

П. Варгин

Чёткость и разрешающая способность цифровой телевизионной системы

Введение

В условиях конкуренции на рынке телевизионной аппаратуры большое значение приобретает критерий соотношения цена/качество телевизионных систем и их составных частей. Цена товара для производителя ограничена его себестоимостью, а контроль качества требует дополнительных расходов, увеличивающих себестоимость. Для выхода из этого, казалось бы, замкнутого круга, необходимо применить критерий цена/качество к самому процессу контроля качества. Известно, что качество изделия определяется набором требований к нему, изложенных в его Программе испытаний. Каждому требованию сопоставляется методика испытаний изделия на соответствие данному требованию. При разработке требований и методик следует минимизировать затраты на испытания, включая в набор требований к изделию наиболее важные и используя для контроля параметров изделия средства измерений и испытательное оборудование минимальной стоимости, с учётом допустимой погрешности измерений.

Важными параметрами оценки качества телевизионной системы являются её чёткость и разрешающая способность, которые характеризуют способность системы к воспроизведению мелких деталей изображения. Минимизация затрат на измерение этих параметров достигается при их визуальной оценке с помощью телевизионных испытательных таблиц. Однако, возможности такой оценки для цифровых телевизионных систем далеко не всегда очевидны. Более того, они часто являются взаимоисключающими для этих двух параметров. Рассмотрим здесь особенности измерения чёткости и разрешающей способности – *резольвометрии* цифровых телевизионных систем с помощью испытательных таблиц, при использовании как визуальных, так и инструментальных методов.

Дадим определения указанных параметров для телевизионной системы:

- чёткость – число элементов разложения (телевизионных линий, пикселей, сенселей) по вертикали телевизионного раstra, – обозначается буквой M , измеряется в телевизионных линиях, твл;
- разрешающая способность – максимальное число наблюдаемых с заданным (пороговым) контрастом K тёмных и

светлых штрихов равной ширины, приходящихся на размер высоты телевизионного растра, — обозначается буквой R и измеряется в телевизионных линиях, твл.

Различают *поперечную разрешающую способность* R_y , определяемую по вертикали и *продольную разрешающую способность* R_x , определяемую по горизонтали телевизионного изображения.

Приведённые определения не единственно возможные. Наше определение чёткости соответствует *чёткости разложения*, но, например, в [1] противопоставляется *кажущейся чёткости*, а в [2] эквивалентно нашему определению разрешающей способности, при том, что последняя определяется в [2] различением двух одиночных штрихов (импульсов), как в оптике.

Заметим, что определение разрешающей способности содержит условие задания порогового контраста, возможный выбор которого неоднозначен. Например, в физической оптике $K = K_0 \approx 0,27$, в соответствии с критерием Релея, а в физиологической оптике $K = K_V = 0,02$, часто принимается как пороговый контраст для зрительной системы, хотя в действительности он зависит как от условий наблюдения, так и от наблюдателя. Выбор порогового контраста зависит от метода измерений разрешающей способности — инструментального или визуального.

Принятие одинаковых единиц измерения для разнородных величин в приведенных определениях объясняется традицией, существующей в телевидении, а оправдывается желанием сопоставить разрешающую способность с числом активных строк в растре [1] и подчеркиванием специфики определения разрешающей способности в телевидении — её связи с высотой растра. К сожалению, такая традиция содержит опасность смешения двух различных понятий.

Чёткость

Чёткость цифровой телевизионной системы можно измерить визуально с помощью элементов телевизионных испытательных таблиц — зонных решеток по положению на их изображении центра симметрии постороннего узора (муара) относительно линейной шкалы чёткости. Этот центр соответствует тому месту решетки, где ширина штрихов решетки близка к размеру элемента растра. Достаточно полная картина муара проявляется, если пространственный спектр изображения решетки значительно превышает пространственную частоту Котельникова–Найквиста, равную половине частоты дискретизации телевизионной системы.

Термин «зонная решетка» заимствован из дифракционной оптики, где используется стеклянная фотопластинка с изображением концентрических колец (рис. 1) с радиусами, совпадающими с радиусами зон Френеля, которая действует как собирающая линза. Внешние радиусы зон (колец) Френеля, образующих зонную решетку, определяются выражением:

$$R_n = a\sqrt{n}, \quad (1)$$

где: a – постоянная зонной решетки – радиус центрального кружка, $n = 1, 2, \dots$ – номер кольцевой зоны.

Если использовать изображение концентрических колец с

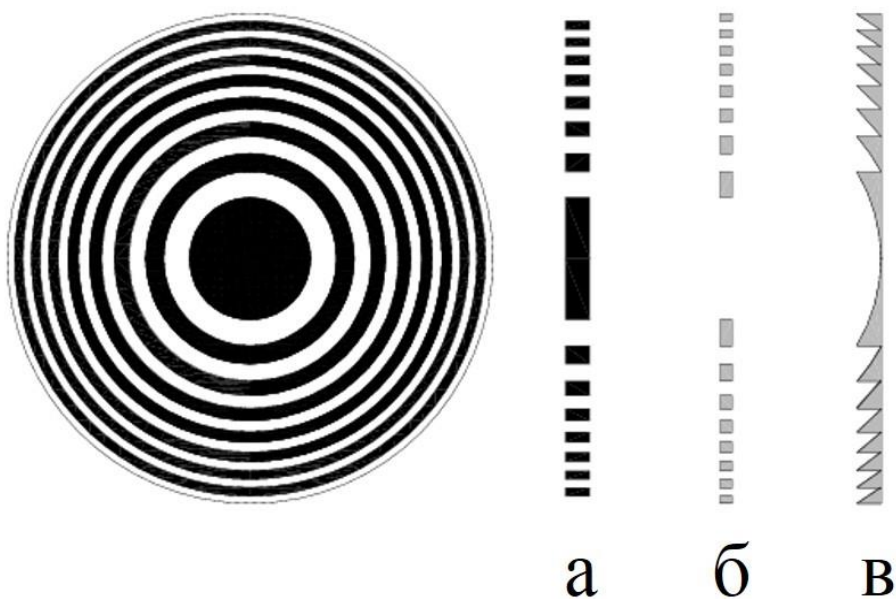


Рис. 1. Зонная пластинка (слева) с четными прозрачными зонами – a , нечетными – $б$; фазовая (гравированная) линза Френеля – $в$

радиусами, определёнными в соответствии с выражением (1), в качестве испытательного изображения (миры) для телевизионной системы, то на телевизионном изображении миры можно увидеть посторонний узор (ПУ) в виде концентрических колец как на рис. 2, где стрелками указаны так называемые ПУ первого порядка, для которых ширина кольца зоны Френеля примерно равна размеру элемента изображения. На рис. 2 показано цифровое изображение колец Френеля с синусоидальным профилем, который используется для тестовых изображений колец наряду с бинарным профилем.

Центры ПУ одного порядка находятся на одинаковом расстоянии по горизонтали и вертикали от центра колец Френеля при квадратном элементе изображения. Расстояние для ПУ первого порядка определяется выражением:

$$L = \frac{a^2 - \delta^2}{2\delta} \approx \frac{a^2}{2\delta} = \frac{a^2 M}{2H}, \quad (2)$$

где: δ – размер элемента изображения, H – высота телевизионного раstra. В соответствие с этим выражением чёткость изображения можно определять по линейной шкале в зависимости от L по формуле:

$$M = \frac{2H}{a^2} L, \quad (3)$$

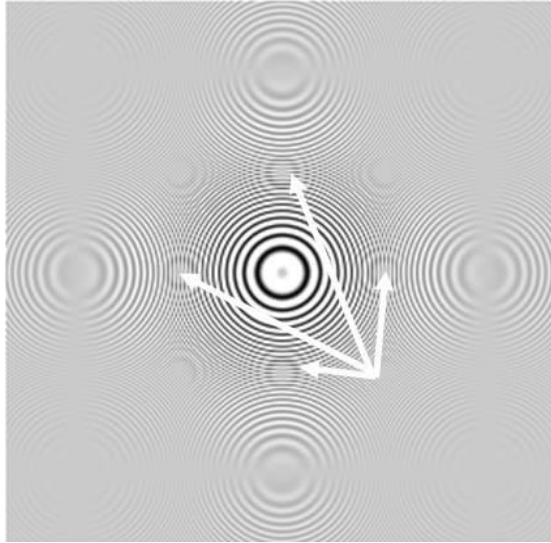


Рис.2. Зонная пластинка Френеля.
Стрелками показаны посторонние
кольцевые узоры первого порядка

ПУ первого порядка состоят из кольцевых зон: чередующихся чёрных и белых полосок. Радиусы этих зон определяются выражением:

$$r_k = \frac{a\sqrt{2k-1}}{2}, \quad (4)$$

где $k = 1, 2, \dots$ – номер зоны, а r_k и a измеряются в элементах изображения.

