

Анализ пространственно-частотных характеристик распределения светочувствительных элементов в пределах раstra матрицы ПЗС

Власюк И.В., Балобанов А.В., Басекеев А.А., МТУСИ, г. Москва

В современных телевизионных системах различного назначения, как правило, применяются матричные преобразователи свет-сигнал. Светочувствительная поверхность этих преобразователей представляет собой дискретную квазипериодическую структуру светочувствительных элементов, которые осуществляют преобразование входного воздействия в электрический сигнал [1]. Одновременно они реализуют дискретизацию входного воздействия как во времени (межкадровое или временное направление) и в пространстве (внутрикадровое направление), так и его предварительную фильтрацию. Последняя, по временному направлению, определяется постоянной времени накопления заряда, а в пространстве – относительными размерами элемента и изменением чувствительности в его пределах. Из-за реализации светочувствительным элементом нескольких функций каждая из них выполняется неоптимальным образом, в частности, пространственная частотная характеристика преобразователя далека от характеристики идеального пространственного ФНЧ с частотой среза, соответствующей теореме Котельникова. В связи с этим зачастую на изображении можно наблюдать муаровые (нелинейного типа) эффекты, причиной которых является субдискретизация входного воздействия. В телевизионных системах со сжатием спектра данное явление снижает эффективность видеокompрессии, поскольку спектр на выходе датчика телевизионного сигнала существенно обогащается. Указанные эффекты могут быть устранены за счет установки перед светочувствительной матрицей пространственного фильтра с соответствующей характеристикой, взаимной обработкой отсчетов и др. Реализации перечисленных мер может быть осуществлена лишь с учётом аналитического выражения для пространственной характеристики структуры элементов светочувствительной матрицы.

Анализ соотношений для пространственно-частотных характеристик распределения светочувствительных элементов в пределах раstra матрицы ПЗС осуществим с использованием элементов теории пространственной дискретизации сигналов изображений [2,3].

Число распределённых по раstrу светочувствительных элементов матрицы ПЗС определяется при стандартной четкости значением:

$$n_r = n_x \cdot n_y = 768 \times 576, \quad (1)$$

где n_x, n_y – число светочувствительных элементов в пределах растра соответственно по каждой строке и каждому столбцу матрицы. Спецификой распределения элементов, соответствующего соотношению (1), является ортогональная структура и чётное число светочувствительных элементов в пределах строк и столбцов. Это несколько затрудняет решение задачи анализа пространственно-частотных характеристик распределения светочувствительных элементов в пределах растра матрицы ПЗС.

Поэтому первоначально в качестве опорной используем матрицу с нечётным числом элементов:

$$n_{r0} = (2 \cdot n_x + 1) \times (2 \cdot n_y + 1) = n_{x0} \times n_{y0} = 1537 \times 1153, \quad (2)$$

Получим выражение для опорной сетки отсчетов такого идеализированного варианта распределения светочувствительных элементов:

$$d_0(x, y) = \sum_{\mu=-n_{x0}}^{\mu=n_{x0}} \sum_{\eta=-n_{y0}}^{\eta=n_{y0}} \delta(x - \mu x_0) \cdot \delta(y - \eta y_0), \quad (3)$$

Здесь $x_0 = \frac{X_0}{2n_{x0} + 1}$, $y_0 = \frac{Y_0}{2n_{y0} + 1}$ – периоды следования элементов пространственной

дискретизации, а X_0, Y_0 – соответственно протяжённость растра в пределах светочувствительной поверхности матрицы ПЗС по горизонтальному и вертикальному направлениям.

