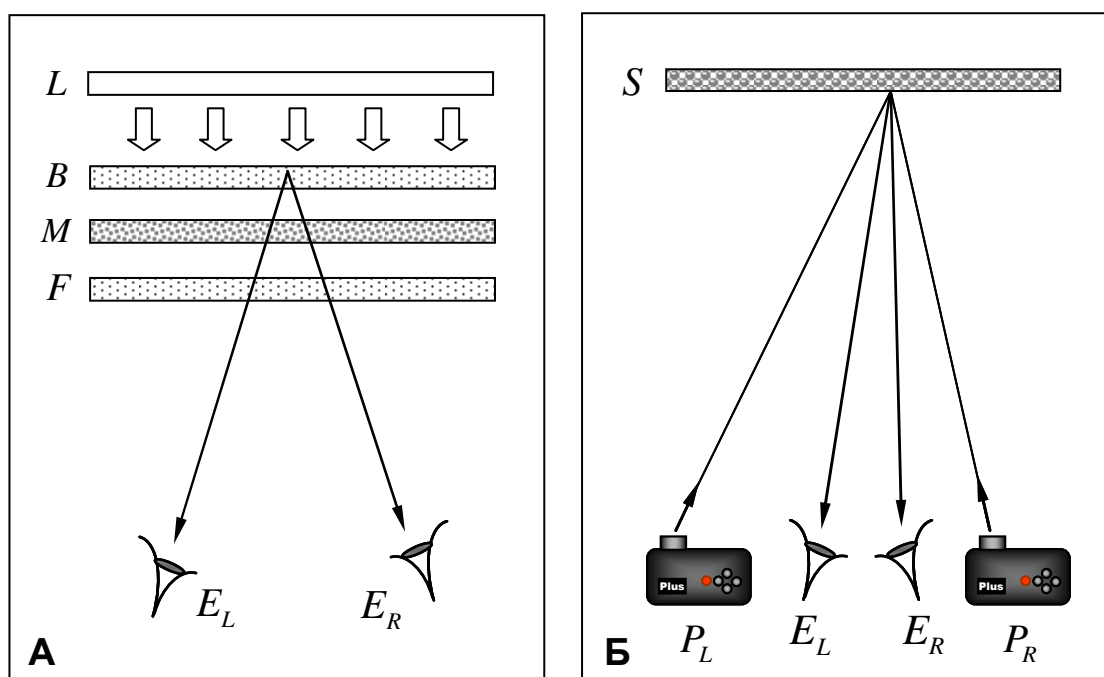


Рис. 2. Устройства для формирования непрерывных объемных изображений. А – стереодисплей, Б – проекционная система.

Дисплей [1,2] состоит из двух жидкокристаллических (ЖК) панелей F и B , между которыми помещен диффузор M (Рис. 2А). На панели выводятся специальным образом рассчитанные изображения, которые являются масками для источника света, который попадает в глаза наблюдателя E_L и E_R от тыльного осветителя L . Поскольку ЖК панели разнесены по глубине на определенное расстояние, то изображения, попадающие в левый и правый глаза, пройдут через разные пиксели масок, и, следовательно, будут разными. Диффузор выполняет двойную функцию. Во-первых, он нужен для того, чтобы устранить муар, который возникает из-за периодической структуры ЖК панелей – пиксели разделены непрозрачной черной маской. Кроме того, диффузор позволяет увеличить угол обзора: при изменении положения наблюдателя происходит наложение других

пикселей маски, в результате чего изображение изменяется. Диффузор производит небольшое «размытие» задней маски, поэтому небольшие отклонения зрителя от выбранного положения не нарушают восприятия стереоизображения.

Проекционная система [3] состоит из двух (или более) стандартных проекторов и ретрорефлекторного экрана (Рис. 2Б), который обладает способностью отражать свет строго в направлении источника. Однако многие ретрорефлекторные материалы обладают диффузионными свойствами, благодаря чему отражают свет относительно направления источника в некоторый телесный угол с экспоненциальным затуханием на периферии. Это свойство может быть использовано для создания объемного светового поля в достаточно широкой зоне. Закон рассеяния таким экраном хорошо моделируется нормальным распределением:

$$K(\alpha) = P \cdot \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\sigma^2}\right), \quad (1)$$

где P – величина поглощения света экраном, α – угол между источником света и наблюдателем, а σ – параметр, характеризующий рассеивающие свойства экрана. А поскольку левый и правый глаза наблюдателя видят изображения, отраженные от разных проекторов, под различными углами, то можно подобрать такие изображения для проекторов, чтобы наблюдатель увидел заданную объемную сцену.

Таким образом, описанные стереосистемы способны при разных углах обзора формировать различные изображения, поэтому для воспроизведения заданной объемной сцены нужно рассчитать (синтезировать) соответствующие изображения, которые нужно подать им на вход. А поскольку такие изображения определяются не единственным образом, из всех возможных следует выбрать такие, которые обеспечивают наиболее широкую область стереовидения. Настоящая работа посвящена решению этой проблемы. Она имеет следующую структуру. В первом разделе приведена общая постановка задачи синтеза изображений для автостереоскопических систем, а во втором разделе описан эффективный алгоритм ее решения. Третий и четвертый разделы посвящены практическому приложению разработанной методики синтеза изображений для стереодисплея и проекционной стереосистемы. В последнем разделе исследована возможность выбора оптимальных технических параметров для указанных систем с целью увеличения области, в которой наблюдатель сможет видеть объемное изображение.