Зонная решетка, как элемент испытательной таблицы, представляет собой часть зонной решетки Френеля, вырезанную в виде прямоугольника и слегка модифицированную заменой отрезков окружностей отрезками прямых линий. Её расчет можно найти в [3].

Пример использования зонных решеток для измерения чёткости приведен на рис. 3, где показана испытательная таблица ИТ-72 [3]. Здесь решетки размещены в центре и углах таблицы. С одной стороны каждой решетки помещена линейная шкала, деления которой обозначены точками и короткими горизонтальными штрихами, а с другой, колонки цифр от 3 до 6, которым соответствует чёткость от 300 до 600 твл, соответственно. В 1972 г, когда была разработана эта таблица, в СССР действовал 625-строчный вещательный стандарт разложения, в котором видимых на экране (активных) строк было всего 576 и именно это число определяет положение центра

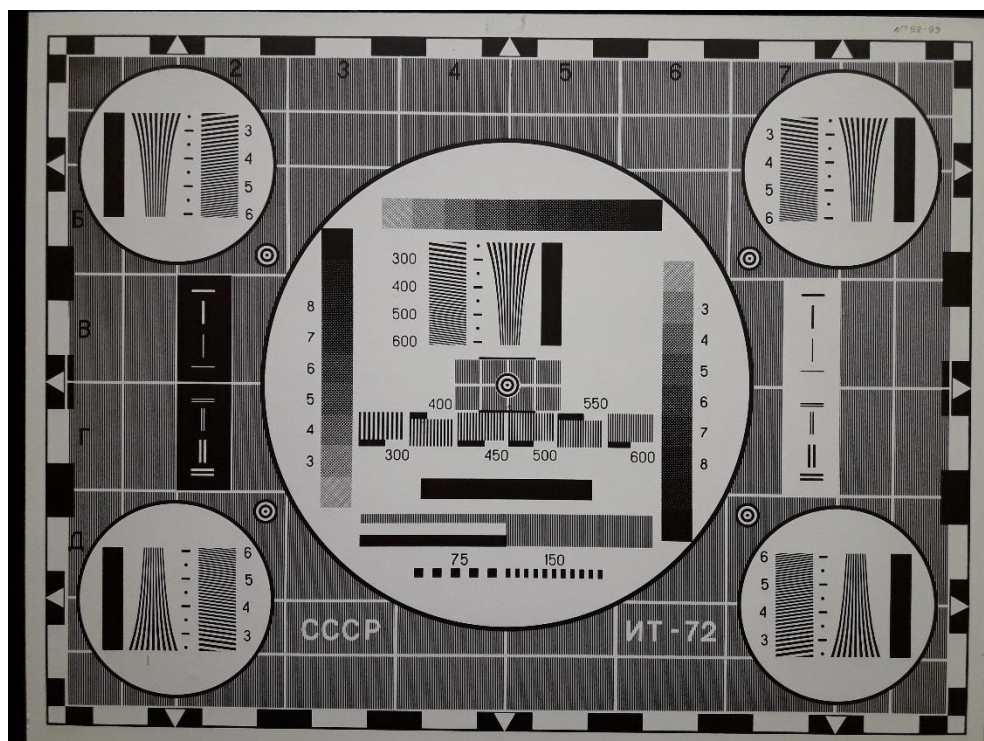


Рис. 3. Испытательная таблица

постороннего узора на зонных решетках при испытаниях телевизионных систем стандартного разложения. Наличие зонных решеток по углам таблицы представляется излишним, поскольку такая решетка имеется в её центре, где контраст постороннего узора (муара) обычно максимален, благодаря максимальному разрешению объектива телевизионной камеры в центре изображения.

Измерение чёткости телевизионной системы при испытаниях имеет смысл, если ее стандарт разложения не известен или нет уверенности в правильности работы её развёртки.

Ниже приведена таблица стандартов разложения цифрового телевидения [4], где в колонке «стандарт разложения» приведена возможная стандартная чёткость телевизионного изображения (M), а в колонке *разрешение* приведено число элементов – пикселей (*picture's element – pix element – pixel*) телевизионного изображения по горизонтали и вертикали $N \times M$.

Стандарт разложения M	Развертка	Разрешение, пикселей $N \times M$	Соотношение сторон		Частота кадров, Гц	Применение
			кадра	пикселя		
720p	Прогрессивная	1280×720	16:9	1:1	24, 50, 59.94	<i>HDTV, BD, HD DVD, HDV</i>
		960×720	16:9	1.33:1	23,975, 24, 25, 29,97, 30, 50, 59,94, 60	<i>DVCPROHD</i>
			4:3	1:1	25, 29,97	<i>DVCPROHD</i>
1080i	Чересстрочная	1920×1080	16:9	1:1	23,975, 24, 25, 29,97, 30, 50, 59,94, 60	<i>HDTV, BD, HD DVD, HDV</i>
			1440×1080	16:9	1.33:1	25, 29,97
		1280×1080	4:3	1:1	25, 29,97	<i>HDV</i>
			16:9	1.5:1	29.97	<i>DVCPROHD</i>
1080p	Прогрессивная	1920×1080	16:9	1:1	23,975, 24, 25, 29,97, 30, 50, 59,94, 60	<i>HDTV, BD, HD DVD, HDV</i>
		1440×1080	16:9	1.33:1	24 (23.975), 25, 29,97	<i>HDCAM, HDV</i>
2160p	Прогрессивная	3840×2160	16:9	1:1	23,975, 24, 25, 29,97, 30, 50, 59,94, 60, 120	<i>UHDTV1 (4K)</i>
4320p	Прогрессивная	7680×4320	16:9	1:1	23,975, 24, 25, 29,97, 30, 50, 59,94, 60, 120	<i>UHDTV2, Super Hi-Vision (8K)</i>

Разрешающая способность

Продольная разрешающая способность аналоговой телевизионной системы может быть измерена визуально с помощью

элементов телевизионной испытательной таблицы – групп вертикальных клинообразных чёрных и белых полосок по положению границы между различимыми и неразличимыми полосками группы относительно линейной шкалы. Этот метод измерений использован при разработке таблицы ИТ-72 (рис. 3), где указанные элементы размещены в центре и углах таблицы. Слева или справа от каждой группы размещена линейная шкала, деления которой обозначены точками и короткими горизонтальными штрихами, а штрихам сопоставлены колонки цифр от 3 до 6, которым соответствует разрешающая способность от 300 до 600 твл соответственно. При визуальном измерении разрешающей способности с использованием указанного метода пороговый контраст K задаётся зрительной системой наблюдателя элементов таблицы.

Важно отметить наличие групп клинообразных полосок не только в центре, но и в каждом из углов таблицы ИТ-72. Это позволяет определять качество оптики (объектива) телевизионной системы и, в частности, выявлять при испытаниях случаи перекоса установки оптической системы относительно фотодатчика изображения. Однако таблица ИТ-72 не подходит для определения визуальным методом разрешающей способности цифровых телевизионных систем из-за появления на изображениях групп ПУ (муаров). Если при измерении чёткости муары на зонных решетках необходимы, то при измерении разрешающей способности на группах клинообразных полосок они вредны, поскольку мешают определению границ различения полосок.

Цифровая телевизионная система отличается от аналоговой тем, что её изображение дискретизировано не только в вертикальном, но и в горизонтальном направлении и, кроме того, оно дискретизировано (квантовано) по яркости. Дискретизация, то есть замена непрерывного сигнала его выборками, в общем случае приводит к потере части информации, содержащейся в сигнале, что может приводить к искажениям сигнала, восстановленного с использованием выборок, по сравнению с исходным. Восстановление включает интерполяцию межвыборочных значений сигнала. Обычно, для воспроизведения изображения используют ступенчатую интерполяцию нулевого порядка, когда каждой выборке соответствует одна светящаяся площадка (ступенька, пиксель) экрана. С развитием технологии создания телевизионных экранов и появлением стандартов разложения высокой и сверхвысокой чёткости (см. табл.) возникает проблема их совместимости со стандартами меньшей чёткости, при решении которой следует использовать интерполяцию более высоких порядков. Например, двумерную линейную или с использованием двумерных квадратичных или кубических сплайнов. В данном случае

интерполирующие функции вычисляются лишь в точках, соответствующих расположению пикселей экрана повышенной чёткости, а далее следует опять ступенчатая интерполяция. Фактически, в этом случае производится передискретизация изображения с целью повышения чёткости.