Характеристика спектра идеализированной структуры с нечётным числом элементов, удовлетворяющей выражению (3), может быть представлена следующим образом:

$$D_0(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin \frac{(2n_x + 1)}{2} \omega_x \cdot x_0}{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{(2n_y + 1)}{2} \omega_y \cdot y_0}{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2}}. \quad (4)$$

Матрицу дискретизации с числом элементов n_r , удобно определить в виде произведения двух одномерных структур дискретизации с чётным числом элементов. Одна из этих структур

ориентирована в горизонтальном по растру направлении, а другая - в вертикальном. Чётное число элементов при этом получим вычитанием двух нечётных структур дискретизации.

$$\begin{aligned} n_{x0} &= 2n_{x1} = (2n_{x0} + 1) - (2n_{x1} + 1) = (2 \cdot 768 + 1) - (2 \cdot 384 + 1) = 1537 - 769 = 768, \\ n_{y0} &= 2 \cdot n_{y1} = (2 \cdot n_{y0} + 1) - (2 \cdot n_{y1} + 1) = (2 \cdot 577 + 1) - (2 \cdot 288 + 1) = 1153 - 577 = 576 \end{aligned} \quad (5)$$

С учётом соотношений (5) получим следующие соотношения для одномерных, вертикальной и горизонтальной, структур, являющихся сомножителями при определении общей матрицы дискретизации в виде произведения.

$$\begin{aligned} d_x(x) &= d_{x0}(x) - d_{x1}(x) = \sum_{\mu=-n_{x0}}^{n_{x0}} \delta(x - \mu x_0) - \sum_{\mu=-n_{x1}}^{n_{x1}} \delta(x - \mu x_1), \\ d_y(y) &= d_{y0}(y) - d_{y1}(y) = \sum_{\eta=-n_{y0}}^{n_{y0}} \delta(y - \eta y_0) - \sum_{\eta=-n_{y1}}^{n_{y1}} \delta(y - \eta y_1), \end{aligned} \quad (6)$$

Определим соотношение для общей матрицы дискретизации:

$$\begin{aligned} d_r(x, y) &= (d_{x0}(x) - d_{x1}(x)) \cdot (d_{y0}(y) - d_{y1}(y)) = d_{x0}(x) \cdot d_{y0}(y) - d_{x1}(x) \cdot d_{y0}(y) - \\ &- d_{x0}(x) \cdot d_{y1}(y) + d_{x1}(x) \cdot d_{y1}(y) = \sum_{\mu=-n_{x0}}^{n_{x0}} \delta(x - \mu x_0) \cdot \sum_{\eta=-n_{y0}}^{n_{y0}} \delta(y - \eta y_0) - \\ &- \sum_{\mu=-n_{x1}}^{n_{x1}} \delta(x - \mu x_1) \cdot \sum_{\eta=-n_{y0}}^{n_{y0}} \delta(y - \eta y_0) - \sum_{\mu=-n_{x0}}^{n_{x0}} \delta(x - \mu x_0) \cdot \sum_{\eta=-n_{y1}}^{n_{y1}} \delta(y - \eta y_1) + \\ &+ \sum_{\mu=-n_{x1}}^{n_{x1}} \delta(x - \mu x_1) \cdot \sum_{\eta=-n_{y1}}^{n_{y1}} \delta(y - \eta y_1) \end{aligned} \quad (7)$$

Согласно структуре соотношений (4) и (7) и в соответствии со свойствами преобразования Фурье, получим общее выражение для характеристики спектра идеализированной структуры распределения элементов в пределах раstra матрицы ПЗС:

$$D_r(\omega_x, \omega_y) = \frac{\sin \frac{(2n_{x0}+1)}{2} \omega_x \cdot x_0}{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{(2n_{y0}+1)}{2} \omega_y \cdot y_0}{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2}} - \frac{\sin(n_{x0}+1) \cdot \omega_x \cdot x_0}{\sin \omega_x \cdot x_0} \cdot \frac{\sin \frac{(2n_y+1)}{2} \omega_x \cdot y_0}{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2}} -$$

$$- \frac{\sin \frac{(2n_{x0}+1)}{2} \omega_x \cdot x_0}{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2}} \cdot \frac{\sin(n_{y0}+1) \cdot \omega_y \cdot y_0}{\sin \omega_y \cdot y_0} + \frac{\sin(n_{x0}+1) \cdot \omega_x \cdot x_0}{\sin \omega_x \cdot x_0} \cdot \frac{\sin(n_{y0}+1) \cdot \omega_y \cdot y_0}{\sin \omega_y \cdot y_0}. \quad (8)$$