1. Постановка задачи

Пусть нам дана оптическая стереосистема S для воспроизведения изображения, для которой известны ее конструктивные параметры, такие, как, например, расстояние между панелями, размер экрана и свойства диффузора для стереодисплея. Будем называть эти параметры внутренними параметрами системы, и обозначим их совокупность как H . Выберем прямоугольную систему координат и поместим стереосистему S в заданную точку пространства \vec{X}_S . Для того, чтобы предоставить наблюдателю возможность видеть объемную картину, стереосистема обязана обладать следующим свойством. Если подать ей на вход $n \geq 2$ специальным образом рассчитанных изображений I_1, \dots, I_n , то глаза наблюдателя, находящиеся в точках с координатами \vec{X}_L и \vec{X}_R , должны увидеть различные изображения:

$$L = S(\vec{X}_L, \vec{X}_S, I_1, \dots, I_n, H), \quad R = S(\vec{X}_R, \vec{X}_S, I_1, \dots, I_n, H). \quad (2)$$

А для того чтобы наблюдатель увидел заданную трехмерную картину, нужно, чтобы эти изображения совпадали с заданной стереопарой (I_L, I_R) , т.е. с двумя изображениями, являющимися проекциями исходной сцены с двух ракурсов, которые, как правило, получаются с помощью стереокамеры. Поскольку как относительное расположение наблюдателя относительно стереосистемы, так и ее внутренние параметры фиксированы, для достижения заданного эффекта мы можем изменять только изображения I_1, \dots, I_n , которые можно определить из условия минимума функционала невязки:

$$\Phi_1(I_1, \dots, I_n) = \frac{1}{2}(L(I_1, \dots, I_n) - I_L)^2 + \frac{1}{2}(R(I_1, \dots, I_n) - I_R)^2. \quad (3)$$

Пусть все изображения являются дискретными, и при этом имеют размер N_w и N_h по горизонтали и вертикали соответственно. Тогда функционал (3) можно записать в следующем виде:

$$\Phi_1(I_1, \dots, I_n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \left((L(i, j) - I_L(i, j))^2 + (R(i, j) - I_R(i, j))^2 \right). \quad (4)$$

Поскольку изображения, которые могут быть выведены как на дисплей, так и на проектор, имеют ограниченную диапазоном $[0, 255]$ интенсивность, на искомые изображения I_1, \dots, I_n следует наложить ограничения:

$$0 \leq I_k(i, j) \leq 255, \quad k = 1, \dots, n, \quad i = 1, \dots, N_h, \quad j = 1, \dots, N_w. \quad (5)$$

Нас, в принципе, устраивает любой набор изображений I_1, \dots, I_n , удовлетворяющий условиям (5) и на которых достигается минимум функционала Φ_1 , однако с точки зрения решаемой проблемы из всех возможных решений следует выбрать наиболее гладкое, поскольку это позволит наблюдателю видеть объемное изображение не только в расчетной точке, но и в ее некоторой окрестности. Для получения наиболее гладкого решения к функционалу невязки следует добавить следующий функционал:

$$\Phi_2(I_1, \dots, I_n) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{N_h-1} \sum_{j=1}^{N_w-1} \left((I_k(i+1, j) - I_k(i, j))^2 + (I_k(i, j+1) - I_k(i, j))^2 \right), \quad (6)$$

Который к тому же является для функционала Φ_1 регуляризирующей добавкой.

Таким образом, задача синтеза изображений заключается в минимизации функционала

$$\Phi(I_1, \dots, I_n) = \Phi_1(I_1, \dots, I_n) + \alpha \Phi_2(I_1, \dots, I_n) \quad (7)$$

с ограничениями (5).

2. Алгоритм синтеза изображений

Задача (7), (5) является задачей условной минимизации квадратичного функционала с ограничениями в виде неравенств, для решения которой формируют функционал Лагранжа, а минимальное значение находят из условий Куна-Таккера [4]. Однако наша проблема может быть сведена к задаче безусловной минимизации. Для этого сделаем замену переменных:

$$I_k = \frac{255}{1 + \exp(-J_k)}. \quad (8)$$

При такой замене I_k будут принадлежать интервалу $[0, 255]$, т.е. условия (5) будут выполняться автоматически, а новые переменные J_k могут изменяться на всей числовой оси. Для функционала (7) эффективной проце-

дурой минимизации является использование градиентного спуска с инерционным членом:

$$J_k(t+1) = J_k(t) - \eta \frac{\partial \Phi(t)}{\partial J_k} - \mu \frac{\partial \Phi(t-1)}{\partial J_k}. \quad (9)$$

Здесь η и μ – итерационные параметры, характеризующие скорость процесса градиентного спуска, t – фиктивный параметр, означающий номер итерации. Инерционный член учитывает изменение градиента на предыдущем шаге, что позволяет избежать попадания в локальные минимумы. Качество получаемых изображений будем характеризовать величиной отличия полученных изображений (L, R) от заданной стереопары (I_L, I_R) , выраженной в процентах:

$$E = \frac{100\%}{255} \sqrt{\frac{1}{2N_h N_w} \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{j=1}^{N_w} (L(i, j) - I_L(i, j))^2 + \frac{1}{2N_h N_w} \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{j=1}^{N_w} (R(i, j) - I_R(i, j))^2}. \quad (10)$$

Величину E будем называть ошибкой синтеза изображений.

