

## Ограничения спектра видеоинформационных сигналов в системах телевидения.

## Аннотация

Дискретизацию видеоинформации по направлениям в системах телевидения реализуют с предварительным или параллельным ограничением протяженности соответствующего многомерного спектра. Вероятность возникновения искажений структуры изображений, обусловленных пересечением составляющих спектра при дискретизации, резко уменьшается в том случае, когда выбранный вариант его ограничения по всем направлениям информационного пространства сочетает высокую эффективность подавления с сокращением протяженности колебательных процессов в реальном сигнале.

В материале работы проведён анализ характеристик многомерной низкочастотной фильтрации при формировании отдельных пикселей внутрикадровой структуры сигналов телевизионных изображений. На основе использования свёртки одномерных функций ограничения показаны особенности оценки эффективности ограничения и предельной протяженности спектра сигнала изображения по цветовому направлению. Представлены результаты проведённого теоретического анализа и выполненных вычислений.

Дискретизацию видеоинформации в заданном направлении многомерного информационного пространства в системах телевидения (СТВ) реализуют с предварительным или параллельным ограничением протяженности спектра. При этом качество телевизионных (ТВ) изображений в значительной степени определяется эффективностью реализации такого ограничения по каждому из указанных направлений. Вероятность возникновения нелинейных искажений структуры изображений, обусловленных пересечением спектров при дискретизации, резко уменьшается в том случае, когда ограничения спектра по всем направлениям информационного пространства выполнено с учетом характеристик и параметров оконечного приемника видеоинформации, например, зрительной системы наблюдателя.

Дискретизацию видеоинформации осуществляют в современных СТВ по четырем направлениям видеоинформационного пространства: горизонтальное-  $Ox$ , вертикальное-  $Oy$ , в последовательности кадров (временное)-  $Ot$ , цветовое-  $0\lambda [1 \div 3]$ . Это связано с использованием матричных преобразователей "свет-сигнал", принципом функционирования которых операции дискретизации и ограничения спектра распространены и на горизонтальное направление соответствующего раstra преобразователя СТВ. Указанные дискретизация с одновременным ограничением многомерного спектра изображений по

направлениям информационного пространства реализуется в таком случае действием светофильтров, светочувствительных элементов и процессом формирования ТВ сигнала последовательности кадров с накоплением потенциального рельефа в интервале каждого кадре [4].

Идеализированная и нормированная по уровню импульсная характеристика низкочастотной фильтрации при формировании отдельного пикселя внутрикадровой структуры изображения может быть отражена функцией следующего вида:

$$g(x, y, t) = \text{rect}\left(\frac{2x}{X_0}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2y}{Y_0}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2t}{T_0}\right) \cdot \text{rect}\left(\frac{2\lambda}{\Delta\lambda_0}\right) = \begin{cases} 1 & \text{if } |x| \leq X_0 \\ 1 & \text{if } |y| \leq Y_0 \\ 1 & \text{if } |t| \leq T_0 \\ 1 & \text{if } |\lambda| \leq \Delta\lambda_0 \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $X_0, Y_0$  – определяют размер светочувствительного элемента в горизонтальном и вертикальном направлении,  $T_0$  – время накопления потенциального рельефа в интервале между его последовательными считываниями,  $\Delta\lambda_0$  – эквивалентная протяжённость импульсной характеристики фильтра отдельной, из цветовых, составляющей ТВ сигнала.

Данной импульсной характеристике соответствует четырёхмерная характеристика низкочастотной фильтрации при формировании каждого пикселя сигнала телевизионного изображения отдельного кадра:

$$K_0(\omega_x, \omega_y, \omega) = X_0 \cdot Y_0 \cdot T_0 \cdot \Delta\lambda_0 \cdot \frac{\sin \frac{\omega_x \cdot X_0}{2}}{\frac{\omega_x \cdot X_0}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\omega_y \cdot Y_0}{2}}{\frac{\omega_y \cdot Y_0}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\omega \cdot T_0}{2}}{\frac{\omega \cdot T_0}{2}} \cdot \frac{\sin \frac{\gamma_\lambda \cdot \Delta\lambda_0}{2}}{\frac{\nu \cdot \Delta\lambda_0}{2}} \quad (2)$$