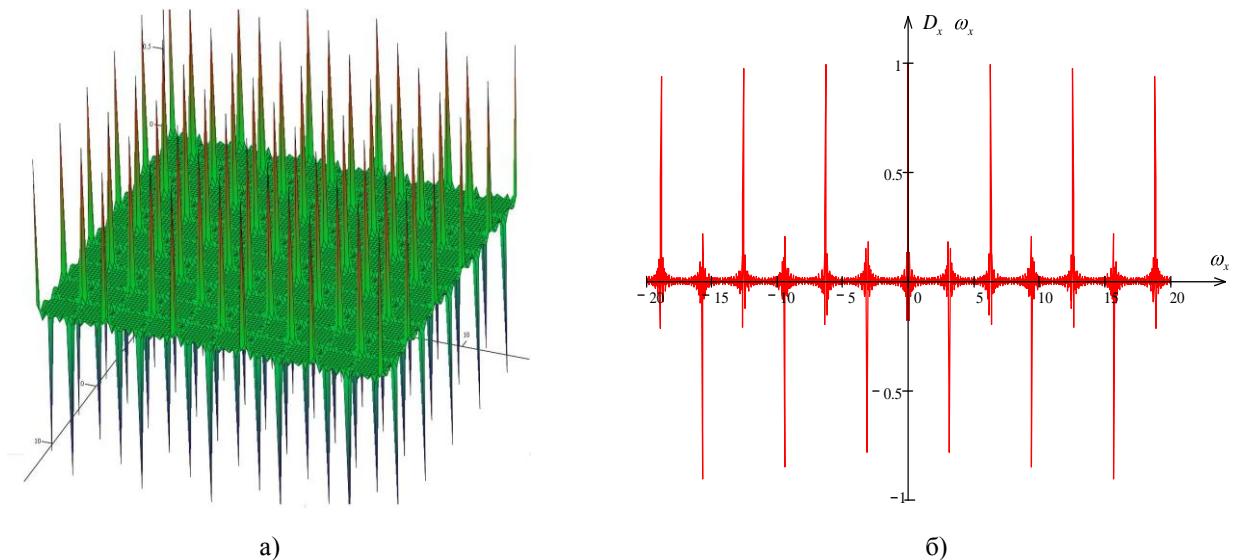
Найдём значение $D_r(\omega_x, \omega_y)$ при $\omega_x = \omega_y = 0$, т.е. $D_r(\omega_x, \omega_y) = D_r(0, 0)$.

$$D_r(\omega_x, \omega_y) = D_r(0, 0) = 1537 \cdot 1153 - 769 \cdot 1153 - 1537 \cdot 577 + 577 \cdot 769 = 768 \cdot 576.$$

Соответственно, относительная характеристика спектра идеализированной структуры распределения элементов в пределах раstra матрицы ПЗС:

$$D_{r0}(\omega_x, \omega_y) = \frac{D_r(\omega_x, \omega_y)}{D_r(0, 0)} = \frac{D_r(\omega_x, \omega_y)}{768 \cdot 576}.$$

На рис. 1 $\hat{a}, \hat{a}, \hat{a}$ представлена характеристика спектра структуры дискретизации и её сечения в горизонтальном, вертикальном и под углом $\varphi_0 = \arctg \frac{3}{4}$ направлениях в пространстве раstra.