Рассмотрим особенности процесса воспроизведения чёрно-белых решёток цифровой телевизионной системой с помощью его математического моделирования. Решётку можно характеризовать числом штрихов на высоту видимого раstra. При этом ширина горизонтального штриха, спроецированного на фотодатчик, выраженная в пикселях, определяется выражением:

$$Y = \frac{M}{m}, \quad (5)$$

где: M – число строк фотодатчика (чёткость), m – число штрихов.

Профиль решетки вдоль выбранного направления x , можно описать некоторой периодической функцией $E(x, X)$ с периодом X .

Любую функцию $f(x)$, заданную на отрезке X , можно сделать периодической с периодом X , подстановкой в неё вместо аргумента x , функции «повторитель» («репитер»):

$$r(x, X) = x - X \cdot \left\lfloor \frac{x}{2X} \right\rfloor, \quad (6)$$

где: $\lfloor \cdot \rfloor$ – обозначение Айверсона функции – «пол» – округление вниз. Задание периодических функций с помощью повторителя обеспечивает быстрое их вычисление, поскольку операция округления быстрая.

Профиль прямоугольной решетки с шириной штриха Y можно задать с помощью функции «меандр» с периодом $2Y$, используя повторитель. При этом функция «меандр» для вертикального направления y определяется выражением:

$$m(y, Y) = 1 - 2 \left\lfloor \frac{r(y, 2Y)}{Y} \right\rfloor. \quad (7)$$

График этой функции приведён на рис. 4 пунктиром. С использованием меандра профиль прямоугольной (бинарной) решетки:

$$E_M(y, 2Y) = E_0 + E_1 m(y, Y), \quad (8)$$

где: E_0 – среднее значение освещённости фотодатчика, E_1 – амплитуда освещённости.

Сигнал элемента фотодатчика – сенселя (*sensor element*) с номером i определяется выражением:

$$U_d(i, Y) = A \int_{y_{i-1}}^{y_i} E_M(y, 2Y) dy = AE_0 + AE_1 \int_{i-1}^i m(y, Y) dy, \quad (9)$$

где: $y_{i-1} = i - 1$ и $y_i = i$ – координаты верхней и нижней границ пикселя, A – чувствительность фотодатчика (В/лк).

Неопределённый интеграл от функции «меандр» представляет собой пилообразную функцию с периодом $2Y$, показанную на рис. 4 сплошной линией, с использованием повторителя определяется выражением:

$$q(y, Y) = \int m(y, Y) dx = Y \cdot \left[1 + \left(\frac{r(y, 2Y)}{Y} - 1 \right) (-1)^{\left\lfloor \frac{r(y, 2Y)}{Y} \right\rfloor} \right]. \quad (10)$$

С учётом (9) и (10), а также возможного сдвига вниз положения решетки относительно сенселей Δy , получим аналитическое

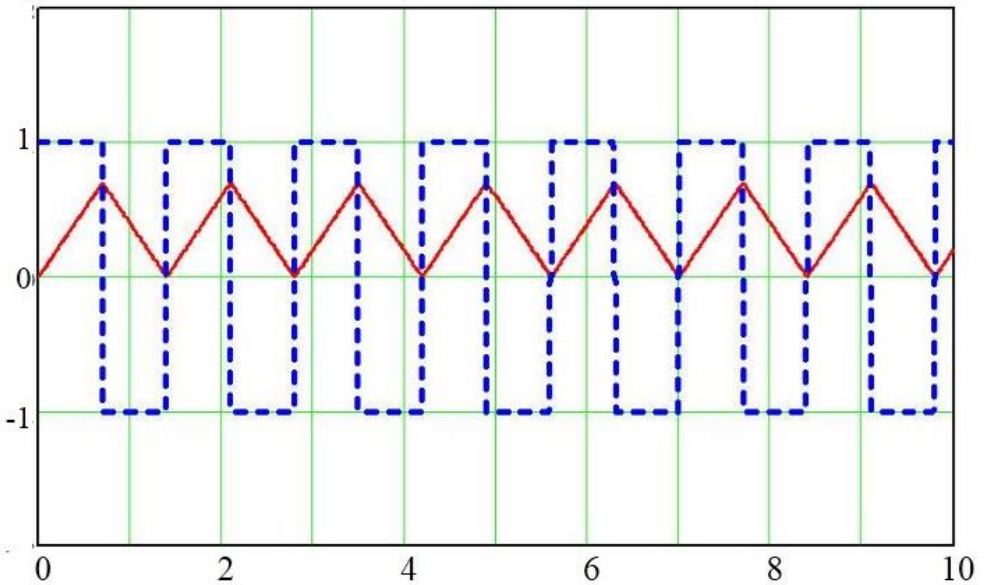


Рис.4. Графики меандра (пунктир) и интеграла меандра (сплошная линия)

выражение для дискретного сигнала сенселя с номером i :

$$U_d(i, \Delta y, Y) = A \{ E_0 + E_1 \cdot [q(i - \Delta y, Y) - q(i - \Delta y - 1, Y)] \}, \quad (11)$$

Интерполятор нулевого порядка определяется выражением:

$$h(x) = 1 \text{ при } 0 \leq x \leq 1 \text{ и } h(x) = 0 \text{ при других значениях } x, \quad (12)$$

а ступенчатая интерполяция видеосигнала фотодатчика:

$$U(y, \Delta y, Y) = \sum_i U_d(i, \Delta y, Y) \cdot h(i - y). \quad (13)$$

На рис. 5 приведены графики видеосигналов фотодатчика, рассчитанные в соответствии с (13) при помощи *Mathcad* для $E_0 = 0,5$, $E_1 = 0,4$, $Y = 1$, с различными сдвигами решетки Δy относительно сенселей.

Первый график (вверху) соответствует освещению нечётных сенселей и затенению чётных, что обеспечивает максимальную амплитуду видеосигнала. Второй (в середине) соответствует большему освещению нечётных и меньшему чётных сенселей, что приводит к уменьшению потенциального рельефа фотодатчика. Третий график (внизу) соответствует одинаковой освещённости сенселей при сдвиге

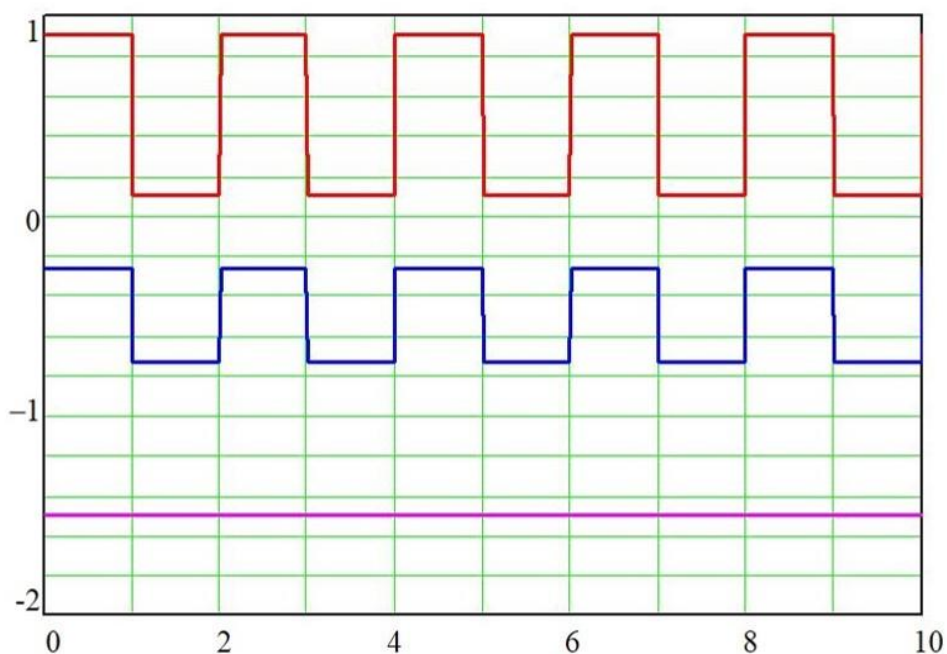


Рис.5. Графики видеосигналов при единичной ширине штриха и различных сдвигах решетки относительно сенселей фотодатчика:

$\Delta y = 0$ (вверху), $\Delta y = 0,2$ (в середине), $\Delta y = 0,5$ (внизу)

изображения штрихов на половину сенселя, что приводит к полному исчезновению потенциального рельефа и, соответственно, телевизионного изображения решетки чёрно-белых штрихов.