Учитывая то обстоятельство, что все цифровые средства отображения информации, такие как дисплеи и проекторы, имеют дискретную структуру, стереосистему удобно представить в виде нейронной сети N , в которой нейроны соответствуют пикселям изображений, а связи W между нейронами являются фиксированными; они моделируют процесс распространения световых лучей в соответствии с набором внутренних параметров H и взаимным расположением наблюдателя \vec{X} относительно точки расположения системы \vec{X}_S , $W = W(\vec{X}, \vec{X}_S, H)$ [5,6]. На вход нейросети подаются изображения I_1, \dots, I_n , и после прохождения сигнала по сети на выходе формируются изображения, которые будет видеть наблюдатель:

$$L = N(W(\vec{X}_L, \vec{X}_S, H), I_1, \dots, I_n), \quad R = N(W(\vec{X}_R, \vec{X}_S, H), I_1, \dots, I_n). \quad (11)$$

Для нейросети функционал (7) будет являться функцией ошибки, замена переменных (8) соответствует введению нелинейной передаточной функции для нейронов, а процесс градиентного спуска (9) является процедурой настройки нейросети, называемой методом обратного распространения ошибки [7].

3. Синтез изображений для стереодисплея

Введем ортогональную систему координат, связанную с наблюдателем. Направим ось Ox вправо, ось Oy – вниз, а ось Oz дополняет их до правой тройки. Пусть начало координат находится в точке, находящейся посередине между глазами наблюдателя. В выбранной системе координат левый глаз будет иметь координату $(x_L, 0, 0)$, а правый глаз – координату $(x_R, 0, 0)$, причем $x_L = -x_R$. Пусть экраны расположены перпендикулярно оси Oz таким образом, чтобы ось проходила через их центры, причем передний экран расположен на расстоянии D от начала координат, а зазор между экранами равен d (Рис. 3).

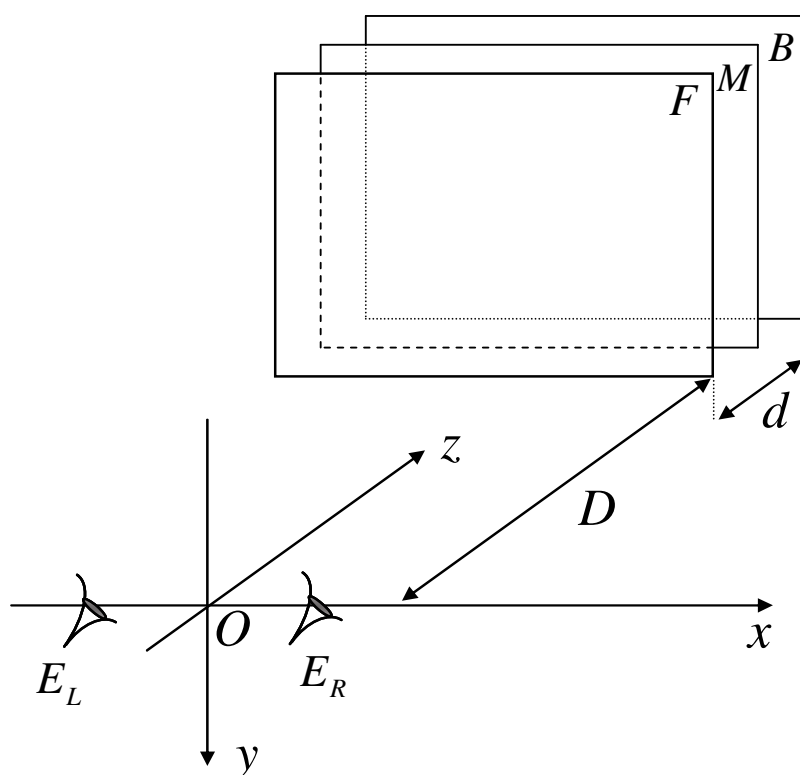


Рис. 3. Формирование стереоизображения дисплеем. Здесь E_L и E_R – левый и правый глаза наблюдателя, F и B – передняя и тыльная ЖК панели, M – диффузор, D – расстояние от наблюдателя до ближней панели, d – зазор между панелями.

Свет от осветителя пройдет через тыльный экран, и после небольшого размытия диффузором пройдет через фронтальный экран, после чего в левый и правый глаза наблюдателя попадут следующие изображения:

$$L(x, y) = I_1(x, y) \iint_{\Omega} K(\xi - ax + bx_L, \eta - ay) I_2(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (12)$$

$$R(x, y) = I_1(x, y) \iint_{\Omega} K(\xi - ax + bx_R, \eta - ay) I_2(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Здесь $I_1(x, y)$ и $I_2(x, y)$ – соответственно интенсивности изображений на ближнем и тыльном экранах, $a = (D + d)/D$, $b = d/D$, а ядро, моделирующее действие диффузора, имеет следующий вид:

$$K(t_1, t_2) = p \cdot e^{-\frac{(t_1^2 + t_2^2)}{\sigma^2}} \quad (13)$$

Здесь p – коэффициент поглощения, а σ – параметр, характеризующий рассеивающие свойства диффузора. Интегрирование в (12) проводится по области Ω , занимаемой изображением на экране.