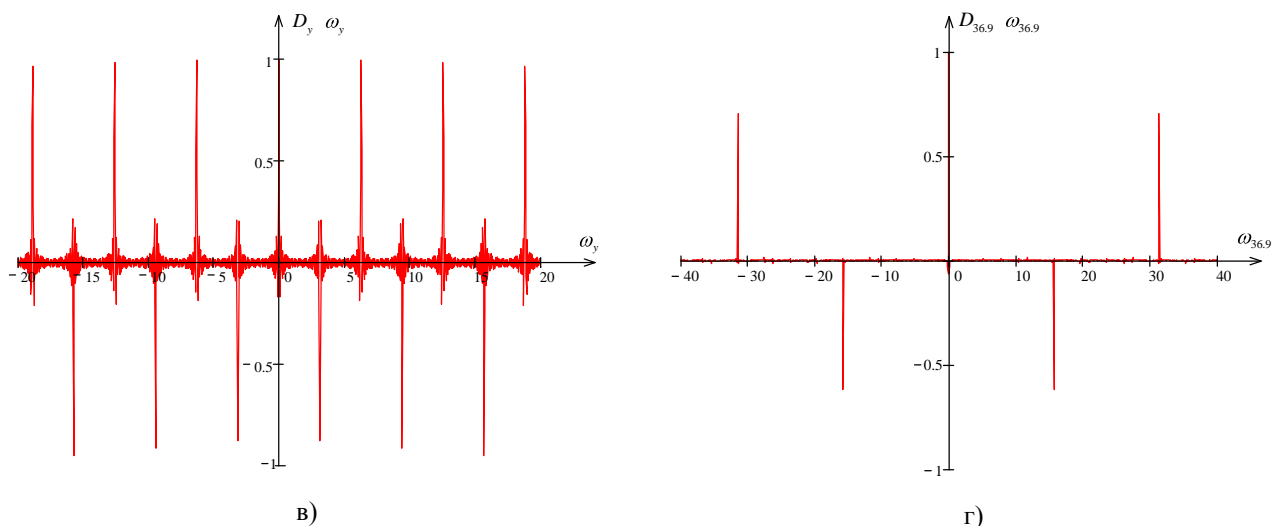


Рис.1. Спектр структуры дискретизации а) и его сечения: горизонтальное (б), вертикальное (в) и расположенное под углом 36,9° в пространстве раstra (г)

Матрица светочувствительных элементов формально может быть представлена в виде свёртки функции отдельного элемента со структурой (7). Если считать, что светочувствительный элемент матрицы ПЗС имеет форму прямоугольника, а размер светочувствительного элемента по горизонтали и вертикали отражается соответственно величинами $\chi = \frac{x_0}{\alpha}$, $\phi = \frac{y_0}{\beta}$ ($\alpha \geq 1, \beta \geq 1$), то соответствующая функция может быть представлена соотношением:

$$H(x, y) = \text{rect}\left(\frac{2 \cdot x}{\chi}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2 \cdot y}{\phi}\right) = \text{rect}\left(\frac{2\alpha \cdot x}{x_0}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2\beta \cdot y}{y_0}\right), \quad (9)$$

Согласно (9), характеристика пространственного спектра данной функции отражается выражением:

$$D_s(\omega_x, \omega_y) = \chi \cdot \phi \cdot \frac{\sin \frac{\omega_x \cdot \chi}{2}}{\frac{\omega_x \cdot \chi}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\omega_y \cdot \phi}{2}}{\frac{\omega_y \cdot \phi}{2}} = \frac{x_0}{\alpha} \cdot \frac{y_0}{\beta} \cdot \frac{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2 \cdot \alpha}}{\frac{\omega_x \cdot x_0}{2 \cdot \alpha}} \cdot \frac{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2 \cdot \beta}}{\frac{\omega_y \cdot y_0}{2 \cdot \beta}}, \quad (10)$$

Найдём значение $D_S(\omega_x, \omega_y)$ при $\omega_x = \omega_y = 0$, т.е. $D_S(\omega_x, \omega_y) = D_S(0, 0) = \frac{\alpha}{x_0} \cdot \frac{\beta}{y_0}$

Соответственно, относительная характеристика пространственного спектра светочувствительного элемента матрицы ПЗС:

$$D_{S0}(\omega_x, \omega_y) = \frac{D_S(\omega_x, \omega_y)}{D_S(0, 0)} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot D_S(\omega_x, \omega_y)}{x_0 \cdot y_0}$$

На рис. 2. представлена характеристика спектра функции светочувствительного элемента и её сечения в горизонтальном, вертикальном и под углом $\varphi_0 = 45^\circ$ в пространстве раstra.

