

Определение основных геометрических параметров отображения трёхмерного пространства стереорентгенотелевизионной системой

Г. В. Мамчев

По результатам анализа конструктивных особенностей стереорентгенотелевизионных устройств установлены аналитические выражения отображения трёхмерного пространства при теневой стереопроекции. Произведена оценка геометрических искажений трёхмерного пространства, отображаемого стереотелевизионным устройством радиационного типа, выполнен расчёт глубинной разрешающей способности подобных установок.

Ключевые слова: стереотелевизионное устройство теневого типа, рентгеновское излучение, отображение трёхмерного пространства, аналитическое соответствие, геометрические искажения, ортоскопическая и псевдоскопическая стереомодели, порог глубинного разрешения.

1. Введение

При проведении научных исследований, в дефектоскопии и интроскопии, технической и медицинской диагностике всё чаще начинают применяться стереотелевизионные системы радиационного типа, основанные на разной проникающей способности рентгеновских лучей при прохождении через различные среды. При этом важнейшими параметрами подобных систем являются уровень геометрических искажений воспринимаемого стереоскопического пространства и глубинная разрешающая способность, характеризуемая числом разрешаемых планов по глубине $P_{пл}$.

Вследствие этого большой практический интерес представляет определение аналитического соответствия между геометрическими характеристиками отображаемых физических объектов и воспринимаемым трёхмерным пространством в стереорентгенотелевизионных системах. Это объясняется тем, что найденные математические выражения позволяют анализировать уровень и причины геометрических искажений в стереотелевизионных изображениях и разработать способы их минимизации, а также определить абсолютный линейный порог глубинного разрешения, то есть минимальное расстояние между отдельными разрешаемыми планами.

Цель настоящей статьи заключается в анализе типовой конструкции стереорентгенотелевизионного устройства и оценке геометрических параметров отображения трёхмерного пространства.

2. Конструктивные особенности стереотелевизионного устройства радиационного типа

Стереотелевизионные устройства, предназначенные для объёмной интроскопии и дефектоскопии, могут быть построены с использованием принципов теневой стереопроекции, при которой теневые изображения стереопары формируются в плоскости промежуточного экрана без масштабных преобразований, обусловленных оптическими системами. На практике для реализации теневого (радиационного) метода наиболее часто применяется рентгеновское излучение. Рентгеновские лучи, проходя через различные участки сложного по своей внутренней структуре объекта, поглощаются в неодинаковой степени и создают теневые изображения. Для визуализации изображений, полученных в рентгеновских лучах, используются флюоресцирующие экраны, чувствительные к рентгеновскому излучению электронно-оптические преобразователи (ЭОП) и рентгеновидиконы различных типов, например ЛИ444, ЛИ473, ЛИ496. Основным недостатком флюоресцирующих экранов заключается в резком снижении яркости теневых изображений при увеличении толщины или плотности контролируемых объектов. Поэтому с целью повышения чувствительности стереорентгеновизионных установок при регистрации радиационных изображений в подобных случаях целесообразно непосредственное использование рентгеночувствительных ЭОП, обладающих высокими значениями коэффициента усиления яркости. При радиационном контроле крупногабаритных объектов для регистрации теневых изображений больших размеров, как правило, используются флюоресцирующие экраны с последующим переносом визуализированных изображений на фотокатод ЭОП.

Принцип действия стереорентгеновизионной установки заключается в следующем [1]. Излучение рентгеновских трубок последовательно во времени просвечивает объект диагностики (см. рис. 1). Поэтому на входном экране ЭОП возникает сначала, например, правое, а затем левое теневые изображения внутренней структуры объекта в рентгеновских лучах. С помощью ЭОП, чувствительного к рентгеновскому излучению, производится преобразование рентгеновского теневого изображения в видимое и осуществляется увеличение его яркости. С выходного экрана ЭОП видимые теневые изображения (левое и правое) объекта с помощью объектива поочередно проецируются в плоскость полупрозрачного зеркала, установленного под углом в 45° к направлению оптической оси объектива. Далее на пути световых лучей располагается обтюратор изображений, который последовательно во времени пропускает световые лучи в направлении правой и левой передающих телевизионных камер. Особенностью конструкции передающих камер является то, что они выполнены на видиконах с регулируемой памятью, достаточно длительное время сохраняющих основные качественные показатели в условиях радиационного облучения, и работают в двух режимах. Первый режим – это запоминание видимого теневого изображения внутренней структуры объекта диагностики. Запоминание левого и правого изображений объекта осуществляется последовательно во времени. Второй режим – это считывание визуальной информации, которое осуществляется одновременно в обеих передающих камерах с частотой кадров, принятой в телевизионных системах. Видеосигналы с передающих камер по каналу связи поступают в стереотелевизионное видеоконтрольное устройство, которое может быть выполнено на основе любого известного устройства пространственной селекции изображений. Синхронизация всех устройств стереотелевизионной установки, а также обеспечение нужного режима работы осуществляются с помощью блока формирования управляющих импульсов. Обтюратор изображений может быть как электромеханическим, так и оптико-электронным, выполненным на базе жидкокристаллических ячеек. Величина базиса рентгеновских трубок устанавливается различной. Следует заметить, что в стереорентгеновизионных установках часто используются специальные двухфокусные рентгеновские трубки.