Для нахождения решения использовался метод, описанный во втором разделе настоящей работы. На Рис. 4 приведены графики изменения ошибки синтеза изображений E в зависимости от номера итерации t для различных значений параметра η . При $\eta = 0.001$ процесс сходится медленно, а при $\eta = 0.005$ ошибка осциллирует в окрестности значения 25%.

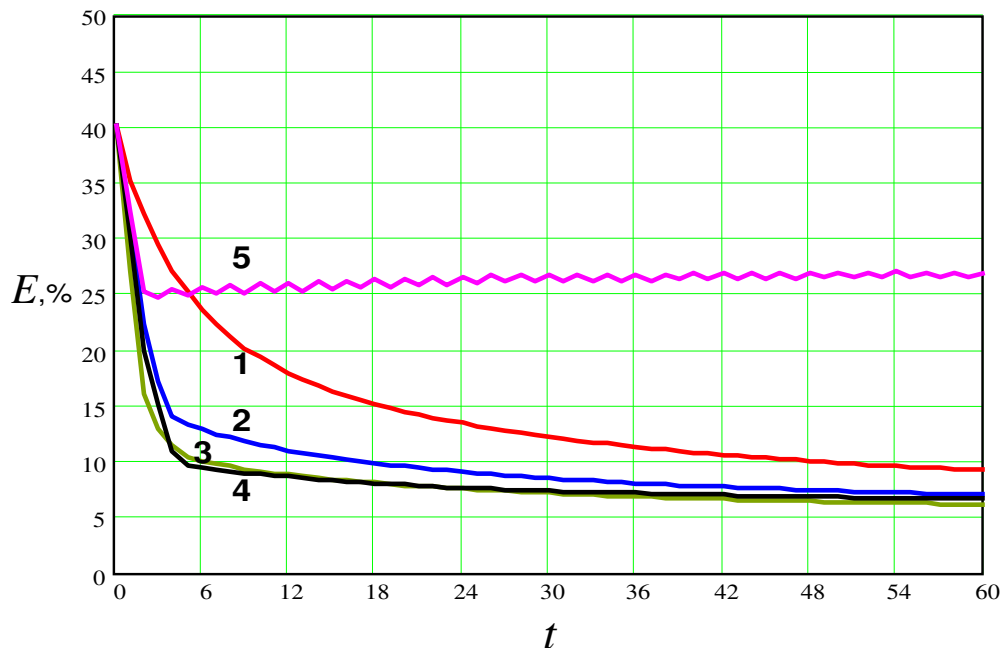


Рис. 4. Зависимость ошибки синтеза изображений E от номера итерации для различных значений параметра η . 1 – $\eta = 0.001$, 2 – $\eta = 0.002$, 3 – $\eta = 0.003$, 4 – $\eta = 0.004$, 5 – $\eta = 0.005$.

Оптимальным значением является $\eta=0.003$. Для параметра μ , характеризующего вклад инерционного члена, было найдено экспериментально оптимальное значение, равное величине η .



А



Б



В



Г

Рис. 5. Результаты численного эксперимента. А, Б – исходная стереопара. В, Г – рассчитанные изображения I_1 и I_2 , которые нужно вывести соответственно на ближний и тыльный экраны.

На Рис. 5 приведены результаты численного моделирования. В верхнем ряду находится исходная стереопара, (I_L, I_R) , а в нижнем ряду – рассчитанные изображения I_1 и I_2 , которые выводятся соответственно на фронтальный и тыльный экраны.

4. Синтез изображений для проекционной системы

Пусть отражающий экран расположен вертикально. Введем прямоугольную систему координат с началом в центре экрана, причем горизонтальная ось Ox и вертикальная ось Oy лежат в плоскости экрана. Ось Oz направим в сторону размещения проекторов, как показано на Рис. 6.

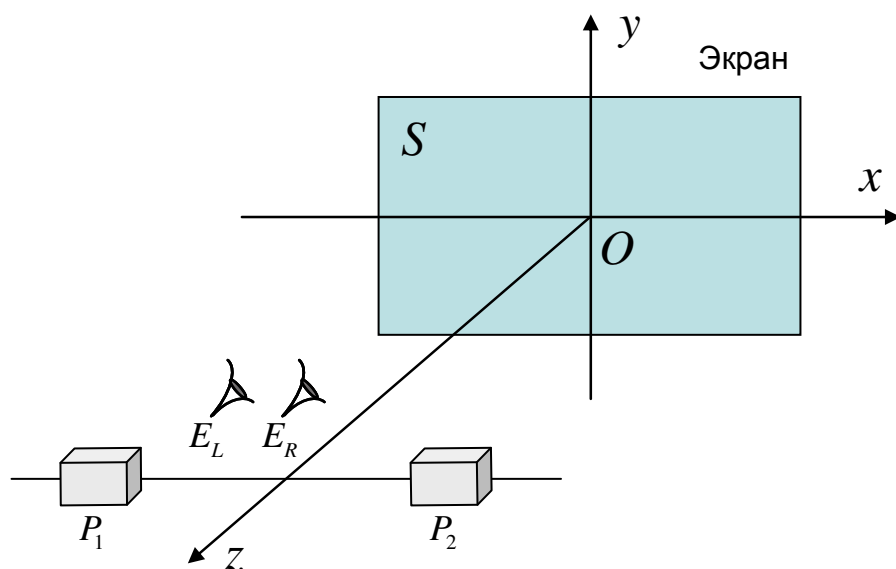


Рис. 6. Проекционная система. S – экран, P_1 и P_2 – проекторы, E_L и E_R – глаза наблюдателя.

