

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ МАТРИЦЫ НА КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Сорока Е.З., к.т.н., гл. научный сотрудник ЗАО «МНИТИ» (Московский научно-исследовательский телевизионный институт), e-mail: soroka@mniiti.ru.

ABOUT IMPACT OF PHOTO SENSOR MATRIX ON IMAGE QUALITY

Soroka E.Z.

Image distortions due to photo sensor matrix of TV camera have been analyzed by means of consecutive Fourier spectrum approach. Evaluations of arising linear and nonlinear distortion components have been defined. Method of sampling distortion reduction by means of postfiltering modification has been considered.

Key words: image distortion, photo sensor, sampling, Fourier spectrum, prefiltering, postfiltering.

Ключевые слова: искажения изображения, светочувствительная матрица, дискретизация, предфильтрация, постфильтрация.

Введение

Все датчики изображения, использующие для съемки светочувствительные матрицы, вносят в изображение определенные искажения, обуславливаемые двумерной пространственной фильтрацией и двумерной дискретизацией изображения.

Тракт передачи изображения в телевизионной или фотокамере содержит три последовательных звена: объектив, собственно матричный датчик и процессор сигналов (рис. 1).

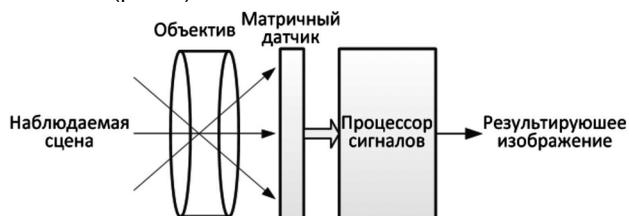


Рис. 1. Тракт передачи изображения

Действие объектива в первом приближении можно рассматривать как двумерную фильтрацию нижних частот, которая приводит к определенному ослаблению верхних частот в пространственном спектре формируемого изображения.

Действие матричного датчика описывается последовательно включенными фильтром низких частот и дискретизатором, которые более детально будут рассмотрены ниже.

Анализ дискретизации изображения светочувствительной матрицей

В целом, преобразования изображения в тракте передачи можно исследовать, используя классическую

Исследованы искажения изображения, вызываемые светочувствительной матрицей ТВ-камеры, с использованием последовательного спектрального метода. Получены оценки возникающих линейных и нелинейных составляющих искажений. Рассмотрен метод уменьшения искажений дискретизации путем модификации постфильтрации.

кую схему дискретизации, показанную на рис. 2 [1, 2].

Здесь использованы следующие обозначения:

$F(x, y)$, $F_1(x, y)$, $F_1^*(x, y)$, $F_2(x, y)$ – двумерные функции (изображения) соответственно на входе, после фильтра Φ_1 , после дискретизатора D и после фильтра Φ_2 ; $\mathcal{F}(f_x, f_y)$, $\mathcal{F}_1(f_x, f_y)$, $\mathcal{F}_1^*(f_x, f_y)$, $\mathcal{F}_2(f_x, f_y)$ – двумерные спектры соответствующих изображений; f_x и f_y – горизонтальная и вертикальная пространственные частоты; $G_1(x, y)$, $G_2(x, y)$ – импульсные характеристики фильтров Φ_1 и Φ_2 ; $\mathcal{K}_1(f_x, f_y)$, $\mathcal{K}_2(f_x, f_y)$ – частотные характеристики фильтров Φ_1 и Φ_2 ; $D(x, y)$ – двумерная дискретизирующая функция; $\mathcal{D}(f_x, f_y)$ – двумерная спектральная дискретизирующая функция.

Достоинство этой схемы состоит в том, что она позволяет четко разделить функции предфильтрации, постфильтрации и собственно дискретизации, которые в реальных технических системах практически всегда оказываются объединенными в конкретной аппаратуре.