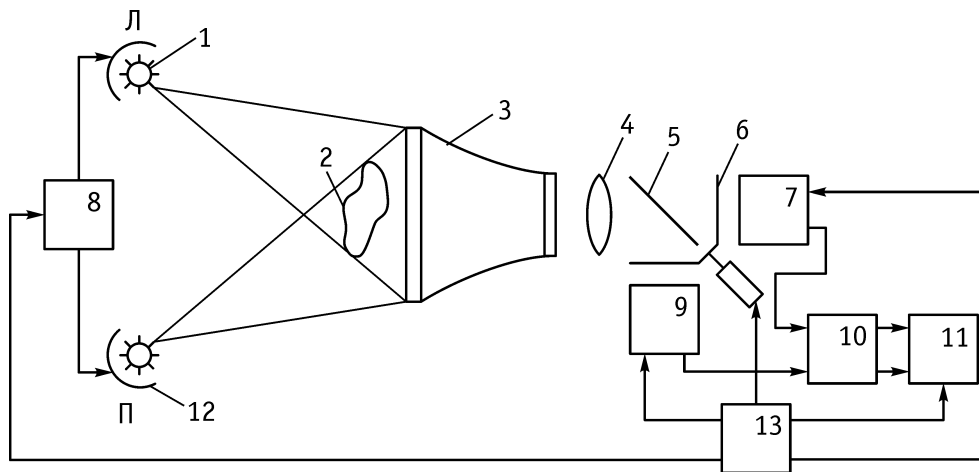


Рис. 1. Функциональная схема стереорентгенотелевизионной установки:

- 1 – левая рентгеновская трубка; 2 – объект диагностики; 3 – ЭОП; 4 – объектив;
 5 – полупрозрачное зеркало; 6 – obtюратор изображений; 7 – правая передающая камера;
 8 – устройство управления рентгеновскими трубками; 9 – левая передающая камера;
 10 – канал связи; 11 – стереотелевизионный видеомонитор; 12 – правая рентгеновская трубка;
 13 – блок управления и формирования синхронизирующих импульсов

3. Получение аналитических выражений, характеризующих отображение трёхмерного пространства при теневой стереопроекции

В стереотелевизионных устройствах отображения визуальной информации можно воспроизводить два вида теневых (радиационных) стереоизображений: ортоскопические и псевдоскопические. Ортоскопическое стереоизображение соответствует рассматриванию объекта контроля со стороны, противоположной источникам, например, рентгеновского излучения, оно наблюдается в заэкранном пространстве стереотелевизионного экрана. Псевдоскопическое стереоизображение соответствует рассматриванию объекта со стороны источников рентгеновского излучения, оно наблюдается в предэкранном пространстве стереотелевизионного экрана. Как ортоскопическое, так и псевдоскопическое теневые изображения позволяют правильно расшифровать сложную по структуре картину радиационного изображения объекта контроля. Для изменения характера воспроизводимых теневых стереоскопических изображений достаточно осуществить замену левого изображения стереопары правым и наоборот. Например, при рассматривании псевдоскопических теневых изображений глаза наблюдателя должны воспринимать изображения стереопары стереоинвертными, так как правый глаз видит левое изображение, а левый – правое.