Приведенный вариант расчёта иллюстрирует большое значение относительного сдвига оптического изображения штриха и положения сенселя фотодатчика. Поскольку, при ширине изображения штриха не равной единице сдвиг изменяется вдоль раstra, видеосигнал и, соответственно, изображение решетки цифровой телевизионной системы меняется самым причудливым образом. Например, на рис. 6 приведены графики видеосигналов фотодатчика при $Y = 0,9$ и сдвигах: $\Delta y = 0$ и $\Delta y = 0,5$. Можно видеть, что в данном случае потенциальный рельеф не исчезает, при начальном сдвиге на половину сенселя, но изменяется, по сравнению с нулевым сдвигом. Можно также заметить,

что в обоих случаях профиль видеосигнала имеет собственный период, равный девяти сенселям (пикселям).

При ширине штриха, выраженной в виде приведенной дроби $Y = a/b$, собственный период независимо от сдвига равен:

$$T = \frac{3 - (-1)^b}{2} \cdot a, \quad (14)$$

В приведённом в начале статьи определении разрешающей способности телевизионной системы содержится условие задания порогового контраста. Контраст объекта периодической структуры

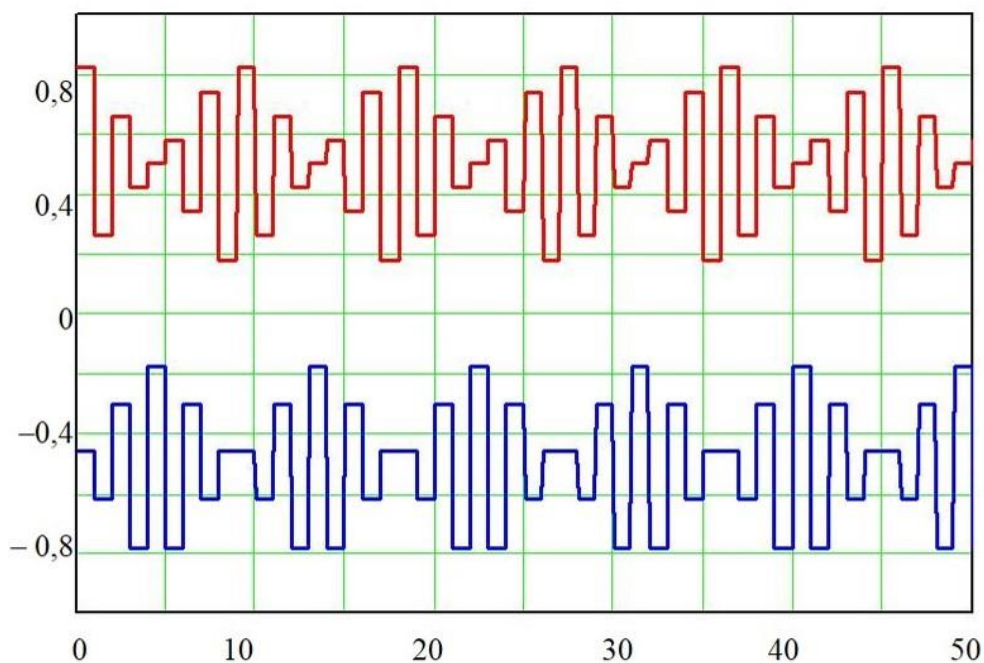


Рис. 6. Графики видеосигналов фотодатчика при ширине штриха $Y = 0,9$ пс: при отсутствии сдвига (вверху); при сдвиге на половину пикселя (внизу)

(контрастность Майкельсона) определяется выражением;

$$K_o = \frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}, \quad (15)$$

где B_{\max} и B_{\min} — максимальная и минимальная его яркости. Другое название этой величины — модуляция.

Контраст телевизионного изображения решетки штрихов, как и картина потенциального рельефа, также зависит и от ширины штриха Y и от сдвига Δu решетки относительно сенселей. Максимальный

реализуемый контраст (МРК) изображения прямоугольной решетки идеальной телевизионной системы достигается совмещением границы смежных сенселей и границы двух смежных штрихов. Для прямоугольной решетки это локальный контраст.

Будем считать телевизионную систему идеальной, если она не имеет искажений, кроме связанных с переходом к дискретному изображению. Обозначим МРК идеальной телевизионной системы, воспроизводящей прямоугольную в профиле решетку штрихов, символом K_{MR} и, анализируя значение этой величины на различных интервалах толщины штриха – Y , найдем, что:

$$\begin{aligned}
 K_{MR} &= 1, \text{ при } Y > 1 \\
 K_{MR} &= K_o(2Y - 1), \text{ при } \frac{1}{2} < Y < 1, \\
 K_{MR} &= K_o(1 - 2Y), \text{ при } \frac{1}{3} < Y < \frac{1}{2}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

где: K_o – контраст решетки чёрных и белых штрихов, согласно выражению (15).

Любую телевизионную систему можно оценивать *функцией передачи максимального реализуемого контраста* (ФП МРК):

$$T_{MR}(Y) = \frac{K_{MR}}{K_o}, \tag{17}$$

которая в соответствии с выражениями (16), зависит только от величины Y .

Удобно выражать эту функцию в виде зависимости от величины обратной толщине штриха Y , которую можно назвать частотой штрихов. Для горизонтально расположенных штрихов обозначим эту частоту буквой v , для вертикально расположенных – u . При этом для идеальной телевизионной системы в соответствии с выражениями (16) и (17):

$$\begin{aligned}
 T_{MR}(v) &= \frac{2}{v} - 1, \text{ при } 1 < v < 2 \\
 T_{MR}(v) &= 1 - \frac{2}{v}, \text{ при } 2 < v < 3 \\
 T_{MR}(v) &= \frac{4}{v} - 1, \text{ при } 3 < v < 4 \\
 T_{MR}(v) &= 1 - \frac{4}{v}, \text{ при } 4 < v < 5
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Как можно видеть, здесь удобство заключается в том, что интервалы частоты штрихов одинаковы по величине, то есть шкала частот линейна.

ФП МРК идеальной дискретной телевизионной системы при наблюдении решетки прямоугольного профиля в общем случае определяется как:

$$T_{MR}(v) = (-1)^{\lfloor v \rfloor} \left(1 - \frac{2 \left\lfloor \frac{v+1}{2} \right\rfloor}{v} \right), \quad (19)$$

На рис. 7 приведён график ФП МРК, полученный с

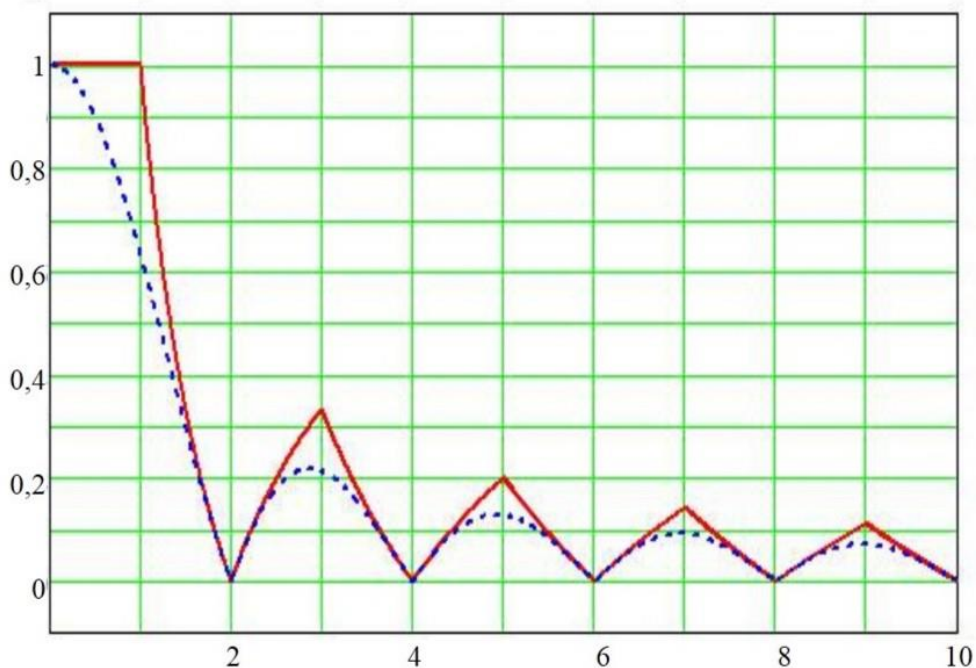


Рис. 7. Графики ФП МРК для решеток различного профиля: прямоугольной (сплошная линия) и синусоидальной (пунктир) использованием выражения (19) (сплошная линия). Функция $T_{MR}(v)$, характеризующая идеальную телевизионную систему с дискретизацией изображения и не зависящая от сдвига изображения относительно сенселей фотодатчика телевизионной камеры, может служить эталоном для сравнения с функцией передачи максимального реализуемого контраста реальной телевизионной системы $T_{mr}(v)$, полученной в результате испытаний телевизионной системы.