Здесь  $\omega_x, \omega_y, \omega, \gamma_\lambda$  – пространственные и временная частоты, оцениваемые числом периодов на выбранную единицу измерения по указанным выше направлениям видеоинформационного пространства. Общее интегральное преобразование при формировании отдельного отсчёта ТВ сигнала определяется действием все составляющих идеализированной импульсной характеристики. Указанные интегральные преобразования фактически определяют потенциально возможную разрешающую способность конкретной системы СТВ. Действие же других неучтённых в данном случае факторов (условий ТВ контроля, характеристик оптической системы (ОС), процесса считывания потенциального рельефа и т. п.) обычно не приводит к возрастанию разрешающей способности СТВ.

В частности, к операторам ограничения, обеспечивающим преобразование цветовых характеристик исходного воздействия, следует отнести операторы ограничения диапазона соответствующего электромагнитного излучения [4]. Локализация энергии воздействия в достаточно узком диапазоне длин волн позволяет увеличить в системах телевидения эффективность контроля объек-

тов с заданными спектральными характеристиками за счет уменьшения относительной энергии "фона", маскирующего контролируемое воздействие. Решающую роль в данном случае играет соотношение между потоком квантов, несущих информацию о контролируемых объектах и потоком квантов, проникающих на выход ОС из-за отражений электромагнитного излучения от других смежных в пространстве материальных объектов. С другой стороны включением в ОС элементов, коэффициент передачи которых зависит от частоты электромагнитного излучения, может и не преследоваться цель эффективного ограничения энергии воздействия пределами диапазона, в котором локализована основная доля последней. Не менее полезной в некоторых случаях является режекция мешающих воздействий, основная доля энергии которых сконцентрирована в относительно (по отношению к энергии контролируемого объекта) узкой спектральной зоне. Следует кроме того учитывать, что в системах телевидения разумное ограничение спектрального диапазона воздействия может давать и сопутствующий эффект увеличения четкости изображений из-за ослабления в реальных ОС влияния хроматической аберрации. В реальных условиях выделение диапазона электромагнитного излучения спектральной зоны реализуется в ходе преобразования многомерного входного излучения в отсчет (пиксель), например, сигнала, позволяющий реализовать заданную обработку полученной информации:

$$U(x_i, y_j, t_k, \lambda_n) = \iiint_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{S}_s(x, y, t, \lambda) H(x - x_i, y - y_j, t - t_k, \lambda - \lambda_n) dx dy dt d\lambda, \quad (3)$$

$\mathfrak{S}_s(x, y, t, \lambda)$  - функция интенсивности излучения,  $H(x, y, t, \lambda)$  - функция ограничения.

Если предположить, что ограничения в пространстве, во времени и в спектральной зоне являются независимыми, а функция ограничения удовлетворяет соотношению:  $H(x, y, t, \lambda) = H_{xy}(x, y)H_t(t)H_\lambda(\lambda)$ , то на этапе выделения спектральной зоны соотношение (3) может быть представлено следующим образом:

$$i_s(x, y, t, \lambda_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{S}_s(x, y, t, \lambda) H_\lambda(\lambda - \lambda_n) d\lambda. \quad (4)$$

Идеализированным вариантом ограничения спектральной зоны является вариант, когда  $H_\lambda(\lambda) = \delta_\lambda(\lambda)$ . При этом соотношение (4) дает значение  $i_s(x, y, t, \lambda_i) \equiv \mathfrak{S}_s(x, y, t, \lambda_i)$ , т.е. имеет место выделение истинного отсчета исходной функции в точке  $\lambda = \lambda_n$ . В реальных системах, например, спектрального телевидения функции ограничения не являются идеальными. Вследствие этого имеет место интегральное усреднение спектральной информации при получении сигнала. Степень усреднения в каждом конкретном случае определяется видом используемой функции ограничения  $H_\lambda(\lambda)$ .