Из анализа рис. 2, иллюстрирующего формирование стереопары радиационных изображений, получим зависимости между координатами (X_1, Y_1, Z_1) точки A реального объекта контроля и ее координатами $(x_{\text{л}}, x_{\text{п}}, z = z_{\text{л}} = z_{\text{п}})$ и параллаксом p на флуоресцирующем экране или на входном экране ЭОП, который совпадает с плоскостью ZOX выбранной системы координат. При этом схему формирования оптического изображения в стереорентгенотелевизионном устройстве поясняет рис. 3. В зависимости от номера квадранта плоскости ZOX , нумерация которой соответствует плоскости $Z'O'X'$, (см. рис. 3), значения координат $x_{\text{л}}$, $x_{\text{п}}$, z и параллакса p определяются системой уравнений (1):

$$\begin{cases} x_{л,пI} = |x_{п,лII}| = |x_{п,лIII}| = x_{л,пIV} = |HX_1 \mp aY_1| / (H - Y_1), \\ z = z_I = z_{II} = |z_{III}| = |z_{IV}| = H |Z_1| / (H - Y_1), \\ p = p_I = p_{II} = p_{III} = p_{IV} = 2aY_1 / (H - Y_1), \end{cases} \quad (1)$$

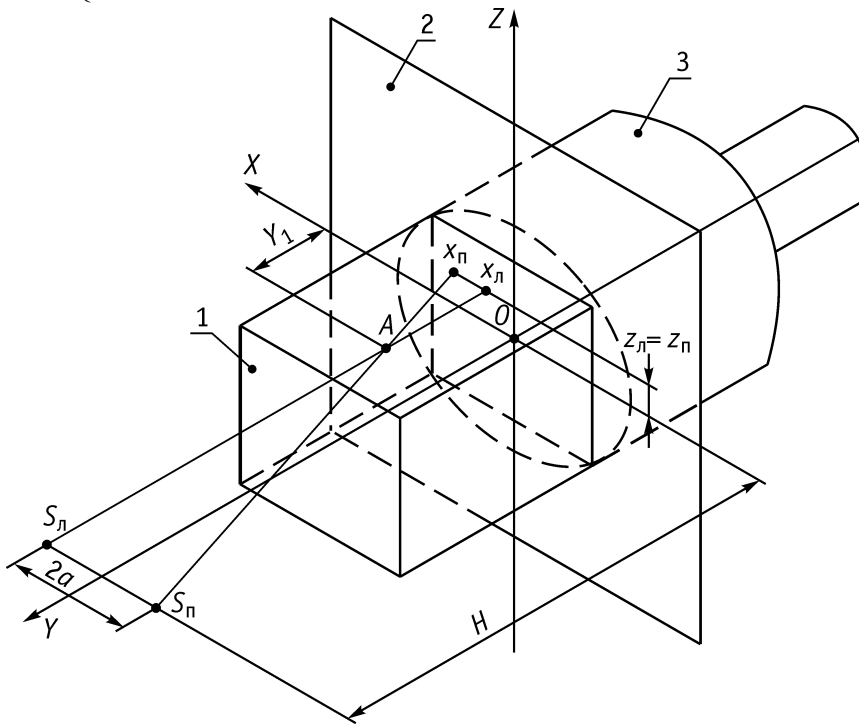


Рис. 2. Схема получения стереопары радиационных изображений объекта:

1 – объект контроля; 2 – флюоресцирующий экран; 3 – ЭОП

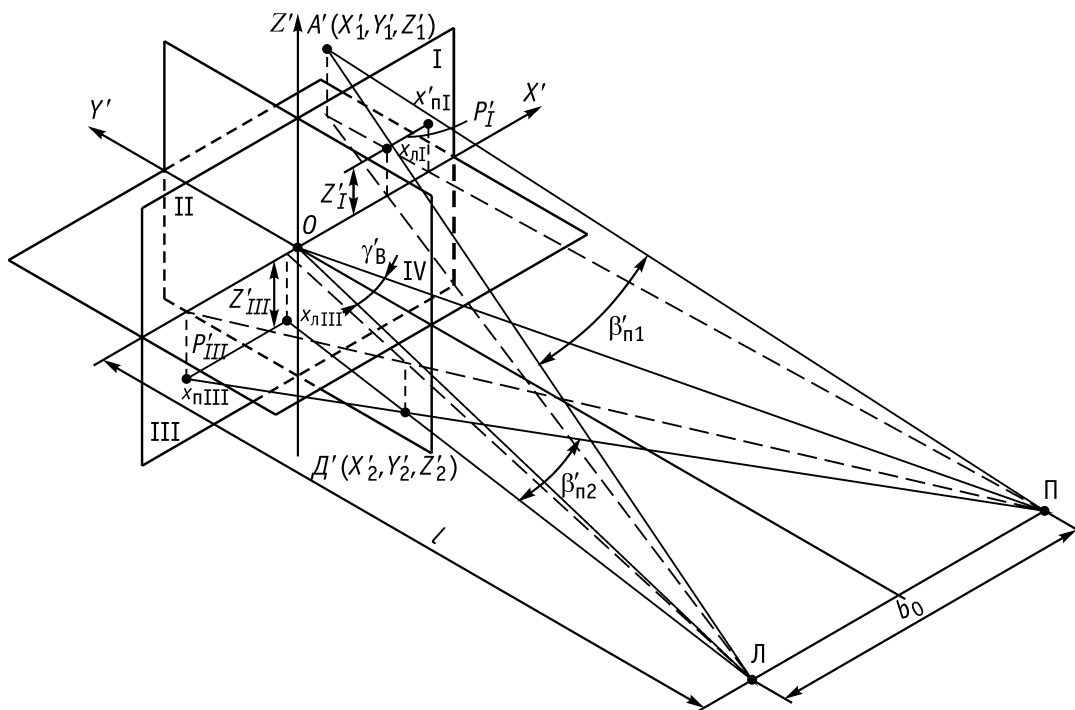


Рис. 3. Схема восприятия стереоскопической модели объекта в стереотелевизионном устройстве

где H – расстояние источников рентгеновского излучения от флюоресцирующего экрана; $2a$ – расстояние между источниками рентгеновского излучения $S_{л}$, $S_{п}$.

При ортоскопическом преобразовании радиационных изображений в телевизионные на стереотелевизионном экране точка A анализируемого объекта будет воспроизведена с координатами $x'_{\text{л}}, x'_{\text{п}}, z'$, а при псевдоскопическом преобразовании – с координатами $x''_{\text{л}}, x''_{\text{п}}, z''$. Для данного этапа формирования стереотелевизионного изображения справедливы следующие соотношения:

$$\begin{cases} x'_{\text{п}} = M x_{\text{п}}, & x'_{\text{л}} = M x_{\text{л}}, & z' = M z, \\ x''_{\text{п}} = M x_{\text{л}}, & x''_{\text{л}} = M x_{\text{п}}, & z'' = M z, \end{cases} \quad (2)$$

где M – масштабный коэффициент стереотелевизионного устройства отображения с учётом ЭОП.

Учёт соотношений (1), (2) в выражениях (3), полученных из рассмотрения рис. 3 и оценивающих значение координат $X'_{1,2}, Y'_{1,2}, Z'_{1,2}$ точек A' и D' стереомодели объекта, позволяет определить уравнения, характеризующие зависимости координат воспринимаемых точек объекта в ортоскопическом и псевдоскопическом теневых изображениях, воспроизводимых стереотелевизионным устройством, от координат реальных точек:

$$\begin{cases} |X'_{1,2}| = b_0 (x'_{\text{п}} + x'_{\text{л}}) / 2 (b_0 \mp p'_{1,2}), \\ |Y'_{1,2}| = lp'_{1,2} / (b_0 \mp p'_{1,2}), \\ |Z'_{1,2}| = z' b_0 / (b_0 \mp p'_{1,2}), \end{cases} \quad (3)$$

где $x'_{\text{п}}, x'_{\text{л}}, z'$ – координаты точек объекта в телевизионных изображениях стереопары в плоскости стереоэкрана; $p'_{1,2}$ – линейный параллакс точек объекта A и D в плоскости стереоэкрана.