На рис. 7 также приведён график ФП МРК (пунктир) идеальной телевизионной системы с использованием синусоидально-модулированной решетки, примеры изображения которой показаны на

рис. 8. Такие решетки могут использоваться для определения характеристик телевизионных систем наряду с описанными выше решетками с профилем в виде меандра.

Использование подобных решёток осложняется более жесткими требованиями к технологии воспроизведения их профиля на испытательных таблицах. Для синусоидальной решетки профиль освещённости матрицы фотодатчика в вертикальном направлении определяется выражением:

$$E_S(y, 2Y) = E_0 + E_1 \sin\left(\frac{2\pi}{2Y} y\right), \quad (20)$$

где: E_0 и E_1 – постоянная составляющая и амплитуда решетки.

Это выражение можно сравнить с (8): и то, и другое можно

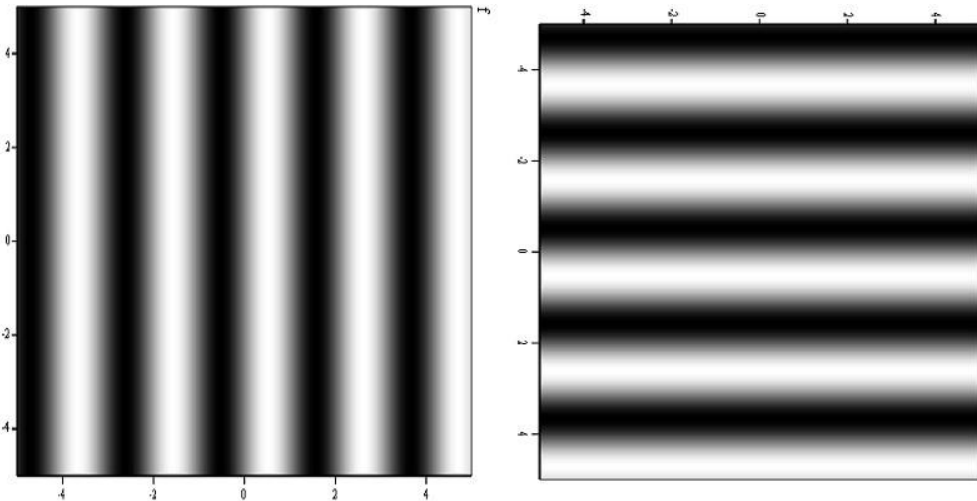


Рис. 8. Изображения решеток чёрно-белых полос с синусоидальным профилем: вертикальной (слева) и горизонтальной (справа) преобразовать в функции от пространственной частоты. При этом выражению (20) соответствует:

$$E_S(y, \nu) = E_0 + E_1 \sin(\pi \nu y), \quad (21)$$

где ν – пространственная частота, т. е. количество полупериодов синусоиды, приходящихся на сенсель фотодатчика. МРК телевизионного изображения такой решетки не является локальным, то есть не может быть определен контрастом соседних сенселей при любом сдвиге решетки относительно сенселей фотодатчика.

Для определения МРК синусоидальной решетки необходимо получить (реализовать) симметричное расположение сенселя как относительно положительной полуволны синусоиды, так и

относительно отрицательной. Если такие расположения получены, то максимальный реализуемый сигнал сенселя определяется выражением:

$$U_{\max_S}(v) = U_0 + U_1 \int_{-0,5}^{0,5} \cos(\pi v y) dy = U_0 + U_1 \frac{\sin(\pi v/2)}{\pi v/2} = U_0 + U_1 \operatorname{sinc}(\pi v/2), \quad (22)$$

а минимальный сигнал:

$$U_{\min_S}(v_s) = U_0 - U_1 \operatorname{sinc}(\pi v_s/2), \quad (23)$$

где: $U_0 = AE_0$, $U_1 = AE_1$.

Максимальный реализуемый контраст (МРК) синусоидальной решетки:

$$K_{MR_S}(v) = \frac{U_{\max_S}(v) - U_{\min_S}(v)}{U_{\max_S}(v) + U_{\min_S}(v)} = \frac{E_1}{E_0} \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi v}{2}\right). \quad (24)$$

Поскольку контраст синусоидальной решетки $K_{os} = E_1/E_0$, то ФП МРК синусоидальной решетки определяется выражением, соответствующим графику, изображенному на рис. 7 пунктиром:

$$T_{MR_S}(v) = \frac{K_{MR_S}(v)}{K_{os}} = \operatorname{sinc}\left(\frac{\pi v}{2}\right), \quad (25)$$

Оба графика ФП МРК на рис. 7 для идеальной телевизионной системы при наблюдении прямоугольной и синусоидальной решеток достигают нулевых значений только в точках с чётными целыми значениями v и отличны от нуля во всех других точках. ФП МРК реальной телевизионной системы отлична от нуля лишь на конечном интервале пространственных частот. Высокие пространственные частоты обычно подавляются оптической системой телевизионной камеры или специальными электронными фильтрами.

Дискретный сигнал сенселя с номером i при синусоидально модулированной решетке определяется выражением:

$$\begin{aligned} U_{ds}(i, \Delta y, v) &= AE_0 + AE_1 \int_{i-1}^i \sin[\pi v(y - \Delta y)] dy = \\ &= A \cdot \left\{ E_0 + E_1 \operatorname{sinc}(\pi v/2) \operatorname{sinc}\left[\pi v\left(i - \frac{1}{2} - \Delta y\right)\right] \right\}. \end{aligned} \quad (26)$$

Методы измерений ФП МРК

Методы измерений ФП МРК реальной телевизионной системы могут различаться в зависимости от соотношения максимальной граничной частоты пространственного спектра оптического изображения, проецируемого на фотодатчик, и пространственной частоты его дискретизации. В литературе можно встретить рекомендации [5] ограничения этого спектра частотой в 1,5...3 раза ниже частоты Найквиста. Если пространственную частоту Фурье

преобразования u_F измерять в единицах (1/пс), то частота Найквиста $u_{FN} = 0,5$ и указанная рекомендация выражается соотношением: $u_F \leq 1/(3...6)$ (1/пс). Если следовать принятыми в настоящей статье определениям пространственной частоты штрихов тестового изображения решетки (прямоугольной или синусоидальной в профиле), то для синусоидальной решетки частота Найквиста $u_N = 1$. При этом в вертикальном направлении рекомендация соответствует условию $v \leq 1/(1,5...3,0)$ (1/пс). В этом случае практически исключается появление на «оцифрованном» изображении решетки ПУ (муаров). Муары, при их наличии, выглядят как узоры с характерным масштабом, значительно превышающим размеры пикселя

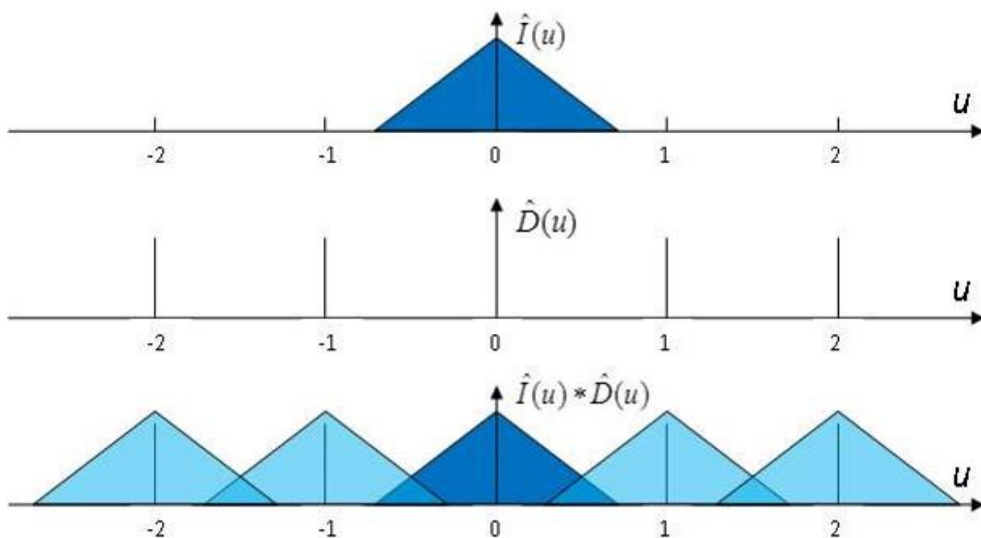


Рис. 9. Наложение «размноженных» спектров (внизу) при дискретизации сигнала с исходным спектром (вверху) с помощью дискретизирующей функции с периодическим спектром (в середине)

изображения. Поясним их происхождение.

