ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ВИЗУАЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЯ КОНТРАСТА В ИЗОБРАЖЕНИИ КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ПАРНЫХ ШТРИХОВ

Пронин С.П., Юденков А.В., Зрюмов П.А., Кононов С.В., Фадеев А.А., Карташова И.Н., Силаева О.Е.

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова г. Барнаул

Одной из актуальных задач современной измерительной техники является определение параметров колебательного процесса. Оптические методы в решении этой задачи занимают ведущую позицию. Для измерения, например, размаха колебаний используют тест-объекты в виде различных парных геометрических фигур: два круга, две параллельные линии, две пересекающиеся линии [1,2]. При определенных соотношениях геометрических размеров этих фигур и размаха колебаний визуально наблюдают устойчивое изображение третьей фигуры. Важно при этом, чтобы частота колебаний превышала 8 Гц. По указанному признаку определяют размах колебаний. В монографии [3] приведены изображения колеблющихся с частотой 7 Гц прямоугольных штрихов с различными пространственными частотами, получаемых на экране монитора персонального компьютера с помощью видеокамеры. На изображении штрихов можно выделить положительный, нулевой и отрицательный контрасты.

Однако, на сегодняшний день не существует теории и выполненных экспериментов по исследованию изменения контраста в колеблющихся штрихах при визуальном их наблюдении.

Цель работы – создать математическую модель колеблющихся штрихов с различными пространственными частотами и сравнить ее результаты с визуальным восприятием изменения контраста в изображении этих штрихов.

Отвлечемся от физиологии зрения и будем в качестве модели рассматривать техническую систему.

Пусть одномерный объект в виде парных штрихов совершает гармонические колебания ортогонально оптической оси объектива с размахом *R*, как показано на рис.1.

В плоскости изображения объектива мысленно установим фотопленку и будем фиксировать изображение штрихов в течении времени экспозиции *t*_{экс}, равном периоду колебаний *Т*_{коп}. За время экспозиции штрихи

проходят расстояние 2*R*. За основу модели изображения штрихов *g*(*y*), которое получается на фотопленке за время экспозиции, примем уравнение Фредгольма первого рода с ядром типа свертки [4 - 5]:

$$g \oint = O \oint h \oint rect \left(\frac{y}{2R}\right), \tag{1}$$

где *h*(*y*) – функция рассеяния линии объектива; (*) – знак операции свертки. Функцию *rect* (*y*/2*R*) называют прямоугольной характеристикой сдвига [5], функцией рассеяния [6]. В любом случае – это функция прямоугольного импульса шириной 2*R*.



Т_{кол} – период пространственных колебаний; *R* – размах колебаний; *a* – ширина штриха; A = 2*a* – расстояние между центрами штрихов

Рисунок 1 – Пространственно-временное представление движения пары штрихов:

Штрихи имеют одинаковые размеры по а мм и расстояние между их центрами A мм, при этом A=2a. По определению [7] пространственная частота штрихов составляет v=1/A мм⁻¹. Модель светлых штрихов на темном фоне можно представить в виде [8]:

$$O \diamondsuit = \frac{1}{2} \left[\delta \left(y - \frac{A}{2} \right) + \delta \left(y + \frac{A}{2} \right) \right] * rect \left(\frac{y}{a} \right), (2)$$

где функция rect(y/a) – функция прямоугольного импульса шириной a;

 $\delta(y-A/2)$ и $\delta(y+A/2)$ – дельта функции, отстоящие друг от друга на расстоянии A.

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2009

Примем условие, что используется идеальный объектив, у которого функция рассеяния h(y) равна δ -функци: $h(y)=\delta(y)$. Тогда уравнение (1) преобразуется к виду:

$$g \oint = \frac{1}{2} \left[\delta \left(y - \frac{A}{2} \right) + \delta \left(y + \frac{A}{2} \right) \right] * rect \left(\frac{y}{a} \right) * rect \left(\frac{y}{2R} \right), (3)$$

Этому уравнению, согласно правилам математических преобразований [5,8,9], в частотной области соответствует уравнение:

 $G(v) = cos(\pi A v) \cdot sinc(\pi a v) \cdot sinc(\pi 2 R v),$ (4) где G(v) – спектр изображения подвижных штрихов, зафиксированных на фотопленке; $cos(\pi A v) \cdot sinc(\pi a v)$ – спектр неподвижного изображения штрихов. В уравнении (4) опущен несущественный для дальнейшего анализа множитель 2aR. Функция

$$sinc(\pi 2Rv) = \frac{sin(\pi 2Rv)}{\pi 2Rv}$$
(5)

у разных авторов имеет разные названия: прямоугольная характеристика сдвига [5], передаточная функция [4], частотноконтрастная характеристика (ЧКХ) [10]. Последнее определение, на наш взгляд, является предпочтительным, так как она определяет контраст в изображении парных штрихов с различными пространственными частотами. Поскольку фиксация изображения производится при времени равном периоду колебаний, то назовем эту характеристику ЧКХ стробоскопического эффекта. Предлагаемое определение становится очень актуальным при регистрации изображения колеблющихся штрихов видеокамерой, кадровая частота которой равна частоте колебаний штрихов.