Свёртка относительной характеристики спектра структуры распределения элементов в пределах раstra и относительной характеристики пространственного спектра светочувствительного элемента матрицы ПЗС в реальном пространстве отражается произведением соответствующих спектров в частотном пространстве.

С учётом последнего, относительная характеристика пространственного спектра структуры дискретизации будет иметь вид (11).

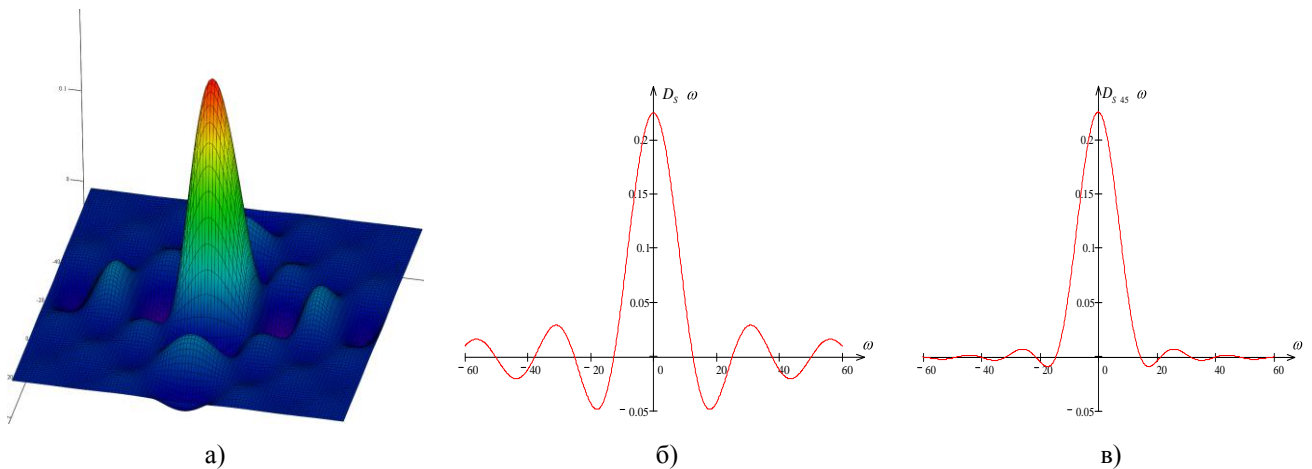
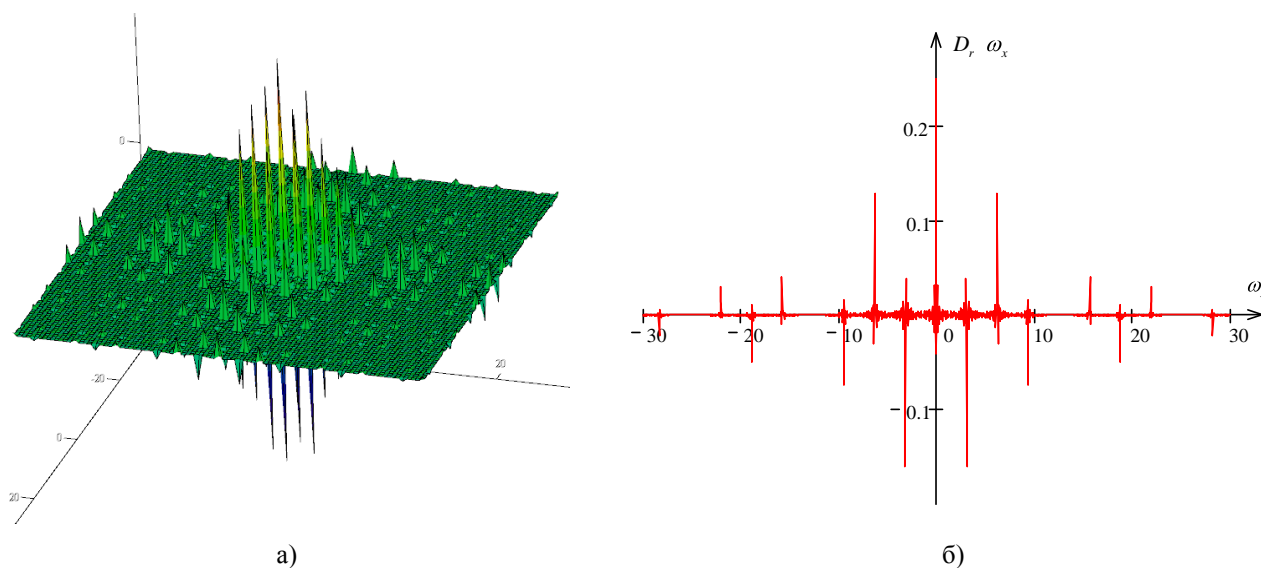