Как известно, функция предфильтра Φ_1 реализуется за счет интегрирования входного излучения в пределах пиксельной площадки светочувствительной матрицы. В случае, если соседние площадки непосредственно граничат и имеют квадратную форму, двумерная импульсная характеристика предфильтра выражается произведением П-образных импульсных характеристик по обеим координатам в виде

$$G_1(x, y) = \Pi(nx) \Pi(ny), \quad (1)$$

где n – количество пикселей по вертикали (число строк), а $\Pi(z)$ определяется как

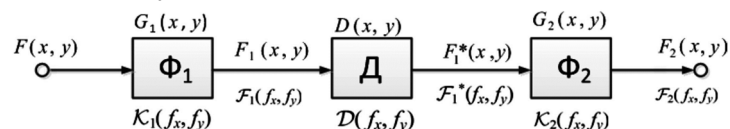


Рис. 2. Эквивалентная схема дискретизации изображения

$$\Pi(z) = \begin{cases} 1 & \text{при } |z| < \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2} & \text{при } |z| = \frac{1}{2}, \\ 0 & \text{при } |z| > \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь для унификации дальнейших оценок введена нормированная безразмерная высота изображения $h = 1$, что позволяет использовать единые шкалы частот в спектрах изображения независимо от его физического размера (в том числе и от размера матрицы). При этом унифицируется и размер пиксела, который можно записать как $1/n \times 1/n$. Кроме того, частота отсчетов (по обеим осям) составляет n , а максимальная частота, которая может быть передана отсчетами, составляет соответственно $n/2$.

Частотная характеристика фильтра Φ_1 выражается как преобразование Фурье от (1):

$$\mathcal{K}_1(f_x, f_y) = \frac{n}{2\pi f_x} \sin \frac{2\pi f_x}{n} \cdot \frac{n}{2\pi f_y} \sin \frac{2\pi f_y}{n}. \quad (3)$$

Эту частотную характеристику иллюстрируют линии уровня на рис. 3.

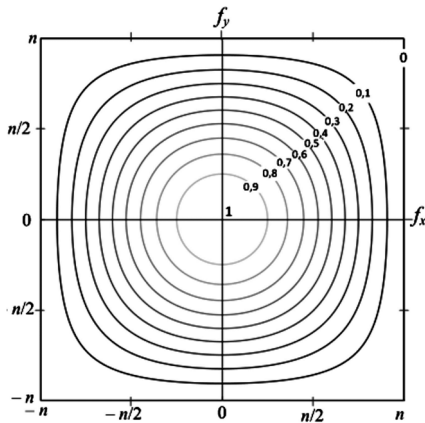


Рис. 3. Линии уровня частотной характеристики фильтра Φ_1

Светочувствительная матричная структура выполняет функции двумерного дискретизатора D , действие которого выражается матрицей отсчетов

$$F_1^*(x, y) = a^2 \sum_{k_1} \sum_{k_2} F_1(k_1 a, k_2 a) \delta(x - k_1 a) \delta(y - k_2 a), \quad (4)$$

где k_1 и k_2 – номера отсчетов по обеим осям, выражаемые целыми числами, δ – дельта-функция.

В результате дискретизации происходит периодизация спектра изображения, так что его спектр выражается в виде

$$F_1^*(f_x, f_y) = \sum_{l_1} \sum_{l_2} F_1(f_x - l_1 n, f_y - l_2 n), \quad (5)$$

где l_1 и l_2 – целые числа.

Это означает, что при дискретизации исходный спектр изображения периодизируется, т.е. повторяется со смещением по обеим частотным координатам с шагом, кратным n , т.е. числу строк изображения. При этом максимальная частота изображения, которая может быть воспроизведена без искажений в

соответствии с теоремой отсчетов Котельникова составляет $n/2$.

На рис. 4 представлен пример спектра изображения в виде двумерной гауссовой функции:

$$\mathcal{F}(f_x, f_y) = \exp[-a(f_x^2 + f_y^2)/4n^2], \quad (6)$$

где f_x, f_y – пространственные частоты в периодах на высоту изображения, n – число строк в изображении, a – постоянная, определяющая ширину спектра (т.е. скорость убывания спектра с частотой).