Под контрастом *К* в изображении штрихов будем использовать известное соотношение яркостей [9]:

$$K = \frac{(L_{uu} - L_o)}{(L_{uu} + L_o)},$$
 (6)

с той лишь разницей, что вместо максимальной и минимальной значениями яркостей будем фиксировать значение яркости *L*₀ между светлыми штрихами и значение яркости L_{ии} на одном из штрихов. Фиксация яркостей в изображении позволяет согласовать изменения контраста, вычисленного по формулам (5) и (6). Разница состоит в том, формула (5) оценивает изменение контраста в частотной области, а формула (6) – в пространственной. При условии разрешения штрихов, когда яркость L_{μ} больше яркости L_{0} , контраст больше нуля: К>0. При условии равенства яркостей $L_{\mu}=L_{0}$ получаем нулевой контраст: *К*=0. При условии L_w<L₀, возникает отрицательный контраст: *К*<0.

ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2009

В неподвижном изображении, когда R= 0, ЧКХ (5) приобретает значение единицы. Согласно Фурье-преобразованию, единица переходит в δ -функцию, поэтому свертка изображения с δ -функцией в формуле (3) дает вполне закономерный результат в виде идеального изображения штрихов (2), как показано на рис. 2,а. Получили тривиальный вывод. При отсутствии колебаний штрихов, при любых их размерах контраст в изображении, согласно формуле (6), всегда равен единице.



Рисунок 2 – Графическое представление изменения контраста *К* в изображении штрихов в зависимости от соотношения размаха колебаний *R* и размера штрихов *а*

Рассмотрим изменение контраста в штрихах при различных соотношениях размаха и размера штриха а. ЧКХ стробоскопического эффекта (5) переходит через первое нулевое значение на пространственной частоте v=1/2*R*. Зададим условие *R*=а, то есть размах колебания равен ширине штриха. В этом случае частота перехода ЧКХ через нуль и частота штрихов совпадают:

$$v = \frac{1}{2R} = \frac{1}{2a} = \frac{1}{A}.$$
 (7)

Подставим значение R = a в уравнение (4):

 $G(v) = cos(\pi Av) \cdot sinc(\pi av) \cdot sinc(\pi 2av),$ (8) сгруппируем первый и третий сомножители и свернем их по тригонометрической формуле: 2cos(2x)sin2x=sin4x. В результате получим спектр изображения штрихов: (9)

 $G(v) = sinc(\pi 4av) \cdot sinc(\pi av),$

Функция (9) в пространственной области представляет трапецию [Гребенников], которая и на штрихах и между штрихами имеет одинаковые яркости, поэтому контраст в изображении равен нулю: *К*=0. Результат вычислений изображен на рис. 2, в.

Таким образом, если пространственная частота парных штрихов с коэффициентом заполнения 0,5 совпадает с частотой перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта (5), то в данных штрихах будет нулевой контраст. Эффект нулевого контраста возникает при равенстве размаха колебаний ширине штриха или половине пространственного периода штрихов: *R*=*a*=*A*/2.

При пространственной частоте штрихов меньшей, чем частота перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта (5), в штрихах должен наблюдаться положительный контраст. Меньшей пространственной частоте соответствуют большие размеры штрихов. Зададим условие *R=a*/2, то есть для другой пары штрихов размах колебания равен половине ширины штриха. Подставим значение *R* в уравнение (4). В результате получим спектр изображения:

 $G(v) = \cos(\pi A v) \cdot \sin^2(\pi a v), \qquad (10)$

В пространственной области функция (10) представляет два треугольных импульса шириной 2*a*, отстоящих друг от друга на расстоянии *A* (см. рис.2,б). Поскольку яркости на штрихах больше яркости между штрихами, то контраст в изображении принимает положительное значение: *K*>0.

Таким образом, если пространственная частота парных штрихов меньше частоты перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта, то в штрихах наблюдается положительный контраст. Этот вывод справедлив для частотной области. В пространственной области положительный контраст, или разрешение в штрихах возникает при условии, когда размах колебания меньше ширины штрихов.