Математически, дискретизацию периодического сигнала $I(x)$ можно представить, как умножение его на дискретизирующую функцию $D(x)$, представляющую собой бесконечную последовательность импульсов Кронекера, единичной амплитуды, а спектр которой $D(u_F)$ также представляет собой бесконечную последовательность импульсов Кронекера. При этом в Фурье-области спектр сигнала $\hat{I}(u_F)$ сворачивается со спектром дискретизирующей функции $D(u_F)$, что приводит к размножению спектра сигнала.

На рис. 9 вверху приведен пример Фурье-спектра строки изображения, ниже – спектр дискретизирующей функции, затем результат их свёртки. Здесь при разномножении края спектров оказываются наложенными друг на друга и в составе спектра исходного сигнала появляются ложные низкочастотные составляющие. Если максимальная частота спектра исходного сигнала не превышает половины частоты дискретизации (частоты Найквиста), то наложения спектров не происходит.

При сильно ограниченном спектре оптического изображения, когда, например, используется объектив небольшого разрешения, достаточно предъявить к системе в ее Технических условиях (ТУ) требование определённой разрешающей способности и задать простейшую методику визуальной оценки разрешающей способности с помощью элементов телевизионной испытательной таблицы – групп клинообразных чёрных и белых полосок по положению границы между различимыми и неразличимыми полосками группы относительно линейной шкалы. То есть в этом случае ввиду отсутствия муаров испытания цифровой телевизионной системы могут быть аналогичны испытаниям аналоговой телевизионной системы, причем как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях. При этом достигается минимизация затрат времени и средств на испытание способности телевизионной системы к воспроизведению мелких деталей изображения. Разумеется, испытательная таблица должна соответствовать чёткости телевизионной системы, а оценка разрешающей способности должна проводиться как в центре, так и в каждом из углов изображения для контроля правильности положения оптической оси объектива телекамеры.

Однако сильно ограничивать спектр оптического изображения не всегда целесообразно. Как отмечено в [1], «Основное назначение телевизионной системы – передавать на расстояние изображения движущихся объектов». При наблюдении движущегося объекта или движения телекамеры относительно неподвижного объекта возникает эффект повышения частоты дискретизации телевизионного изображения, что позволяет рассмотреть мелкие детали объекта, если полоса воспроизводимых пространственных частот телекамеры не подверглась упомянутому ограничению.

Сильное ограничение спектра не целесообразно по нескольким причинам. Во-первых, в естественных условиях наблюдение регулярных растровых структур – редкость, как и появление связанных с ними муаров, зато снижение разрешающей способности воспринимается как явное ухудшение качества изображения. Во-вторых, именно движущиеся объекты привлекают внимание

наблюдателя, для которых искажения дискретизации минимальны, а детализация, повышающая распознаваемость, весьма желательна. В-третьих, в специальных телевизионных системах, обеспечивающих решение задачи поиска неподвижных объектов, наблюдение часто ведётся с использованием «скользящего раstra» [1], что также устраняет помехи дискретизации, позволяя увеличивать разрешающую способность и, следовательно, производительность поисковой системы. По перечисленным причинам *цифровые телевизионные системы часто проектируются с нарушением условия известной «Теоремы отсчётов»*. Для таких систем визуальное определение разрешающей способности традиционными методами невозможно, и для оценки способности телевизионной системы к воспроизведению мелких деталей изображения приходится использовать *инструментальные методы, которые не предполагают обязательного использования порогового контраста зрительной системы*.

Поскольку кроме испытательных изображений (таблиц) инструментальные методы требуют наличия инструментов: средств измерений, испытательного оборудования, программного обеспечения, – то затраты на испытания телевизионной системы возрастают. Минимизация этих затрат предполагает оптимальный выбор вида и значения порогового контраста телевизионной системы и разработку методики определения разрешающей способности с учётом необходимого для этого времени и допустимой погрешности измерений.

Исходно понятие порогового контраста тесно связано с понятием контрастно-частотной характеристики (КЧХ) аналоговой телевизионной системы. Для такой системы КЧХ зависит только от частоты входного периодического сигнала. Для аналоговой системы существует также понятие комплексной передаточной характеристики (ПХ) системы, которая включает зависимости как от частоты, так и от сдвига входного сигнала при условии, что этот сдвиг не меняет форму выходного сигнала. Поскольку форма выходного сигнала цифровой телевизионной системы может изменяться в зависимости как от частоты, так и от сдвига выходного сигнала, для неё оба понятия: и КЧХ, и ПХ, – строго говоря, не приемлемы. Но мы можем использовать термин «контрастно-частотная характеристика (КЧХ)» для обобщения понятий: ФП МРК, ФПМ (функции передачи модуляции – см. ниже) и КЧХ аналоговой телевизионной системы.

Введенное выше понятие ФП МРК делает определённым понятие порогового контраста для цифровой телевизионной системы и, следовательно, понятие её разрешающей способности. При этом оно определяет подход к созданию эталонного средства измерений этой характеристики цифровой телевизионной системы. Согласно рис. 7 на

интервале $1 < \nu < 2$ ФП МРК идеальной системы является монотонно убывающей функцией и, при задании некоторого порогового контраста K , имеется однозначное решение уравнения:

$$T_{MR}(\nu) = K, \quad (27)$$

относительно переменной $\nu = \nu_{\text{пор}} = R_l$. Это значение R_l является разрешающей способностью идеальной телевизионной системы с дискретизацией изображения.

Для выражения разрешающей способности в телевизионных линиях следует воспользоваться соотношением:

$$R \text{ (твл)} = R(1/nc) \cdot M. \quad (28)$$

Разрешающая способность реальной дискретной телевизионной системы также является решением подобного уравнения:

$$T_{mr}(\nu) = K, \quad (29)$$

но функцию $T_{mr}(\nu)$ здесь необходимо определить, следуя принятой методике её измерения при испытаниях цифровой телевизионной системы, в отличие от $T_{MR}(\nu)$, которая имеет аналитическое выражение (19) или (25) (в зависимости от профиля испытательного изображения).

Методика прямого определения функции $T_{mr}(\nu)$ должна предусматривать определение её в заданных точках пространственной частоты штрихов решётки с последующей интерполяцией в промежуточных точках. Эта методика предполагает механическое перемещение изображения решётки относительно двух сенселей фотодатчика для получения максимального контраста их сигналов.

Такая методика обладает рядом недостатков:

- большие затраты времени при большом числе точек пространственной частоты из-за механического характера измерений,
- большие погрешности измерений из-за дефектов решетки, неравномерности чувствительности сенселей, ошибок испытателя.

Указанные недостатки не мешают созданию эталонного средства измерений ФП МРК, для которого временной фактор не столь существен как для рабочего средства измерений, а погрешности измерений могут быть скомпенсированы методами усреднений (с дополнительными затратами времени).

Преодоление этих недостатков, по существу, составляет предмет *резольвометрии цифровых телевизионных систем*. Методов измерений разрешающей способности дискретных систем воспроизводства изображений множество. Приведем некоторые из них: например, с использованием эффекта модуляции локального контраста, хорошо заметного на рис. 6. При этом необходимо определять максимальный локальный контраст на протяжении серии импульсов с помощью

осциллографа или соответствующей компьютерной программы. Этот контраст может соответствовать точно МРК, как на верхнем графике рис. 6 или не соответствовать, как на нижнем графике, в зависимости от сдвига решетки испытательного изображения относительно

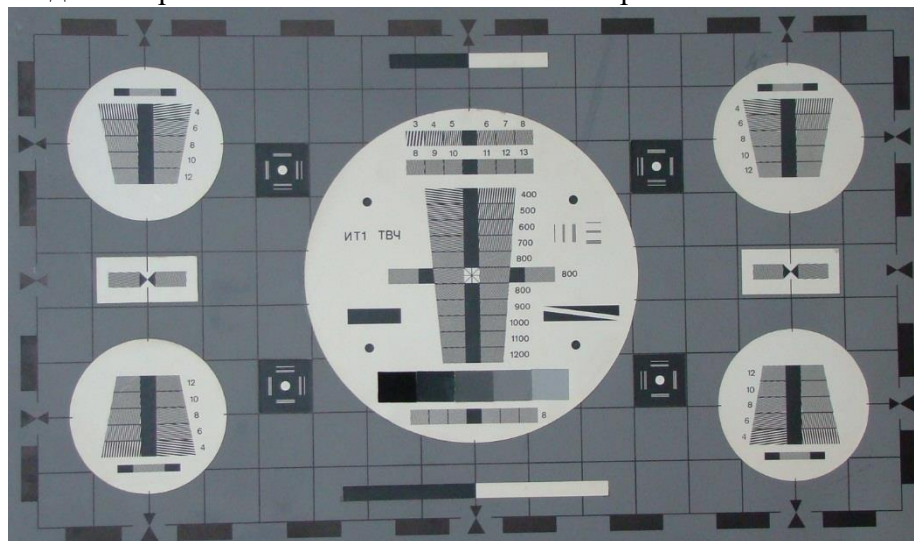


Рис.10. Измерительная таблицы с группами наклонных штрихов, приведённая в ГОСТ Р 53534–2009

сенселей фотодатчика, т. е. метод связан с определенной погрешностью измерений.