Для примера приведем аналитические соотношения (4), связывающие значения координат $X'_1, X''_1, Y'_1, Y''_1, Z'_1, Z''_1$ точек стереомодели, воспринимаемой соответственно в заэкранном и предэкранном пространствах, от координат реальной точки A объекта контроля (см. рис. 2).

$$\begin{aligned} X'_1, X''_1 &= \frac{0.5b_0 M H X_1}{0.5b_0 H \mp (M a \pm 0.5b_0) Y_1}, \\ Y'_1, Y''_1 &= \frac{a M l Y_1}{0.5b_0 H \mp (M a \pm 0.5b_0) Y_1}, \\ Z'_1, Z''_1 &= \frac{0.5b_0 M H Z_1}{0.5b_0 H \mp (M a \pm 0.5b_0) Y_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

Из анализа соотношений (4) следует, что при воспроизведении ортоскопических радиационных изображений потенциально возможное значение глубины зоны стереовидения (вдоль оси OY , см. рис. 2) ограничено флюоресцирующим экраном и плоскостью, параллельной экрану, расстояние от которой определяется неравенством

$$Y_{1\text{max}} < 0.5b_0 H / (0.5b_0 + M a),$$

в противном случае $X'_1, Y'_1, Z'_1 = \infty$. При воспроизведении псевдоскопических радиационных изображений подобное ограничение отсутствует.

4. Анализ геометрических искажений трёхмерного пространства, отображаемого стереорентгенотелевизионным устройством

Условием геометрически правильного воспроизведения в целом как ортоскопических, так и псевдоскопических радиационных изображений при отсутствии перспективных искажений являются равенство между собой результирующих коэффициентов масштабного увеличения стереорентгенотелевизионного устройства $K'_x = X'/X_1$, $K'_y = Y'/Y_1$, $K'_z = Z'/Z_1$; $K''_x = X''/X_1$, $K''_y = Y''/Y_1$, $K''_z = Z''/Z_1$ в направлении осей $O'X'$, $O'Y'$, $O'Z'$ и независимость их от координат анализируемых точек объекта. Коэффициенты $K'_{x,y,z}$, $K''_{x,y,z}$ учитывают преобразование линейных размеров объекта контроля в процессе теневой проекции, масштабные преобразования стереотелевизионного устройства, в конструкцию которого входит ЭОП, особенности восприятия трёхмерного образа. Поэтому оценить результирующие геометрические искажения можно по виду аналитических зависимостей коэффициентов $K'_{x,y,z}$ и $K''_{x,y,z}$ от координат отображаемых точек объектов исследования.

Из анализа систем уравнений (4) следует, что в случае воспроизведения как ортоскопических, так и псевдоскопических радиационных изображений коэффициент анаморфирования равен: $K_{ан} = al/0,5b_0H$. Равенство результирующих масштабных коэффициентов между собой ($K_{ан} = 1$) обеспечивается только в частном случае при соблюдении условия $b_0H = 2al$. При этом для ортоскопических радиационных изображений справедливо следующее соотношение [2]:

$$K'_{общ} = K'_x = K'_y = K'_z = 0.5b_0MH / [0.5b_0H - (0.5b_0 + Ma)Y_1]. \quad (5)$$

$K'_{общ} = \infty$ при условии, что $Y_{1max} = 0.5b_0H / (0.5b_0 + Ma)$. Соответственно для псевдоскопических радиационных изображений справедливо выражение вида

$$K''_{общ} = K''_x = K''_y = K''_z = 0.5b_0MH / [0.5b_0H + (Ma - 0.5b_0)Y_1]. \quad (6)$$

Для каждой точки объекта контроля коэффициенты $K'_{общ}$ и $K''_{общ}$ являются функциями ординаты Y_1 . Для примера на рис. 4 приведены рассчитанные по выражениям (5), (6) зависимости результирующих коэффициентов масштабного увеличения $K'_{общ}$, $K''_{общ}$ для различных значений M при выполнении условия $b_0H = 2al$. Из анализа графических зависимостей рис. 4 видно, что при визуальном наблюдении стереоскопическая модель объекта контроля воспринимается в целом деформированной (значения коэффициентов $K'_{общ}$ растут, а $K''_{общ}$ уменьшаются по мере удаления точки объекта от плоскости стереоэкрана, на которой формируются радиационные изображения. При восприятии псевдоскопических радиационных изображений результирующие деформации стереоскопической модели объекта контроля проявляются значительно меньше по сравнению с воспроизведением ортоскопических изображений.