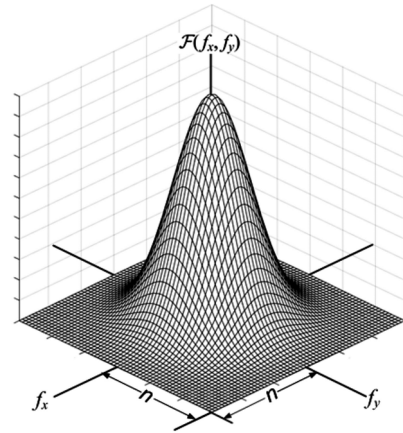


Рис. 4. Пример двумерного спектра изображения

На рис. 5 показан фрагмент спектра дискретизированного изображения $\mathcal{F}_1^*(f_x, f_y)$. Каждая составляющая спектра представлена двумя линиями уровня: зеленая линия соответствует границе спектра, при которой обеспечивается передача изображения без «ложных частот» – в соответствии с теоремой Котельникова, а черная линия уровня иллюстрирует пересечение составляющих при невыполнении теоремы.

Постоянная $a = 24$ подобрана таким образом, чтобы соседние по горизонтали и вертикали спектральные составляющие частично пересекались.

Таблица характерных значений спектра изображения

f	0	$n/2$	N
$\mathcal{F}_1(f)$	1	0,22	0,0025

Восстановление изображения из отсчетов выполняет фильтр Φ_2 , который должен подавлять побочные составляющие спектра. Как известно, функции этого фильтра выполняет устройство воспроизведения и зрение наблюдателя. Для упрощения двумерную пространственную частотную характеристику устройства воспроизведения можно считать совпадающей с частотной характеристикой предфильтра (3), т.е. принять

$$\mathcal{K}_2(f_x, f_y) = \frac{n}{2\pi f_x} \sin \frac{2\pi f_x}{n} \cdot \frac{n}{2\pi f_y} \sin \frac{2\pi f_y}{n}. \quad (7)$$

В результате спектр воспроизводимого изображения выражается как

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_2(f_x, f_y) &= \mathcal{K}_2(f_x, f_y) \mathcal{F}_1^*(f_x, f_y) = \\ &= \mathcal{K}_2(f_x, f_y) \sum_{l_1} \sum_{l_2} F_1(f_x - l_1 n, f_y - l_2 n). \end{aligned} \quad (8)$$

Оценка искажений, вызываемых дискретизацией изображения

Если учитывать только четыре ближайших мешающие спектральные составляющие по f_x и f_y , показанные

на рис. 4, (8) сводится к следующему выражению:

$$\mathcal{F}_2(f_x, f_y) = \mathcal{K}_2(f_x, f_y) \cdot [\mathcal{F}_1(f_x, f_y) + \mathcal{F}_1(f_x - n, f_y) + \mathcal{F}_1(f_x + n, f_y) + \mathcal{F}_1(f_x, f_y - n) + \mathcal{F}_1(f_x, f_y + n)]. \quad (9)$$

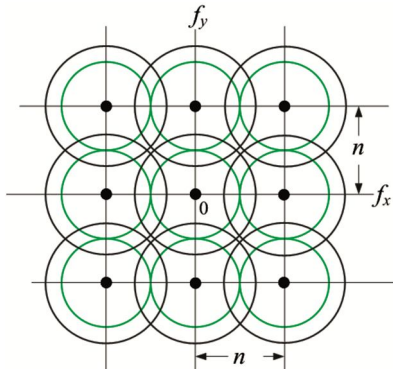
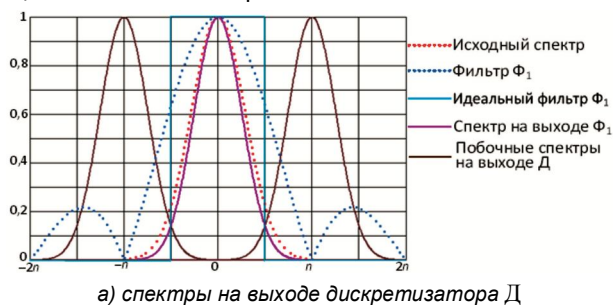


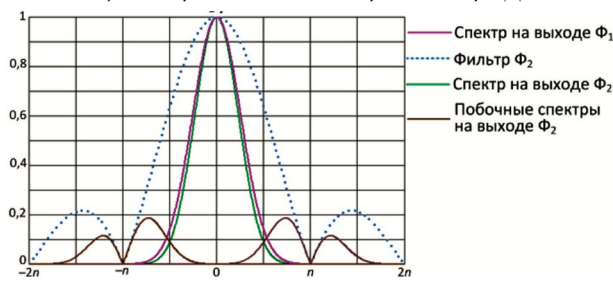
Рис. 5. Фрагмент спектра дискретизированного изображения

Для оценки возникающих искажений на рис. 6 приводятся графики сечений спектров по осям координат f_x и f_y .