Можно улучшить метод введением небольшого наклона решеток различных пространственных частот, как у элементов испытательной таблицы, приведенной на рис. 10 [6]. При этом в каждой новой строке элемента регулярно добавляется небольшой сдвиг, что позволяет, увеличивая серию импульсов пропорционально числу анализируемых строк, добиться уменьшения погрешности измерений. Данная таблица приведена в отечественном стандарте [7] ГОСТ Р 53534–2009 в качестве примера оптической измерительной таблицы для измерения глубины модуляции на штриховых мирах и оценки разрешающей способности.

Существует международный стандарт [8] измерения разрешающей способности и пространственных передаточных характеристик неподвижных изображений *ISO 12233*; первая версия этого стандарта появилась в 2000 г., следующая в 2014 г. и последняя в 2017 г., что отражает непрерывное совершенствование методов измерений разрешающей способности. В данном стандарте используется метод наклонного края (*slanted edge method*), с помощью которого косвенно обеспечивается многократное повышение частоты

дискретизации для получения переходной характеристики цифрового датчика изображения, с последующим вычислением на ее основании Функции передачи модуляции (ФПМ) (*modulation transfer function – MTF*), соответствующей приведённой здесь ФП МРК для синусоидальной решетки. На рис. 11 приведена измерительная таблица, рекомендованная стандартом *ISO 12233–2014*, содержащая специальные элементы: малоконтрастные квадраты с наклоном в 5...10 градусов, с помощью которых при компьютерном вычислении определяются ФПМ для различных местоположений этих элементов.

Переходная характеристика является реакцией системы на скачкообразное воздействие, которая в оптике появляется при

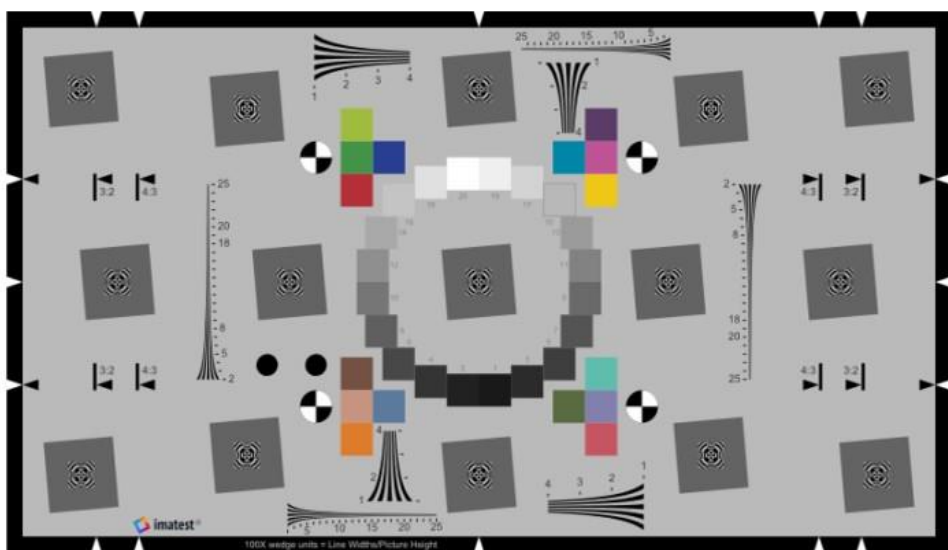


Рис. 11. Измерительная таблица с элементами наклонного края (большими квадратами), (международный стандарт *ISO 12233–2014*)

наблюдении скачкообразного изменения яркости объекта наблюдения. При наблюдении таблицы (рис. 11) такое изменение яркости происходит при переходе от темно-серого квадрата к светло-серому фону таблицы. Хотя на рисунке таблицы этот переход резкий (скачкообразный), на телевизионном изображении он предстаёт размытым (постепенным) из-за действия нескольких факторов: во-первых, недостаточной фокусировки объектива телекамеры; во-вторых, усреднения изображения в пределах чувствительной поверхности сенселя фотодатчика; в-третьих, электронной фильтрации изображения. Размытие границы перехода невелико, обычно не больше размера нескольких сенселей, но если измерить изменение градиента

этого перехода (переходную характеристику телекамеры) с высокой точностью, то появляется возможность пересчитать её в другую, более наглядную, характеристику – ФПМ. Для обеспечения точности необходимо создать частую сетку дискретизации на профиле изображения перехода. Сделать это прямым путём невозможно, так как между сенселями и по горизонтали, и по вертикали строго определенный интервал, заданный конструкцией фотодатчика, и этот интервал слишком велик для задачи представления обычной переходной характеристики. Однако благодаря протяженности края можно так сориентировать изображение края и набор смежных сенселей, что сигналы (значения) всех необходимых уровней профиля

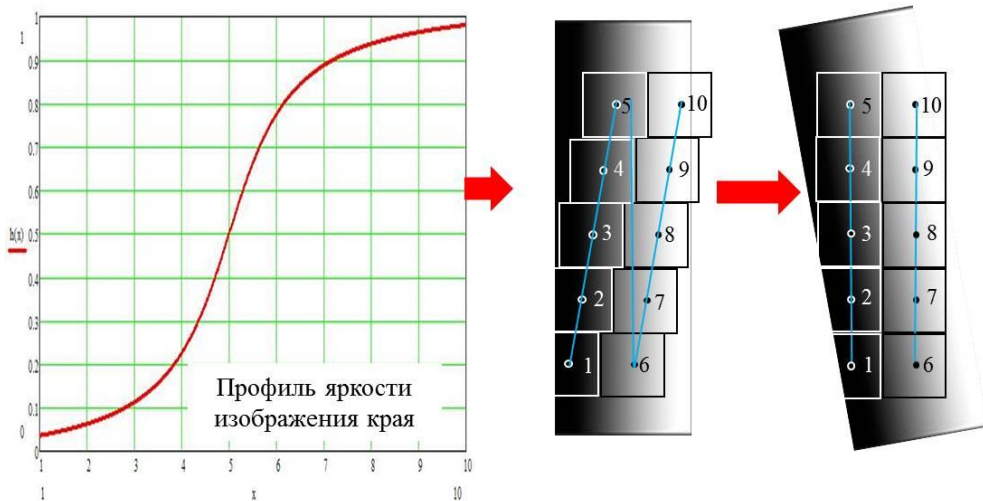


Рис. 12. Метод наклонного края. Слева профиль яркости изображения края; в середине необходимое размещение сенселей для измерения освещённости в десяти точках края; справа практическая ориентация сенселей и изображения края

будут получены.

На рис. 12 приведены (слева направо):

- график профиля изображения размытого края темного объекта на светлом фоне, построенный по десяти точкам профиля,
- теоретически правильное размещение десяти смежных квадратных сенселей относительно изображения края для измерения освещённости в десяти точках профиля,
- практическая ориентация наклонного края относительно группы из десяти, измеряющих необходимую освещённость, смежных сенселей.

Заметим, что теоретически необходимое и практическое положения сенселей различается поворотом сенселей на угол в $5 \dots 10$

градусов относительно изображения края при правильном положении центров сенселей. Из-за нелинейного характера переходной характеристики такой поворот приводит к некоторой ошибке измерений.

Заканчивая описание методов оценки разрешающей способности цифровых телевизионных систем, приведём некоторые испытательные изображения (рис. 13), которые используют для визуальной и инструментальной оценки оптических систем, в частности, объективов цифровых телевизионных камер. Верхнее изображение представляет собой набор как прямоугольных, так и синусоидальных решеток.