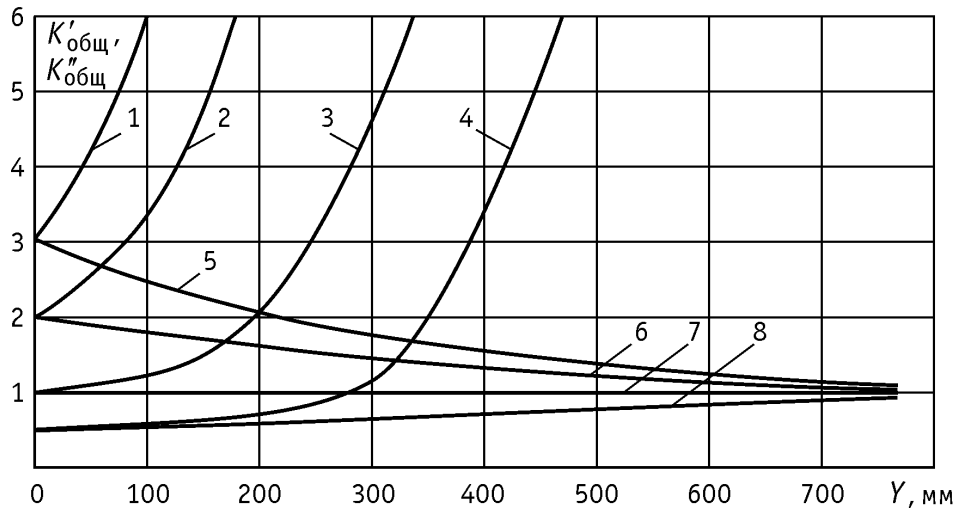


Рис. 4. Зависимости результирующих коэффициентов масштабного увеличения:

Ортоскопические изображения:

1 – $M = 3$; 2 – $M = 2$; 3 – $M = 1$; 4 – $M = 0.5$

Псевдоскопические изображения:

5 – $M = 3$; 6 – $M = 2$; 7 – $M = 1$; 8 – $M = 0.5$

При воспроизведении псевдоскопических теневых изображений при соблюдении равенства $Ma = 0,5b_0$ имеется возможность обеспечения независимости коэффициентов $K''_{общ}$ от координат анализируемых точек объекта. Для этого при выборе основных геометрических параметров теневой стереопроекции должны учитываться равенства

$$a = 0.5b_0/M, \quad H = l/M,$$

которые являются условием геометрически верного отображения трёхмерных свойств анализируемых объектов тенью способом.

5. Расчёт глубинной разрешающей способности стереотелевизионной установки радиационного типа

Число разрешаемых планов $\Pi_{пл}$ в стереотелевизионной радиационной установке определяется выражением

$$\Pi_{пл} = Y_{1max} / \Delta Y_{\Sigma min}, \quad (7)$$

где Y_{1max} – допустимое значение глубинного размера анализируемых объектов; $\Delta Y_{\Sigma min}$ – абсолютный линейный порог глубинного разрешения.

Для определения величины $\Delta Y_{\Sigma min}$ стереотелевизионной установки, например рентгеновского типа, рассмотрим рис. 5, на котором представлена схема стереоскопического просвечивания объекта контроля с учётом диаметра оптического фокуса d_{ϕ} рентгеновских трубок. Линейный порог глубинного разрешения ΔY_{Σ} , установленный геометрическим способом из рис. 5, оценивается следующим соотношением:

$$\Delta Y_{\Sigma} = \Delta Y_1 + \Delta Y_2 = \frac{\Delta_{деф} (H - Y_1)}{2a - (d_{\phi} - \Delta_{деф})} + \frac{\Delta_{деф} (H - Y_1)}{2a + (d_{\phi} - \Delta_{деф})} = \frac{4a\Delta_{деф} (H - Y_1)}{4a^2 - (d_{\phi} - \Delta_{деф})^2}, \quad (8)$$

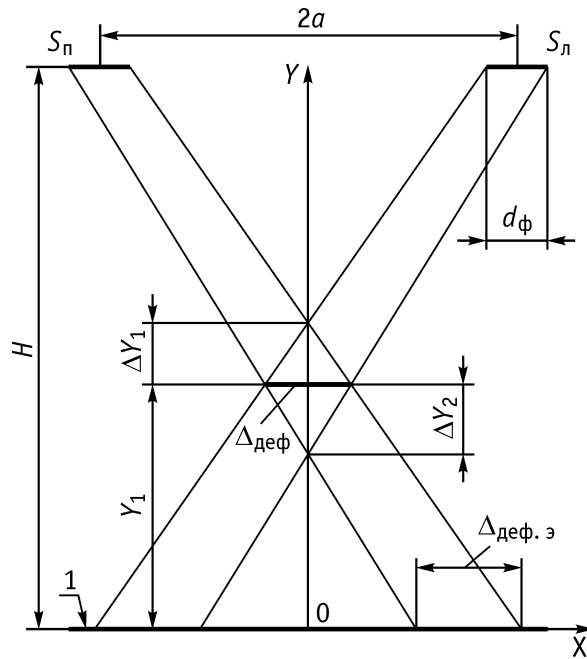


Рис. 5. К определению глубинной разрешающей способности радиационной установки:

1 – плоскость стереотелевизионного экрана

где $\Delta_{\text{деф}}$ – минимальный поперечный размер внутреннего дефекта, разрешаемого установкой.

Чтобы оценить потенциально допустимый порог глубинного разрешения, следует учесть коэффициент проецирования $k_{\text{пр}}$, определяемый выражением: $k_{\text{пр}} = \Delta_{\text{деф.э}} / \Delta_{\text{деф}}$, где $\Delta_{\text{деф.э}}$ – проекция поперечного размера внутреннего дефекта на флюоресцирующем экране. Из рис. 5 видно, что

$$k_{\text{пр}} = \Delta_{\text{деф.э}} H / [\Delta_{\text{деф}} (H - Y_1) + d_{\text{ф}} Y_1]. \quad (9)$$

Преобразовав выражение (8) в соответствии с (9) с учётом $\Delta_{\text{деф.э. min}}$, получим соотношение, непосредственно характеризующее линейный порог глубинного разрешения установки

$$\Delta Y_{\Sigma \text{ min}} = \frac{4Na(H - Y_1)[\Delta_{\text{деф.э. min}}(H - Y_1) + d_{\text{ф}} Y_1]}{4a^2 H^2 - [d_{\text{ф}}(H + Y_1) - \Delta_{\text{деф.э. min}}(H - Y_1)]^2}. \quad (10)$$

Анализ на экстремум показал, что выражение (10) достигает своего минимума при $Y_1 \rightarrow H$ и при $d_{\text{ф}} = \Delta_{\text{деф}} \simeq \Delta_{\text{деф.э}}$.

Величина $\Delta_{\text{деф.э. min}}$ может быть установлена по результирующей контрастно-частотной характеристике стереорентгенотелевизионной установки. Однако в режиме малых экспозиций, обусловленном принципом радиационного просвечивания, минимально разрешаемое значение $\Delta_{\text{деф.э. min}}$ определяется в основном разрешающей способностью флюоресцирующего экрана или ЭОП, которая оценивается значением 2...3 лин/мм [3]. С целью учёта возможных искажений при телевизионном воспроизведении стереопары радиационных изображений с доверительной вероятностью $P = 0.95$ в соотношении (10) следует учитывать величину $\Delta'_{\text{деф.э. min}} = \Delta_{\text{деф.э. min}} \pm 1.8 \sigma_{\Sigma} / M$, где σ_{Σ} – результирующее среднее квадратичное

ческое отклонение величины $\Delta_{\text{деф.э min}}$, пересчитанное в плоскость воспроизводящего стереотелевизионного экрана. Практически $\sigma_{\Sigma} \approx 0.6b_3/k_{\phi}z_c$.

Для определения глубинной разрешающей способности стереорентгенотелевизионной установки воспользуемся выражениями (7), (10). Расчёт числа реально разрешаемых планов по глубине контролируемого объекта проведём для стереорентгенотелевизионной установки, в которой радиационные изображения стереопары формируются последовательно на флюоресцирующем экране с размерами 260×350 мм, изготовленном на основе порошковых люминофоров, или на монокристаллическом люминесцентном экране. Предполагается, что в качестве передающих трубок используются суперкремниконы, которые могут иметь в 2...3 раза более высокую разрешающую способность по сравнению с передающими трубками, используемыми, например, в вещательном телевидении. Считаем, что воспроизведение стереотелевизионных изображений объектов контроля осуществляется на стереоэкране с размерами, соответствующими 25" ЖК матрице. При расчёте число строк разложения z_c выбирается различным, а именно: $z_c = 200...1125$. Диаметр оптического фокуса d_{ϕ} устанавливается в пределах 0,1...1 мм, что справедливо для микрофокусных рентгеновских трубок с прострельными или игольчатыми анодами. Кроме того, считаем, что для режима воспроизведения ортоскопических радиационных изображений при выборе геометрических параметров рентгеновской установки обеспечивалось равенство $b_0H = 2al$, а при воспроизведении псевдоскопических изображений достигалось геометрически правильное отображение трёхмерных свойств анализируемых объектов. Результаты расчёта числа разрешаемых планов по глубине $\Pi_{\text{пл}}$ представлены в виде графических зависимостей вида $\Pi_{\text{пл}} = f(z_c)$ на рис. 6, которые могут использоваться для определения глубинной разрешающей способности стереорентгенотелевизионных установок на практике. Следует заметить, что в случае работы с радиационной установкой специально тренированных наблюдателей число разрешаемых планов по глубине фактически увеличивается в 2...3 раза.