Значение  $i_s(x, y, t, \lambda_n)$  может быть представлено при этом в несколько ином виде:

$$i_s(x, y, t, \lambda_n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} I_{s\lambda}(x, y, t, \gamma_\lambda) H_\lambda(\gamma_\lambda) e^{-i\gamma_\lambda \lambda_n} d\gamma_\lambda \quad (5)$$

где  $I_{s\lambda}(x, y, t, \gamma_\lambda) = \Phi_\lambda \{ \mathfrak{S}(x, y, t, \lambda) \}$ ,  $H_\lambda(\gamma_\lambda) = \Phi_\lambda \{ H(\lambda) \}$  преобразование Фурье по аргументу  $\lambda$ ,  $H_\lambda(\gamma_\lambda)$  - четная функция.

Следовательно, результат преобразования входного излучения в отсчет сигнала определяется произведением характеристик  $H_\lambda(\gamma_\lambda)$  и  $I_{s\lambda}(x, y, t, \gamma_\lambda)$ , отражающих по аргументу  $\lambda$  спектральные плотности исходных функций  $\mathfrak{S}_s(x, y, t, \lambda)$  и  $H_\lambda(\lambda)$ . В реальной области указанному произведению соответствует свертка исходных функций.

$$i_s(x, y, t, \lambda) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{S}_s(x, y, t, \xi) H_\lambda(\lambda - \xi) d\xi.$$

С другой стороны  $e^{\pm i\gamma_\lambda \lambda_n}$  - спектр  $\delta$ -функции -  $\delta(\lambda \pm \lambda_n)$ . Последнее позволяет преобразовать и форму записи соотношения (4):

$$i_s(x, y, t, \lambda_n) = \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\lambda - \lambda_n) \int_{-\infty}^{\infty} \mathfrak{S}_s(x, y, t, \xi) H_\lambda(\lambda - \xi) d\xi d\lambda. \quad (6)$$

Полученные выражения (1-6) показывают, что в системах спектрального спектрозонального телевидения операция интегрального усреднения является операцией, реализующей ограничение спектра исходного воздействия как функции от аргумента  $\lambda$ . Указанное ограничение отражается в частотной области произведением соответствующих спектров функций ограничения и исходного воздействия, а в реальной области сверткой таких функций. Выделение же усредненного (отфильтрованного) отсчета исходной функции реализуется при этом за счет фильтрующего свойства  $\delta$ -функции. Соответственно, выбор вида функции  $H_\lambda(\lambda)$  должен осуществляться в системах телевидения с учетом попутно возникающих преобразований спектра исходной функции, которые в основном и определяют фактический сигнал отсчета. По виду функции ограничения  $H_\lambda(\lambda)$  современные системы телевидения можно подразделить на три вида: системы интегрального, дифференциального и смешанного типов. При этом основное распространение получили в данный момент системы интегрального типа. В таких системах функция ограничения  $H_\lambda(\lambda)$  следует выбирать из условий, обеспечивающих совместное увеличение эффективности ограничения в реальной и спектральной области.

Рассмотрим некоторые особенности выбора функции  $H_\lambda(\lambda)$  в такого рода системах. На рис.1а, в частности, представлена последовательность изменений формы функции ограничения  $H_{\lambda i}(\lambda)$  от чисто прямоугольного вида  $H_{\lambda 1}(i=1)$  до треугольного -  $H_{\lambda 5}(i=5)$ .