Пусть глаза наблюдателя расположены в точках с координатами \vec{E}_L и \vec{E}_R , а проекторы – в точках \vec{P}_1 и \vec{P}_2 , и на проекторы выведены I_1 и I_2 , тогда наблюдатель увидит левым и правым глазами соответственно изображения L и R , которые вычисляются по следующим формулам:

$$L(x, y) = I_1(x, y) \cdot K(\alpha_{11}(x, y, \vec{E}_L, \vec{P}_1)) + I_2(x, y) K(\alpha_{12}(x, y, \vec{E}_L, \vec{P}_2)), \quad (14)$$

$$R(x, y) = I_1(x, y) \cdot K(\alpha_{21}(x, y, \vec{E}_R, \vec{P}_1)) + I_2(x, y) K(\alpha_{22}(x, y, \vec{E}_R, \vec{P}_2)),$$

где α_{ij} – угол между падающим и отраженным лучами света, т.е. между лучом, который, выйдя из j -го проектора, после отражения от экрана в точке (x, y) попадет в i -й глаз наблюдателя, а $K(\alpha)$ – закон отражения света ретрорефлекторным экраном:

$$K(\alpha) = P \cdot \exp\left(-\frac{\alpha^2}{\sigma^2}\right), \quad (15)$$

где P – величина поглощения света экраном, а σ – параметр, характеризующий рассеивающие свойства экрана.

Для синтеза изображений для проекторов по заданной стереопаре (I_L, I_R) применялся метод, описанный в разделе 2. На Рис. 7 приведены графики изменения ошибки синтеза изображений E в зависимости от номера итерации t для различных значений параметра η . При $\eta=0.05$ процесс сходится медленно, а начиная со значения $\eta=1.1$ перестает сходиться вовсе.

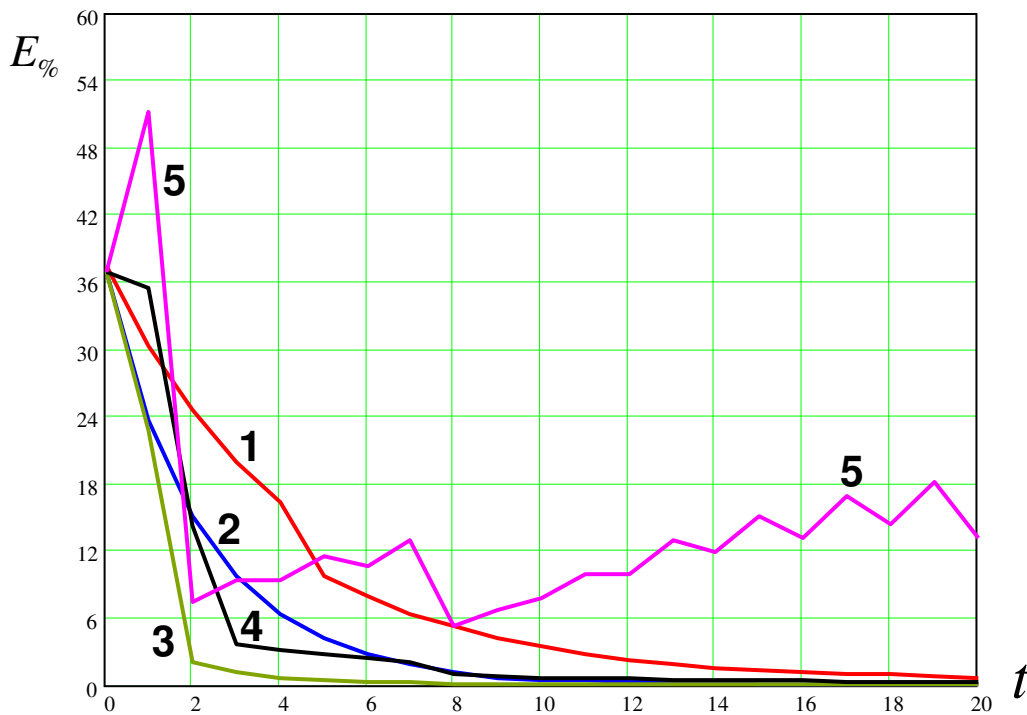


Рис. 7. Значения ошибки синтеза изображений E в зависимости от номера итерации t для различных значений параметра η . 1 – $\eta=0.05$, 2 – $\eta=0.1$, 3 – $\eta=0.9$, 4 – $\eta=1.0$, 5 – $\eta=1.1$.

Оптимальным значением этого параметра является $\eta=0.9$, при котором процесс сходится за 4–5 итераций, достигая ошибки менее одного про-

цента. Значение параметра μ , характеризующего вклад инерционного члена, выбиралось равным η .

На Рис. 8 приведены результаты численных расчетов. В верхнем ряду, Рис. 8 А, Б, находится исходная стереопара, (I_L, I_R) , а в нижнем ряду – рассчитанные изображения I_1 и I_2 , которые должны быть выведены на проекторы.



А



Б



В



Г

Рис. 8. Результаты численных расчетов. А, Б – исходная стереопара (I_L, I_R) . В, Г – рассчитанные изображения I_1 и I_2 , которые нужно вывести на левый и правый проекторы.