Зададим пространственную частоту штрихов, превышающую частоту перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта. Пусть *R*=3*a*/2, то есть для третьей пары штрихов размах колебания равен полуторному размеру штриха. Уравнение (4) приобретает вид:

 $G(v) = \cos(\pi A v) \cdot \operatorname{sinc}(\pi a v) \cdot \operatorname{sinc}(\pi 3 a v), \quad (11)$

Два последних сомножителя в пространственной области представляют трапецеидальную функцию с верхним основанием 2*a* и нижним основанием 4*a* [5]. На рис. 2,г левый ее контур совпадает с общей функцией, а правый выделен пунктирной линией. Поскольку в научно-технической литературе отсутствует компактная математическая запись трапецеидальной функции, то, основываясь на известных математических представлениях [5,11], запишем ее посредством обратного Фурье-преобразования следующим образом:

$$\mathfrak{T}^{-1}\{\text{sinc}(\mathfrak{t}av) : \text{sinc}(\mathfrak{t}3av)\}=$$

$$\mathfrak{I}^{-1}\left\{\operatorname{sinc}\left(\pi\frac{4a-2a}{2}\nu\right),\operatorname{sinc}\left(\pi\frac{4a+2a}{2}\nu\right)\right\} =$$

=TPAII (*y*,2*a*,4*a*), (12)

где \Im^{-1} – операция обратного Фурьепреобразования; ТРАП (*y*,2а,4а) – функция, имеющая контур трапеции по оси *y*, симметричная относительно начала координат с верхним и нижним основаниями 2*a* и 4*a* соответственно.

Тогда в пространственной области (11) преобразуется к виду [5,11]:

$$g \Psi = \frac{1}{2} \left[\delta \left(y - \frac{A}{2} \right) + \delta \left(y + \frac{A}{2} \right) \right] * TPA\Pi \Psi, 2a, 4a].$$
(13)

Свертка трапецеидальной функции с двумя δ-функциями дает две трапецеидальные функции, сдвинутых относительно друг друга на расстояние *A*=2*a*:

$$g \oint = \frac{1}{2} \left[TPA\Pi \left((y - \frac{A}{2}), 2a, 4a \right) + TPA\Pi \left((y + \frac{A}{2}), 2a, 4a \right) \right] . (14)$$

Графическое изображение суммы двух трапецеидальных функций представлено на рис. 2,г. Как видно из рисунка, яркость между штрихами приобретает большее значение, чем на самих штрихах, поэтому контраст становится отрицательным: К<0. Таким образом, если пространственная частота парных штрихов превышает частоту перехода через нуль ЧКХ стробоскопического эффекта (5), то в изображении возникает отрицательный контраст. В пространственной области значение размаха колебания, в этом случае, превышает размер штриха.

Таким образом, изменение контраста определяет ЧКХ (5), которая указывает о наличии в изображении и положительного контраста (при положительных значениях ЧКХ стробоскопического эффекта), и нулевого контраста (при переходе ЧКХ через нуль), и отрицательного контраста (при отрицательных значениях ЧКХ).

Для проверки теории была собрана экспериментальная установка, которая включала в себя динамик, пирамидальную штриховую миру [12] и низкочастотный генератор гармонических колебаний. Генератором задавали частоту колебаний диффузора дина-ПОЛЗУНОВСКИЙ АЛЬМАНАХ №2 2009 мика 25 Гц, которая соответствует кадровой частоте телевизионного стандарта CCIR/PAL. Пирамидальная штриховая мира изображена на рисунке.3.



Рисунок 3 – Пирамидальная штриховая мира

Она состоит из двух фрагментов. Оба фрагмента выполнены в программе Paint. Верхний фрагмент содержит нечетное количество пикселей, а нижний – четное. Такая организация позволяет получить плавное изменение размеров штрихов и сохранить общую ось симметрии между штрихами в каждом фрагменте

. Размеры штрихов от первой пары до седьмой пары приведены в таблице. Как видно из рис.3, штрихи экспериментальной миры имеют инверсный вид по сравнению с теоретической. То есть вместо светлых штрихов и темного промежутка мира имеет темные штрихи и светлый промежуток. Как показывают несложные математические доказательства, этот факт не имеет принципиального значения. С точки зрения теории отпадает необходимость все время записывать несущественные постоянные слагаемые. А с точки зрения эксперимента появляется более наглядная интерпретация. Светлый промежуток характеризует положительный контраст, а переход светлого промежутка в состояние темного характеризует отрицательный контраст.