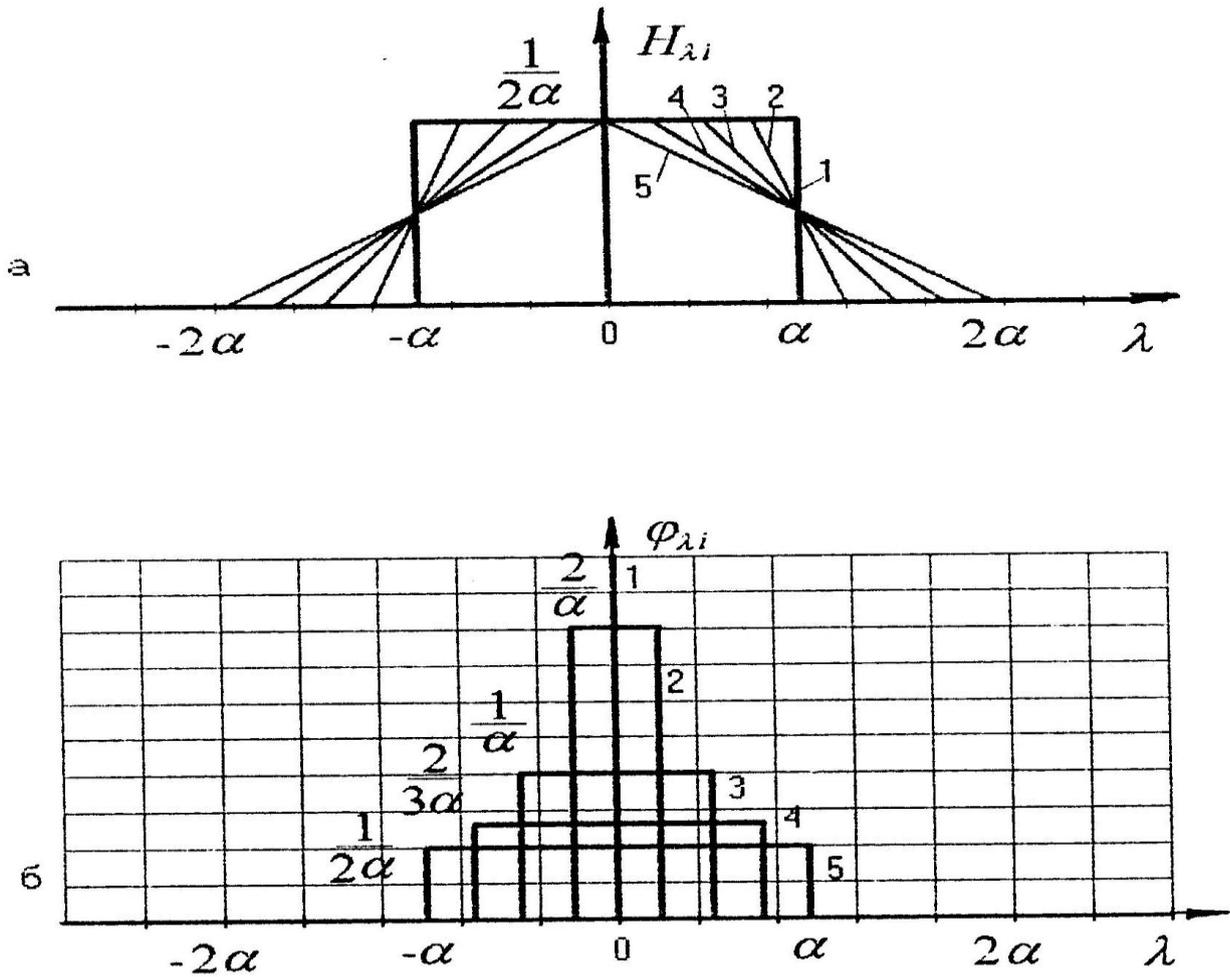


Рис.1 Изменения функции ограничения (а) и преобразования (б)

На рис. 1 б показаны функции преобразования  $\varphi_{\lambda i}(\lambda)$ , свертка которых с исходной прямоугольной функцией  $H_{\lambda 1}(\lambda)$  позволяет получить указанную на рис.1а последовательность изменений функции ограничения  $H_{\lambda i}(\lambda)$ . Спектральная плотность функции ограничения при этом выражается, согласно изложенному в предыдущем разделе работы, произведением спектров функций  $\varphi_{\lambda}(\lambda)$  и  $H_{\lambda}(\lambda)$ . Соответственно выражение для результирующей спектральной плотности функции ограничения  $H_{\lambda i}(\lambda)$  приобретает следующий вид:

$$H_{\lambda i}(\gamma_{\lambda}) = H_{\lambda 1}(\gamma_{\lambda}) \Phi_{\lambda i}(\gamma_{\lambda}) = \frac{\sin 2\pi \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \alpha}{2\pi \cdot \gamma_{\lambda} \cdot \alpha} \cdot \frac{\sin 2\pi \cdot \gamma_{\lambda} \cdot k \cdot \alpha}{2\pi \cdot \gamma_{\lambda} \cdot k \cdot \alpha}. \quad (7)$$

Коэффициент  $k$  в полученном соотношении (7) определяется отношением протяженностей функций преобразования и исходной функции. Для, например, характеристики ограничения  $H_{\lambda 1}(\lambda)$  коэффициент  $k=0$ ; для  $H_{\lambda 2}(\lambda)$  -  $k=0,25$ ; для  $H_{\lambda 3}(\lambda)$  -  $k=0,5$ ; для  $H_{\lambda 4}(\lambda)$  -  $k=0,75$ ; для  $H_{\lambda 5}(\lambda)$  -  $k=1$ .