Для оценки искажений, возникающих из-за мешающего действия четырех побочных составляющих спектра, расположенных по диагональным направлениям в плоскости частот (f_x, f_y) , на рис. 7 показаны графики сечений основного и мешающих спектров в этих направлениях в разных точках эквивалентной схемы дискретизации. Показан также вид частотной характеристики идеального фильтра, обеспечивающего выполнение теоремы отсчетов.



а) спектры на выходе дискретизатора Д



б) спектры на выхода фильтра Φ_2

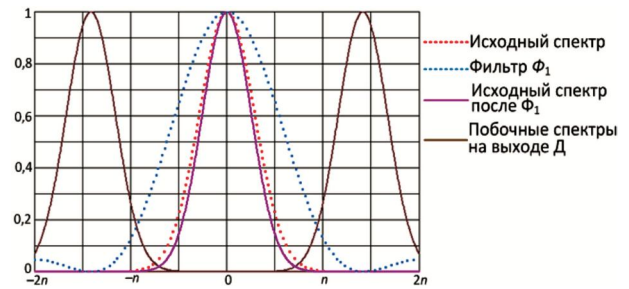
Рис. 6. Преобразования спектра изображения по частотам f_x и f_y

(частота в периодах на высоту изображения)

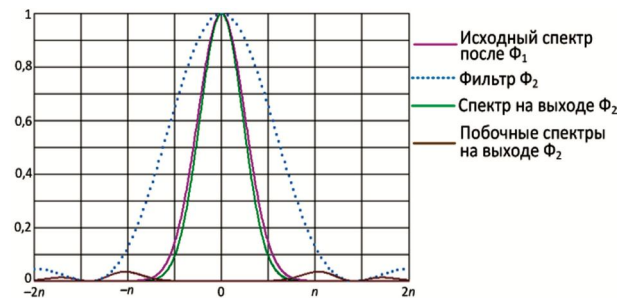
Как видно из сравнения мешающих спектров на выходе фильтра Φ_2 (коричневые графики) на рис. 6 и рис. 7, их проявление по «диагональным» частотам существенно ниже, чем по осям f_x и f_y .

Очевидными способами уменьшения искажений из-за дискретизации изображения светочувствительной матрицей являются улучшение характеристик

предфильтра Φ_1 и/или повышение частоты дискретизации путем перехода к матрице с кратно увеличенным числом пикселей по горизонтали и вертикали [3]. Однако как фильтр Φ_1 , так и дискретизатор Д в ТВ-камере имеют конструктивно фиксированные характеристики.



а) спектры на выходе дискретизатора Д



б) спектры на выходе фильтра Φ_2

Рис. 7. Преобразования спектра изображения по «диагональным» частотам (частота в периодах на высоту изображения)

Имеется простая возможность уменьшения искажений изображения путем модификации характеристик постфильтра Φ_2 . Эта модификация состоит в удвоении числа отсчетов по каждой координате, причем новые отсчеты получаются из имеющихся с помощью линейной интерполяции по каждой координате с помощью дискретного фильтра ([1], гл. 6) с импульсной характеристикой по оси x

$$g_d^*(x) = 0,5 \cdot \left(x + \frac{1}{2n} + \delta(x) + 0,5\delta\left(x - \frac{1}{2n}\right)\right). \quad (10)$$

Здесь размер пиксела (шаг дискретизации в матрице) по-прежнему составляет $1/n$.

Благодаря такой фильтрации число отсчетов удваивается, и новые отсчеты находятся как среднее двух соседних исходных. Частотная характеристика этого фильтра имеет вид

$$k_d^*(f) = \cos^2(\pi f / 2n). \quad (11)$$

Следует заметить, что переход от линейной интерполяции к более сложным алгоритмам дает лишь незначительное улучшение [5].

Завершающим элементом модифицированного постфильтра является аналоговый фильтр с частотной характеристикой (определяемой с учетом уменьшения вдвое размера пиксела)

$$k_a(f) = \text{sinc}(\pi f / 2n), \quad (12)$$

который соответствует структуре матрицы средства отображения.