5. Оптимизация внутренних параметров стереосистемы

При изготовлении стереосистемы существует совокупность технических параметров H , от которых зависит качество воспроизводимого изобра-

жения. Для стереодисплея основными параметрами являются апертура пикселей, расстояние между панелями и характеристика рассеяния диффузора. Для проекционной системы к важнейшим параметрам относится параметр рассеяния экрана, а также расстояние между проекторами и удаленность проекторов от экрана.

Введем декартову систему координат с центром в месте расположения наблюдателя, ось Ox направим вправо, вертикальную ось Oy – вниз, а ось Oz – в сторону экрана (Рис. 9).

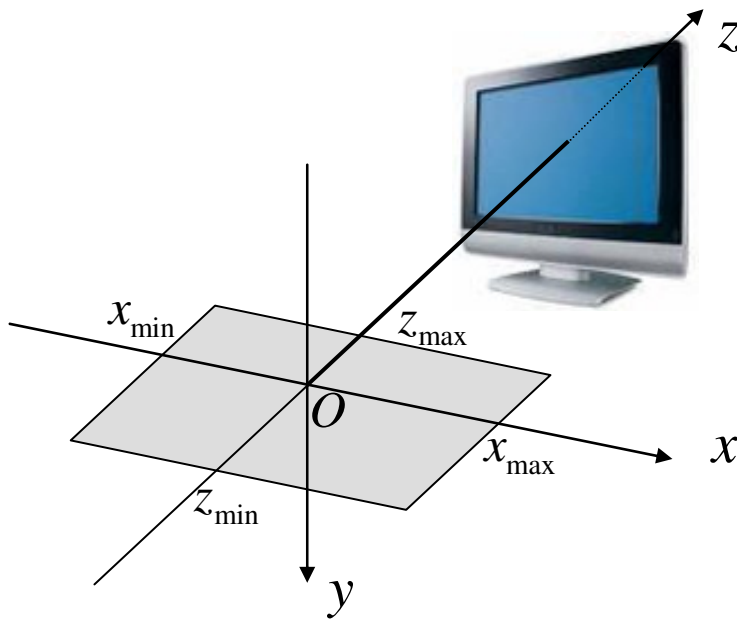


Рис. 9. При оглядывании экрана стереосистемы наблюдатель может перемещаться в пределах области $[x_{\min}, x_{\max}] \times [z_{\min}, z_{\max}]$.

Пусть нам задана стереопара (I_L, I_R) . Зафиксируем значения параметров H и рассчитаем изображения (L, R) . Пусть наблюдатель переместился в некую точку с координатами (x, z) . Качество стереоизображения в этой точке характеризуется следующей величиной:

$$e_{xz} = \sqrt{\frac{1}{2N_h N_w} \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{j=1}^{N_w} (L(i, j) - I_L(i, j))^2 + \frac{1}{2N_h N_w} \sum_{i=1}^{N_h} \sum_{j=1}^{N_w} (R(i, j) - I_R(i, j))^2} \cdot \frac{100\%}{255}, \quad (16)$$

где N_h и N_w – число пикселей в изображении соответственно по горизонтали и вертикали. По сути, величина e_{xz} равна ошибке воспроизведения стереоизображения, выраженной в процентах. Чем ниже эта ошибка, тем точнее при данном положении наблюдателя система воспроизводит требуемое изображение. Важно, чтобы при перемещении наблюдателя в некоторых пределах он также видел стереоизображение, близкое к заданному. Поэтому нашей задачей является выбор таких параметров системы H , при которых достигается максимальный размер области $P(H)$, в которой хорошо видно заданное стереоизображение. Для вычисления величины $P(H)$ введем в области возможного положения наблюдателя $[x_{\min}, x_{\max}] \times [z_{\min}, z_{\max}]$ равномерную сетку:

$$x_j = x_{\min} + (j-1) \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{N_x - 1}, \quad j = 1, \dots, N_x, \quad (17)$$

$$z_i = z_{\min} + (i-1) \frac{(z_{\max} - z_{\min})}{N_z - 1}, \quad i = 1, \dots, N_z,$$

где N_x и N_z – число узлов сеток соответственно по x и z .

Проведенные натурные испытания показали, что наблюдатель не видит дефектов в стереоизображении, если величина ошибки (16) не превышает некоего предельного значения e_{\min} . Поэтому мы будем численно характеризовать размер стереозоны отношением площади области, в которой ошибка e_{xz} не превышает заданную величину e_{\min} , к общей площади области обзора $[x_{\min}, x_{\max}] \times [z_{\min}, z_{\max}]$. При дискретных перемещениях наблюдателя по сетке (17) эта величина вычисляется следующим образом. Введем сеточную функцию

$$P_{xz} = \begin{cases} 1 & - \text{если } e_{xz} \leq e_{\min} \\ 0 & - \text{если } e_{xz} > e_{\min} \end{cases}, \quad (18)$$

тогда

$$P(H) = \frac{1}{N_x N_z} \sum_{i=1}^{N_z} \sum_{j=1}^{N_x} P_{ji} \cdot 100\%. \quad (19)$$

Теперь можно ввести сетку в области возможного изменения параметров H и вычислить в ее узлах значения $P(H)$. Далее, если сетка имеет доста-

точно мелкий шаг, можно путем перебора найти оптимальные значения параметров, либо по вычисленным значениям на грубой сетке построить аппроксимирующие зависимости, из которых найти оптимальные совокупности.

На Рис. 10 приведены линии уровня функции $f(x, z) = e_{xz}$ в стандартной зоне обзора для 17" дисплея при расстояниях между панелями 2 мм и 6 мм (соответственно Рис. 10.А и Рис. 10Б).