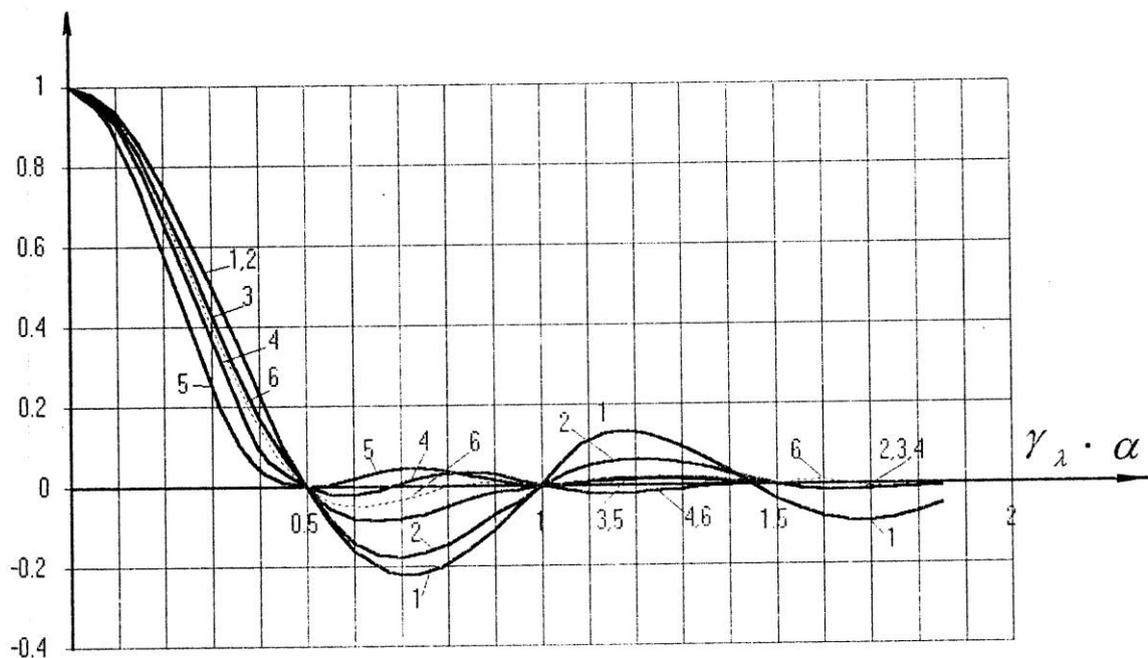


Рис. 2. Спектры функций ограничения

На рис.2 представлены расчетные графики, отражающие спектры функций  $H_{\lambda i}(\lambda)$  для перечисленных выше значений коэффициента  $k$ . График 1, в частности, отражает спектр  $H_{\lambda 1}(\gamma_{\lambda})$  функции  $H_{\lambda 1}(\lambda)$ ; график 2 - спектр  $H_{\lambda 1}(\gamma_{\lambda})$  функции  $H_{\lambda 2}(\lambda)$  и т.д.

Расчетные характеристики показывают, что в случае, когда функции ограничения отражаются рассмотренной последовательностью функций, показанных на Рис.1а, в системах телевидения при выделении отсчета имеет место предварительное ограничение спектра исходного воздействия в области низких частот. При этом возникает эффект подавления высокочастотной структуры спектральной плотности воздействия  $I_{\lambda}(x, y, t, \gamma_{\lambda})$ . В реальной области, соответственно, подавляется тонкая структура воздействия  $i(x, y, t, \lambda)$  как функции аргумента  $\lambda$ . Очевидно, что рассмотренное преобразование структуры воздействия носит интегральный характер, затрагивая насыщенность цветных изображений.

В большинстве систем телевидения необходимо выявлять и учитывать предельные величины искажений спектрально-зональных отсчетов, вносимых в процессе их ограничения и выделения сигналов. С этим связана в реальных системах и возможность контроля по форме функций ограничения допустимости вводимых искажений спектрально-зональной информации.