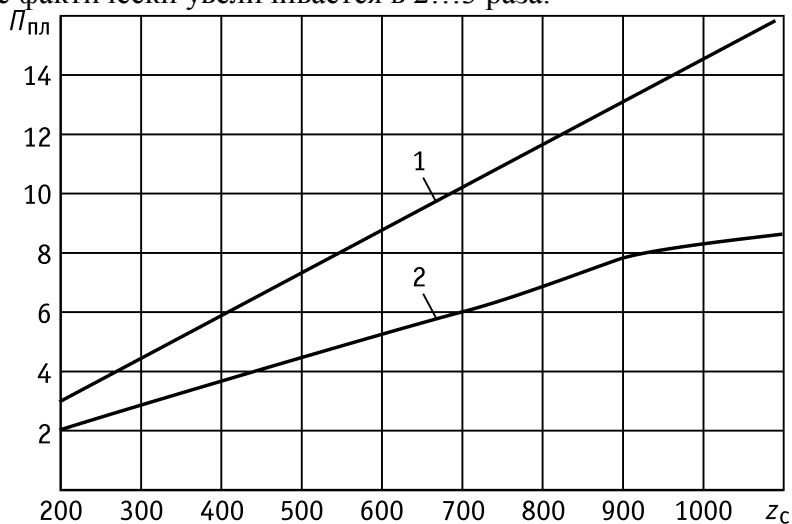


Рис. 6. Зависимости числа разрешаемых планов по глубине контролируемого объекта от количества строк разложения в изображениях стереопары:

1 – монокристаллический экран; 2 – порошковый флюоресцирующий экран

Анализ результатов расчёта показал, что при геометрически правильном воспроизведении стереотелевизионных изображений радиационного типа геометрические параметры стереорентгенотелевизионной установки не влияют на её глубинную разрешающую способность.

6. Выводы

При визуальном наблюдении стереоскопическая модель объекта контроля в стереорентгенотелевизионном устройстве воспринимается в целом деформированной.

При восприятии псевдоскопических радиационных изображений результирующие деформации стереоскопической модели объекта контроля проявляются значительно меньше по сравнению с воспроизведением ортоскопических изображений.

В трёхмерном пространстве, отображаемом стереорентгенотелевизионным устройством, наблюдатели могут различать до 15 планов по глубине.

Литература

1. *Мамчев Г.В.* Современное состояние и перспективы развития стереотелевидения // Зарубежная радиоэлектроника, – 1985. – № 1. – С. 3-20.
2. *Мамчев Г.В.* Стереотелевидение: вещательное и прикладное: Монография. – Новосибирск: СибГУТИ, 2012. – 244 с.
3. *Добромыслов В.А., Румянцев С.В.* Радиационная спектроскопия, – М.: Атомиздат, 1972. – 352 с.

Статья поступила в редакцию 01.02.2014

Мамчев Геннадий Владимирович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиовещания и телевидения СибГУТИ

тел. (383) 269-82-62, e-mail: mamtchev@sibsutis.ru

Definition of fundamental geometric parameters of representation three-dimensional space by stereo X-rays television system

G.V. Mamtchev

Analytic equations of three-dimensional space representation at shadow stereoprojection are derived after analysis of constructional peculiarities of stereo x-rays television devices. Estimation of geometric distortions of three-dimensional space represented by stereotelevision apparatus of radiation type is performed. Calculation of similar devices depth resolution is fulfilled.

Keywords: stereo television apparatus of radiation type, X-rays radiation, representation of three-dimensional space, analytic conformity, orthoscopic and pseudoscopic stereomodels, threshold of depth resolution.