Перед экспериментами выполняли калибровку системы. Увеличивая напряжение, подаваемое на клеммы динамика, измеряли размах колебаний. Для этого на диффузор крепили небольшой белый экран с черной тонкой линией, с помощью микроскопа «Мир-2» фиксировали верхнюю и нижнюю границы колеблющегося размытого изображения и измеряли его размер. Разность между размытым изображением и статическим изображением линии дает размах колебаний.

Эксперимент был выполнен с привлечением 6 экспертов. Увеличивая размах колебаний, эксперты заносили в свои таблицы наблюдаемый контраст в штрихах пирамидальной миры. Возможные изменения и обозначения контраста в штрихах представлены на рисунке 4.

К>0 К=0 К<0 К=0 Рисунок 4 – Визуальное наблюдение изменений и обозначения контраста в штрихах: К>0 – положительный контраст; К = 0 – нулевой контраст; К < 0 – отрицательный контраст</p>

Результаты эксперимента сведены в таблицу. В первой колонке обозначен номер пары штрихов, указанных на рисунке 3. Во второй колонке ширина штриха в данной паре. В ячейках следующих колонок представлен контраст в штрихах при соответствующем размахе колебаний.

Из таблицы видно, что теоретическая формула (5) находится в достаточно хорошем согласии с экспериментальными данными. С увеличением размаха гармонических колебаний от 0,1 мм до 1,2 мм нулевой контраст последовательно возникает в штрихах с близкими размерами. Однако полного совпадения теории и визуальной оценки контраста не наблюдается. В эксперименте явно присутствует систематическая положительная составляющая, которая с размахом колебаний увеличивается от +0,1 мм (для ширины штриха 0,2 мм и размаха 0,3 мм) до +0,4 мм (для ширины штриха 0,8 мм и размаха 1,2 мм). В паре штрихов под номером 4 совсем не наблюдается нулевого контраста, а в последующих штрихах под номерами 5-7 произошло линейное «смещение» систематической погрешности относительно диапазона штрихов под номерами 1-3. Этот результат хорошо проявляется на графике зависимости приращения погрешности от размера ширины штриха. Тем не менее, при исключенной систематической погрешности визуальный метод контроля размаха гармонических колебаний по контрасту в штрихах пирамидальной миры является надежным методом контроля.

В частотной области возникновение нулевого контраста объясняется переходом ЧКХ (5) через нулевое значение. В пространственной области результат экспериментов интерпретируется гораздо проще. При размахе колебаний, равном ширине штриха внутренние границы штрихов начинают соприкасаться. Поэтому, из-за инертности зрения [13], мы наблюдаем один единый серый прямоугольник.

Таблица 1.								
Номер пары штриков	Ширина штриха а, мм	Размах <i>R</i> , мм						
		0,1	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
		контраст, К						
1	0,2	>0	0	< 0	< 0	0	0	>0
2	0,3	>0	>0	0	< 0	< 0	< 0	0
3	0,4	>0	>0	>0	0	< 0	< 0	< 0
4	0,5	>0	>0	>0	>0	< 0	< 0	< 0
5	0,6	>0	>0	>0	>0	0	< 0	< 0
6	0,7	>0	>0	>0	>0	>0	0	< 0
7	0,8	>0	>0	>0	>0	>0	>0	0

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- E. Rule, F. J. Suellentrop, T. A. Perls Optical Method for Measurement of Vibration, «Rev. Scientif. Instrum.» 1959. № 1. P. 40-41.
- Иориш Ю.И. Виброметрия. Измерение вибрации и ударов. Общая теория, методы и приборы. М.: Машгиз, 1963. 468 с.
- Пронин С.П. Оценка качества информационно – измерительной оптико-электронной системы: Монография /Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2001. 125 с.

- 4. Василенко Г.И., Тараторин А.М. Восстановление изображений. – М.: Мир, 1979. – 432 с.
- Гребенников О.Ф. Основы записи и воспроизведения изображиния. – М.: Искусство, 1982. – 239 с.
- Обработка изображений и цифровая фильтрация / Под ред. Т.Хуанга. М.: Изд-во «Мир», 1979. 320 с.
- ГОСТ 15114-78 Системы телескопические для оптических приборов. Визуальный метод определения предела разрешения.
- Каули Дж. Физика дифракции. М.:Мир,1979. -432 с.
- Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов: Учеб. пособие для приборостроительных вузов. – 2-е изд. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. 696 с.
- Системы технического зрения / А.Н. Писаревский, А.Ф. Чернявский, Г.К. Афанасьев, и др. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. 424 с.
- 11. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. М.: Наука, 1969. 344 с.
- 12. Пронин С.П. Мира // Патент России № 2232374 2004.
- Эргономика зрительной деятельности человека/ В.В. Волков, А.В. Луизов, Б.В. Овчинников и др. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 112 с.