К важнейшим параметрам формы функции ограничения следует относить эффективную протяженность характеристики  $H_{\lambda}(\gamma_{\lambda})$  по оси частот  $\gamma_{\lambda}$ . Не менее важна оценка и предельной протяженности такой характеристики.

Причем более общим из перечисленных параметров является второй, т.е. предельная протяженность характеристики  $H_{\lambda}(\gamma_{\lambda})$ . Будем оценивать указанный параметр как результат решения следующего соотношения:

$$|S(\gamma_{\lambda_0})| = \left| \frac{\int_0^{\infty} H_{\lambda}(\gamma_{\lambda}) d\gamma_{\lambda} - \int_0^{\gamma_{\lambda_0}} H_{\lambda}(\gamma_{\lambda}) d\gamma_{\lambda}}{\int_0^{\infty} H_{\lambda}(\gamma_{\lambda}) d\gamma_{\lambda}} \right| = \left| \frac{c(\gamma_{\lambda_0})}{c_0} \right| = \left| \frac{c_0 - c_1(\gamma_{\lambda_0})}{c_0} \right| \leq \Delta = const. \quad (8)$$

Конкретизация величины  $\Delta$  зависит от требований, предъявляемых в системе телевидения к подавлению высокочастотной структуры при выделении спектронального отсчета.

Числитель в соотношении (8) отражает при этом степень подавления высокочастотной структуры спектральной плотности исходного воздействия в условиях, например, фиксации предельной частоты ограничения значением  $\gamma_{\lambda_0}$ . Во многих случаях предпочтительными, однако, являются варианты функций ограничения, обеспечивающих относительно резкое ограничение спектра исходного воздействия. За счет этого в реальных системах телевидения уменьшается проникновение преобразованной высокочастотной структуры воздействия в выходной сигнал и, соответственно, снижается уровень искажений сигнала, обусловленных таким проникновением.

Соотношение (8) может быть, кроме того, использовано для минимизации предельной протяженности характеристики  $H_{\lambda}(\gamma_{\lambda})$  за счет выбора определенной формы функции ограничения  $H_{\lambda}(\lambda)$ .

Решение соотношения (8) для функций, представленных на рис.1.а позволяет, в частности, конкретизировать параметры функций ограничения, обеспечивающих минимальную протяженность соответствующих характеристик спектральной плотности.

В соответствии с полученными решениями в условиях непрерывных изменений функций ограничения, показанных на рис.1а от чисто прямоугольного вида (1) до треугольного (5) общее увеличение степени подавления высокочастотной структуры воздействия имеет место в диапазоне значений параметра формы  $K$  от  $\sim 0,6$  до  $\sim 0,85$ . За счет выбора определенного значения параметра  $K$  может обеспечиваться повышенная эффективность подавления высокочастотных составляющих воздействия в заданном участке частотного диапазона. При выборе, например, значения параметра формы функции ограничения  $K=0,613$  обеспечивается повышенная эффективность подавления высокочастотной структуры в диапазоне  $\gamma_{\lambda} \alpha \geq 0,7$ ; при  $K=0,8$  - в диапазоне  $\gamma_{\lambda} \alpha -1,0 \div 1,5$ . Сопоставление расчетных данных подтверждает полученные результаты. Как уменьшение, так и увеличение параметра  $K$  по сравнению со значениями, лежащими в диапазоне  $K=0,6 \div 0,8$  вызывает уменьшение эффективности ограничения спектра исходного воздействия как функции аргумента  $\lambda$ . Такое уменьшение эффективности ограничения является обычно нежелательным в системах спектронального и вещательного телевидения.

Полученные результаты позволяют сделать следующие *выводы*. В системах телевидения операция ограничения контролируемой зоны в спектральном пространстве с последующим накоплением

соответствующего сигнала является операцией интегрального усреднения, реализующей ограничение спектра исходной видеoinформации как функции от аргумента  $\lambda$ . Указанные преобразования отражаются в сопряженном (частотном) пространстве произведением соответствующих спектров функций ограничения зоны и видеoinформации, а в реальной области сверткой последних. Выделение же усредненного в пределах спектральной зоны отсчета видеoinформации реализуется при этом за счет фильтрующего свойства дельта функции; вид функции ограничения спектральной зоны должен выбираться из условий, обеспечивающих совместное увеличение эффективности соответствующего преобразования видеoinформации в реальном и частотном пространстве. Здесь, в частности, необходимо обеспечить достижение компромисса между уменьшением интенсивности и протяженности элементов (выбросов) переходных процессов, возникающих при передаче структуры реальной видеoinформации, и степенью подавления высокочастотных составляющих спектра видеoinформации в частотной области.