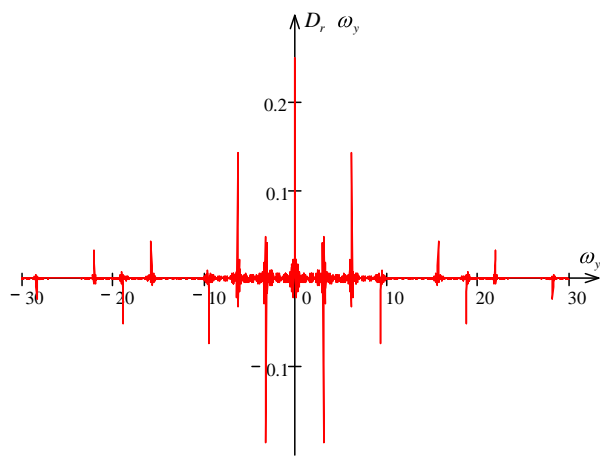
Рис. 2. Пространственный спектр функции светочувствительного элемента (а) и его сечения: горизонтальное и вертикальное (б), под углом 45° по раstrу (в)

$$D_r(\omega_x, \omega_y) = \frac{1}{768 \cdot 576} \left[\frac{\sin \frac{(2n_x + 1)\omega_x x_0}{2}}{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{(2n_y + 1)\omega_y y_0}{2}}{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2}} - \frac{\sin((n_x + 1)\omega_x x_0)}{\sin \omega_x \cdot x_0} \cdot \frac{\sin \frac{(2n_y + 1)\omega_y y_0}{2}}{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2}} - \frac{\sin \frac{(2n_x + 1)\omega_x \cdot x_0}{2}}{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2}} \cdot \frac{\sin((n_y + 1)\omega_y \cdot y_0)}{\sin \omega_y \cdot y_0} + \frac{\sin((n_x + 1)\omega_x \cdot x_0)}{\sin \omega_x \cdot x_0} \cdot \frac{\sin((n_y + 1)\omega_y \cdot y_0)}{\sin \omega_y \cdot y_0} \right] \cdot \frac{\sin \frac{\omega_x \cdot x_0}{2 \cdot \alpha}}{\frac{\omega_x \cdot x_0}{2 \cdot \alpha}} \cdot \frac{\sin \frac{\omega_y \cdot y_0}{2 \cdot \beta}}{\frac{\omega_y \cdot y_0}{2 \cdot \beta}}. \quad (11)$$