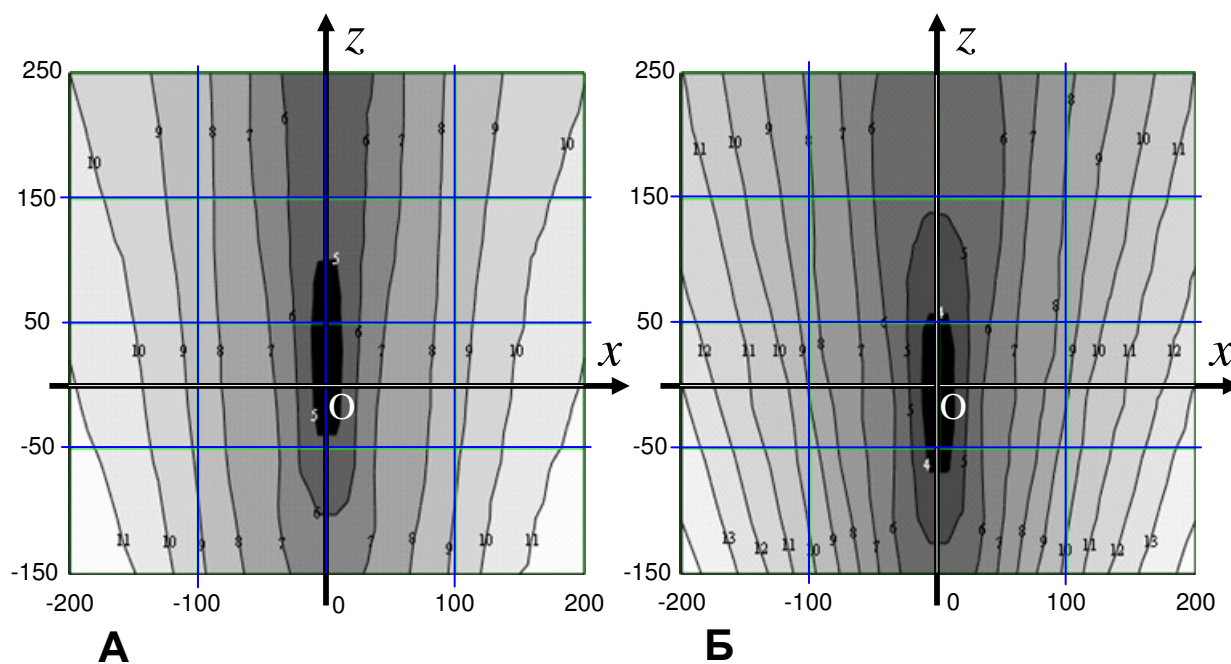


Рис. 10. Линии уровня функции $f(x, z) = e_{xz}$ при расстоянии между панелями 2мм (А) и 6мм (Б). Расстояния по x и z выражены в миллиметрах.

Видно, что с увеличением расстояния между панелями значение ошибки при расчетном положении зрителя (0,0) уменьшается, но в то же время на периферии области возрастает. На качество стереоизображения, воспроизводимого дисплеем, оказывают влияние следующие параметры:

- a – апертура пикселей дисплея,
- d – расстояние между тыльной и фронтальной панелями,
- σ – параметр, характеризующий рассеяние диффузора.

На основе проведенных численных расчетов удалось построить следующую аппроксимационную формулу для функции $P(H)$, которая характеризует ширину стереозоны.

$$P(a, d, \sigma) = 36.4 \cdot a^{0.36} e^{-\left(\frac{d-5.01}{4.55}\right)^2} e^{-\left(\frac{\sigma-0.028}{0.19}\right)^2}. \quad (20)$$

Эта формула получена при $e_{\min} = 5\%$ и имеет точность 94% на всей совокупности данных, полученных в результате расчетов. Из нее следует, что влияние апертуры на ширину стереозоны является достаточно слабым; оптимальным значением расстояния между панелями являются $d \approx 5$ мм, а оптимальным значением параметра рассеяния является $\sigma \approx 0.03$.

Для проекционной системы были произведены аналогичные расчеты. На Рис. 11 изображены линии уровня функции $f(x, z) = e_{xz}$ для следующих параметров стереосистемы: расстояние от экрана до проекторов $d_S = 4$ м, расстояние между проекторами $d_P = 20$ см, расстояние от наблюдателя до экрана $d_E = 4$ м. Левая картинка соответствует $\sigma = 0.03$, правая – $\sigma = 0.05$.