Применение подобного фильтра для преобразования по оси y обеспечивает получение новых пикселей из исходных путем билинейной интерполяции [4].

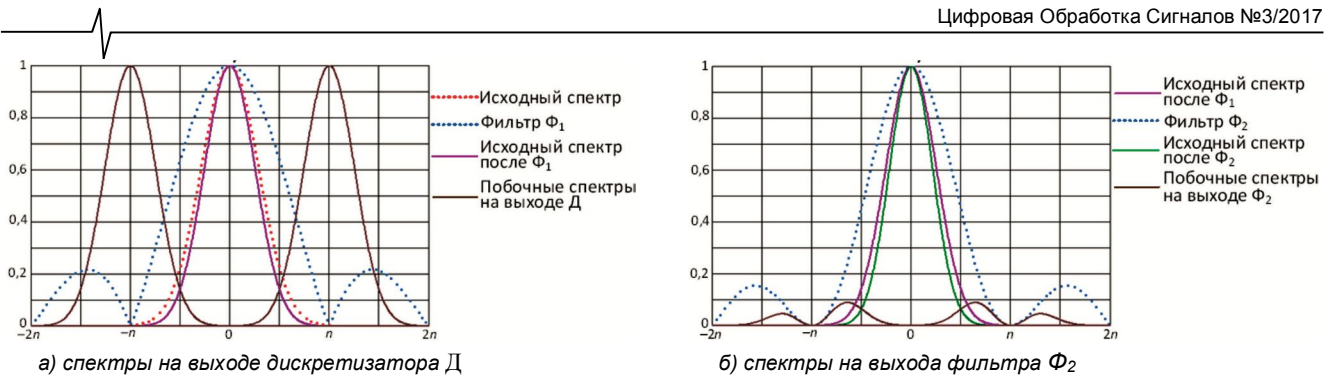


Рис. 8. Преобразования спектра изображения

по частотам f_x и f_y при использовании интерполяции пикселей (частота в периодах на высоту изображения)



а)



б)

в)

Рис. 9. Иллюстрация обработки изображения с удвоением числа пикселей по каждой координате и интерполяцией

На рис. 8 показаны графики сечений основного и побочных спектров в разных точках эквивалентной схемы дискретизации с использованием постфильтра, состоящего из дискретного фильтра (11), обеспечивающего интерполяцию отсчетов, и выходного аналогового фильтра с частотной характеристикой (12).

Как видно из сравнения спектральных характеристик на рис. 6(б) и 8(б), применение интерполяции пикселей дает существенное уменьшение амплитуды побочных составляющих спектра (не менее 6 дБ). Тем самым обеспечивается заметное повышение качества результирующего изображения. Это иллюстрирует рис. 9, где показан женский портрет (а), увеличенный фрагмент портрета (б) и этот же фрагмент с удвоенным количеством пикселей по каждой оси и интерполяцией. В последнем фрагменте практически полностью устранены артефакты дискретизации – блочность (мозаичность) изображения и ступенчатость наклонных линий.

Заключение

Выполнен детальный анализ искажений изображения, вызываемых светочувствительной матрицей

ТВ-камеры, с использованием спектрального подхода. Получены выражения для оценки искажений, вызываемых двумерной предфильтрацией в матрице, собственно дискретизацией за счет матрицы и двумерной постфильтрацией при восстановлении изображения.

Исследован вариант постфильтрации с использованием удвоения числа пикселей по каждой координате и получением дополнительных пикселей путем интерполяции исходных, что обеспечивает существенное ослабление искажений, вызываемых дискретизацией – мозаичности изображения и ступенчатости наклонных линий.

Литература

1. Игнатьев Н.К. К дискретизации сигналов с неограниченным спектром. – Электросвязь, 1960, № 2, с. 71-72.
2. Игнатьев Н.К. Дискретизация и ее приложения. – М.: Связь, 1980. – 264 с.
3. Красильников Н.Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений: учеб. пособие. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 608 с. – гл. 4.
4. Прэнтт У. Цифровая обработка изображений. Кн. 1. – М.: Мир. – 1982 – 312 с. – Гл. 4.
5. Ваганов С.Е., Хашин С.И. Сравнение алгоритмов удвоения размеров изображения. // Моделирование и анализ информационных систем – 2016. – Т. 23. – № 4. – С. 389–400.