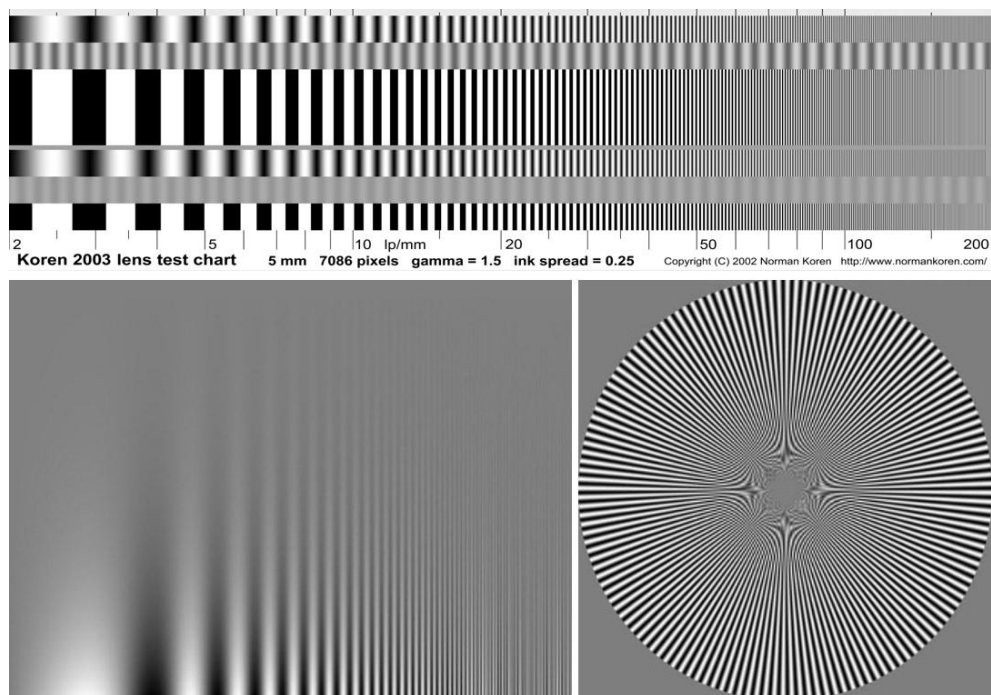


Рис. 13. Тестовые изображения для визуальной и инструментальной оценки качества оптических систем

Причем решетка может иметь как амплитудную, так и частотную модуляцию яркости по горизонтали. Глубина модуляции у различных решеток может отличаться друг от друга. Обратим внимание на то, что на нижнем левом тестовом изображении реализовано плавное изменение глубины модуляции – контраста $K_0(u, y)$ в зависимости как от координаты y (по вертикали), так и от частоты модуляции u (по горизонтали). Такое изображение позволяет визуально определить положение на проекции этого изображения границы различения модуляции её яркости $u_R(u)$, а тем самым контраст тестового

изображения $K_o[u, y_R(u)]$ в любой точке границы. При этом ФПМ объектива телекамеры определяется выражением:

$$\Phi_{ПМ}(u) = \frac{K_V(u)}{K_o[u, y_R(u)]} \approx \frac{K_V}{K_o[u, y_R(u)]}, \quad (30)$$

где: $K_V(u)$ – пороговый контраст зрительной системы в зависимости от частоты модуляции, $K_V = 0,02$ – приближенное значение зрительного контраста.

Правое нижнее тестовое изображение (рис. 13) позволяет, благодаря своей центральной симметрии, оценить астигматизм объектива телекамеры.

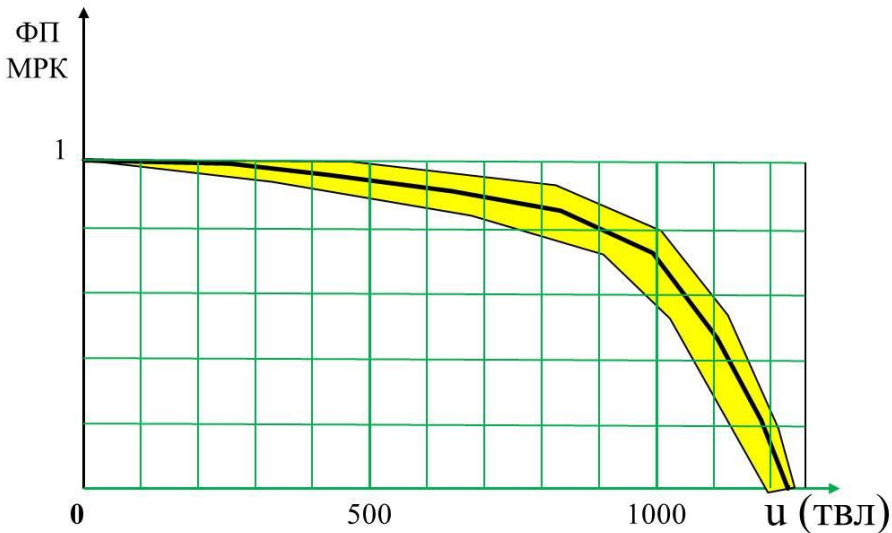


Рис.14. График измеренной функции передачи максимального реализуемого контраста (ФП МРК) в поле допусков

Заканчивая статью о чёткости и разрешающей способности цифровой телевизионной системы, необходимо вернуться к теме оценки качества телевизионной системы в процессе её производства. Использованный в статье термин *резольвометрия* подразумевает оценку именно разрешающей способности телевизионной системы, т. е. её пороговой характеристики, однако из текста статьи следует, что гораздо более полными характеристиками качества цифровой телевизионной системы являются введённая здесь функция передачи максимального реализуемого контраста ФП МРК или функция передачи модуляции ФПМ для метода наклонного края. В связи с этим, для повышения качества продукции, следует в ТУ на цифровую

телевизионную камеру задавать требования допустимых границ изменения КЧХ (ФП МРК или ФПМ) для различных пространственных частот тестовых изображений. Соответствующая «Методика испытаний», изложенная в ТУ, должна предусматривать использование средства измерений (СИ) КЧХ с погрешностью измерений в 3...5 раз меньшей заданного допуска на эту характеристику. Такое СИ должно обеспечивать допусковый контроль КЧХ, например, путём визуализации графика функции передачи и её поля допусков, как показано на рис. 14. Причём измерение КЧХ должно производиться как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях во всех углах и центре изображения специальной испытательной (измерительной) таблицы. Кроме того, СИ должно обладать возможностью задания необходимого поля допусков и иметь специальную сигнализацию о выходе измеряемой характеристики за поле допусков. Разработка таких СИ может предусматривать использование как универсальных, так и специализированных компьютеров, испытательных таблиц, работающих в отраженном свете и диапозитивов таких таблиц, работающих на просвет в составе коллиматоров. Использование универсальных испытательных таблиц для различных стандартов разложения и специализированного программного обеспечения для разработки СИ позволяет максимально снизить стоимость разработки СИ, обеспечивая уменьшение соотношения цена/качество цифровой телевизионной системы.

Заключение

В статье предложено совместное определение чёткости и разрешающей способности телевизионной системы. Получены формулы определения функций передачи максимального реализуемого контраста (ФП МРК) идеальной дискретной телевизионной системы для испытательных изображений в виде решеток с прямоугольным (бинарным) и синусоидальным профилем. Предложены методы прямого измерения ФП МРК. Получены формулы определения сигналов матричных (дискретных) телевизионных камер при проекции на их фотодатчики оптических изображений решеток, необходимые для математического моделирования методов решения задач резольвотрии цифровых телевизионных систем. Описаны методы определения различных контрастно частотных характеристик цифровых телевизионных систем. В том числе ФП МРК с использованием элементов телевизионных измерительных таблиц – решеток с заданными пространственными частотами и ФПМ с использованием элементов с наклонным краем.

Рекомендовано оценивать качество цифровых телевизионных камер при испытаниях соответствием их КЧХ заданному полю допусков.

Ранее статья опубликована в [9].

Литература

1. Рыфтин Я. А. *Телевизионная система (Теория)*. М.: Сов. радио. 1967.
2. Кривошеев М. И. *Основы телевизионных измерений*. М.: Радио и связь. 1989.
3. ГОСТ 20466-75. Таблица телевизионная испытательная универсальная ИТ-72. Диапозитивы. Общие технические условия.
4. [https://ru.wikipedia.org/wiki/Стандарт_разложения_\(телевидение\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Стандарт_разложения_(телевидение)).
5. Яне Б. *Цифровая обработка изображений*. М.: Техносфера. 2007.
6. CCIR. *Period 1986 – 1990. Test – patterns for High – definition television (HDTV)*//Doc. 11/342 (USSR).
7. ГОСТ Р 53534–2009. *Цифровое телевидение высокой чёткости. Измерительные сигналы. Методы измерений. Общие требования*.
8. ISO 12233 – 2014. *Photography – Electronic still picture imaging – Resolution and spatial frequency responses*.
9. Варгин П. С. *Методики измерения четкости и разрешающей способности цифровой телевизионной системы. Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. 2017. Вып. 4. С.16 – 34.*