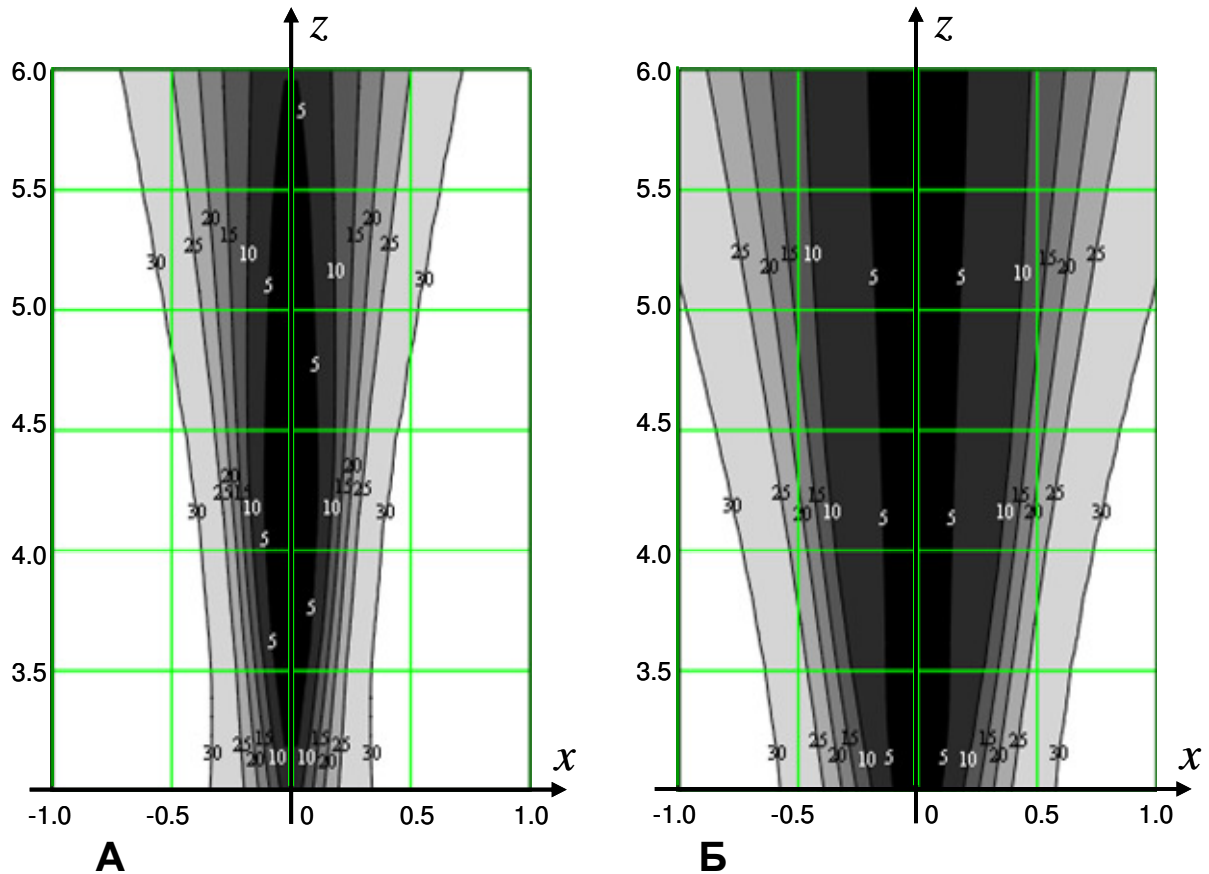


Рис. 11. Линии уровня функции $f(x, z) = e_{xz}$ при следующих значениях параметров: $d_S = 4$ м, $d_P = 20$ см, $d_E = 4$ м, $\sigma = 0.03$ (А) и $\sigma = 0.05$ (Б). Расстояния выражены в метрах.

Видно, что площадь стереозоны возрастает при увеличении коэффициента рассеяния σ . Технические параметры проекционной системы определяются тремя основными параметрами: σ характеризует рассеивающие свойства материала, из которого изготовлен экран. Два других параметра, расстояние от экрана до проекторов d_s и расстояние между проекторами d_p , определяют геометрические характеристики проекционной системы. Поскольку свойства имеющегося экрана заданы, а удаленность проекторов от экрана определяется конструктивными особенностями кинозала, то единственным параметром, который сравнительно легко можно изменить, является расстояние между проекторами d_p . Поэтому представляется разумным сформулировать задачу оптимизации параметров системы следующим образом: при известных значениях параметров σ и d_s найти такое d_p , при котором достигается максимум площади стереозоны $P(\sigma, d_s, d_p)$. На основе многочисленных расчетов, проведенных при различных сочетаниях всех параметров системы, удалось построить приближенные формулы для определения расстояния между проекторами d_p , при которых размер стереозоны будет максимальным:

$$d_p \approx (0.6 + 130\sigma)d_s + 120\sigma. \quad (21)$$

Здесь расстояние от проекторов до экрана d_s выражено в метрах, а расстояние между проекторами d_p – в сантиметрах. Эта формула получена при $e_{\min} = 5\%$ и имеет точность 97.1% на всей совокупности данных, для которых были проведены расчеты.

Литература

1. А. Лукьяница, А. Путилин. Способ воспроизведения изображения объекта. Российское агентство по патентам и товарным знакам, RU 2158949 C1, 1999, 16с.
2. Lukyanitsa A.A., Putilin A.N. Visualization of three dimensional images and multi aspect imaging. United States Patent 6985290 B2, 2006.

3. Lukyanitsa A.A., Putilin A.N. Three-dimensional image projection employing retro-reflective screens. United States Patent 6843564 B2, 2005.
4. Ф.П. Васильев. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1908, 520с.
5. А.А. Лукьяница. Математическое моделирование автостереоскопических устройств. ВАНТ, сер. Математическое моделирование физических процессов, Вып.1, 2007, с.74-82.
6. Lukyanitsa A., Kanashin K., Putilin A. Stereodisplay with neural network image processing. Proc. SPIE Conference, 20-15 Jan 2002, San Jose, CA, 5p.
7. С.Хайкин. Нейронные сети: полный курс. М.: Изд. дом «Вильямс», 1006, 1104с.