Предпочтительными при реализации систем спектрального телевидения являются варианты формы функций ограничения, обеспечивающие в сопряженном пространстве относительно резкое ограничение спектра видеoinформации. За счет этого уменьшается проникновение преобразованной (дискретизацией) высокочастотной структуры видеoinформации в выходной сигнал и, следовательно, снижается уровень искажений сигнала, обусловленных таким проникновением. Результаты проведенного анализа на основе свертки прямоугольных функций свидетельствуют о том, что в условиях непрерывных изменений формы функций ограничения от чисто прямоугольного вида (параметр  $k$ , отражающий отношение протяженностей указанных прямоугольных функций, равен нулю) до треугольного ( $k = 1$ ) общее увеличение степени подавления высокочастотной структуры видеoinформации имеет место в диапазоне значений параметра  $k$  от 0,6 до 0,8. За счет выбора определенного значения параметра  $k$  может обеспечиваться повышенная эффективность подавления (режекции) составляющих видеoinформации в заданном участке частотного диапазона. С увеличением значений параметра  $k \geq 0,6$  имеет место смещение диапазона режекции составляющих в область более высоких частот. Аппроксимация характеристик фильтров в реальном пространстве совокупностями ступенчатых и трапецеидальных функциями позволяет использовать полученные здесь результаты для вычислительной оценки эффективности ограничения спектра в частотной области.

Однако более прецизионный анализ и выбор формы характеристик ограничения в системах спектрального телевидения целесообразно осуществлять на базе многоэтапной свертки прямоугольных функций с результатом, полученным на предшествующем этапе свертки. На первом этапе при этом свертываются две прямоугольные функции, отношение протяженности первой из которых (исходной) к протяженности второй определяется коэффициентом  $K$ , на втором этапе свертывается результат первого этапа с прямоугольной функцией, и т. д. Важной особенностью операции многократной свертки является при этом то, что различные вариации протяженностью прямоугольных функций на каждом из этапов свертки дают с увеличением числа этапов приближение к гауссовской форме результирующей функции

ограничения, соответствующей конечному итогу последовательных сверток. Оценку скорости приближения формы результирующей функции к гауссовской целесообразно осуществлять с учетом того, что такое приближение имеет одновременно место в реальной и частотной областях. Поэтому в качестве критерия приближения целесообразно использовать относительную разность площадей, соответствующую функции ограничения по данному этапу свертки и гауссовской, при выполнении сравнения последних по уровню, например, 0,5 в фиксированной точке на оси частот. Как показал проведенный нами анализ, наибольшую весовую динамику процесс совпадения формы указанных функций имеет в начальном участке, т.е. при числе этапов 3-4. Несмотря на относительно произвольный выбор точки выравнивания функций по уровню, полученной в данном случае результат жестко коррелирован с результатом, полученным при существенно более сложном варианте анализа на базе пороговой текущей оценки.

#### Литература

1. Безруков В.Н. Анализ характеристик спектра ортогональных структур квазипериодической дискретизации в системах телевидения//Радиотехника. – 1989. – №12. – С.3 – 7.
2. Безруков В.Н. Принципы построения и анализа характеристик спектра структур дискретизации телевизионных изображений//Техника кино и телевидения. -1990. - №7. - С.7–23.
- Безруков В.Н., Медведев А.А., Седов М.О. Анализ характеристик спектра структур внутрикадровой дискретизации сигналов телевизионных изображений/ Телекоммуникации и транспорт.- 2009 - №5 - С.14-17.
3. Безруков В.Н. Разработка и применение элементов теории преобразования сигналов изображений в системах прикладного телевидения. Автореферат диссертации на соискание учёной степени д.т.н., М.: МТУСИ, 1996. –С.18-21.