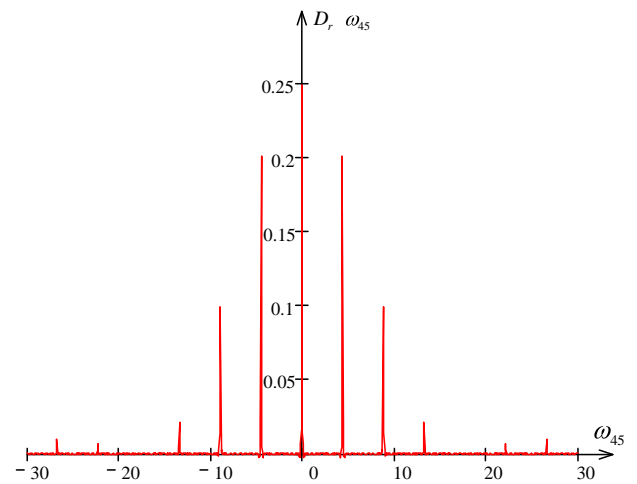
Для варианта $\alpha = \beta = 2$ на рис.3 а) – е) представлены двумерная функция характеристики $D_r(\omega_x, \omega_y)$ и варианты сечений данной функции под углами в пространстве раstra $\varphi_0 = 0^\circ; 90^\circ; 45^\circ; 36^\circ; 87^\circ$

Можно заметить, что в данном случае остается значительной величина второго лепестка спектра. В реальных камерах с величиной второго и более далёких лепестков спектра функции дискретизации сопряжено пересечение спектральных составляющих дискретизированной видеоинформации, локализованных в области смежных лепестков спектра. При недостаточной степени подавления высокочастотных составляющих пространственного спектра видеоинформации до дискретизации указанные пересечения составляющих при воспроизведении приводят к возникновению существенных искажений разнообразных по протяжённости элементов пространственной структуры изображений, в том числе и фона.

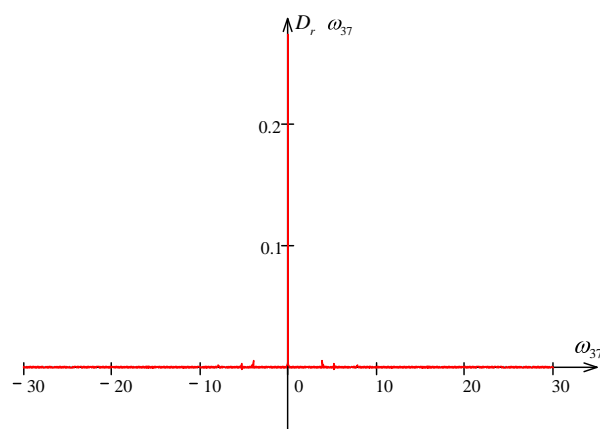




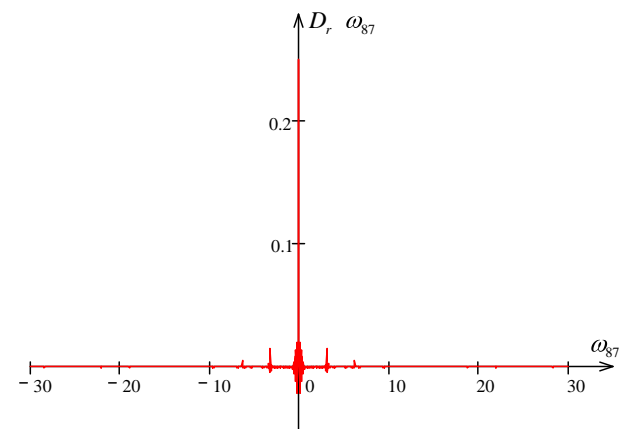
в)



г)



д)



е)

Пространственный спектр дискретизации структуры матрицы с учетом формы и размеров светочувствительного элемента (а) и его сечения: (б) – горизонтальной, (в) – вертикальной, под углами 45° , 37° и 87° к горизонтали плоскостями(д,е).

Литература

1. В.Н.Безруков. Разработка и применение элементов теории преобразования сигналов изображений в системах прикладного телевидения. Автореферат диссертации на соискание учёной степени д. т. н.. -М.: МТУСИ, 1996, 45с.,ил.
2. Безруков В.Н. Анализ характеристик спектра ортогональных структур квазипериодической дискретизации в системах телевидения. // Радиотехника.- 1989, №12, с. 3-7.
3. Безруков В.Н. Принципы построения и анализа характеристик спектра структур дискретизации телевизионных изображений. // Техника кино и телевидения.- 1990, №7 с. 7-23.