

УДК 535.317.1.004.1

*С.П. Пронин, Е.А. Зрюмов, П.А. Зрюмов*

### **Исследование изменения контраста в изображении вибрирующих парных штрихов с помощью ПЗС-фотоприемника**

*S.P. Pronin, E.A. Zryumov, P.A. Zryumov*

### **Researching Contrast Change in the Vibrating Pair Strokes Image By Means of the CCD-Photodetector**

Анализируются условия возникновения нулевого контраста при вибрации парных параллельных штрихов с различными пространственными частотами поперек оптической оси с помощью ПЗС-фотоприемника. Уточняется формула расчета контраста в изображении штрихов. Установлено, что теория О'Нейла совпадает с экспериментальными результатами, полученными с помощью ПЗС-фотоприемника, при условии стробоскопического эффекта и равенстве времени экспозиции периоду кадра.

**Ключевые слова:** структура оптического изображения, частотно-контрастная характеристика, контраст, ПЗС-фотоприемник, стробоскопический эффект.

Проблеме формирования оптического изображения с учетом влияния различных факторов посвящено большое количество научных работ [1–6]. Тем не менее эта тема и сегодня актуальна. Среди различных факторов, влияющих на структуру изображения, можно выделить дефокусировку и смаз. О'Нейл дал теоретическое описание этим факторам в виде частотно-контрастной характеристики [3]. Он рассмотрел движение тест-объекта как вдоль, так и поперек оптической оси. При движении тест-объекта в виде радиальной миры вдоль оптической оси происходит дефокусировка оптической системы и частотно-контрастная характеристика имеет следующий вид:

$$\tau(\omega) = 2 \frac{J_1(\omega r)}{\omega r}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – циклическая пространственная частота штрихов, выраженная в радианах на единицу длины;  $r$  – радиус пятна рассеяния оптической системы, который зависит от продольного смещения тест-объекта;  $J_1$  – функция Бесселя первого порядка.

Первый переход частотно-контрастной характеристики через нуль соответствует значению  $\omega = 3,83/r$ . До этой пространственной частоты оптическое изображение штрихов имеет разрешение. Поскольку функция Бесселя в области от  $\omega = 0$  до  $\omega = 3,83/r$  имеет положительное значение и выражает частотно-контрастную характеристику, то можно сказать, что в указанном диапазоне струк-

The initiation of zero contrast is analyzed at vibration of pair parallel strokes with various spatial frequencies across an optical axis by means of the CCD-photodetector. The formula used to calculate the contrast in the strokes' image is specified. It is established that O'Neil theory coincides with the experimental results received by means of the CCD-photodetector when stroboscopic effect is available and time of exposition is equal to period of the frame.

**Key words:** structure of the optical image, frequency-contrast characteristic, contrast, CCD-photodetector, stroboscopic effect.

тура изображения штрихов имеет положительный контраст. При значении пространственной частоты  $\omega = 3,83/r$  разрешение в штрихах отсутствует. Как отмечает О'Нейл, штрихи приобретают нулевой контраст. С увеличением пространственной частоты штрихов тест-объекта  $\omega$  значение частотно-контрастной характеристики становится отрицательным, что указывает на наличие фазового сдвига в пространстве. Эффект перехода через нулевой контраст с последующим резким изменением фазы называется «ложным разрешением». Данная теория была подтверждена экспериментальными исследованиями [3, 7] и в дальнейшем нашла отражение даже в учебниках, например [4]. С точки зрения частотно-контрастной характеристики штрихи приобретают отрицательный контраст. Термин «отрицательный контраст» не является новым. Его используют в фазово-контрастной микроскопии [1], а также при анализе особенностей визуализации скрытых изображений в полимерном слое с помощью скрещенных линейных поляризаторов [8]. В зависимости яркостей объекта и фона различают положительный или отрицательный контрасты. Однако ни в статическом, ни в динамическом изображениях штрихов понятие отрицательного контраста не применяется. Контраст и разрешающая способность оптического прибора – взаимосвязанные характеристики. Практическим пределом разрешающей способности является пространственная

частота штрихов с нулевым контрастом [9]. С точки зрения качества оптического прибора дальнейшее повышение пространственной частоты штрихов становится бессмысленным. Однако с точки зрения объекта его динамическое изображение с отрицательным контрастом несет полезную информацию. Таким образом, необходимо уточнить классическое понятие «оптического контраста» для периодических объектов в виде штрихов.

При наличии продольного и поперечного движений радиальной штриховой миры результирующая частотно-контрастная характеристика имеет следующий вид [3]:

$$\tau'(\omega) = \tau(\omega) \frac{\sin(\omega L/2)}{(\omega L/2)}, \quad (2)$$

где  $L$  – перемещение тест-объекта поперек оптической оси.

При отсутствии дефокусировки, когда  $r = 0$ ,  $\tau(\omega)$  становится равным двум, поэтому частотно-контрастная характеристика смаза приобретает значение:

$$\tau'(\omega) = 2 \frac{\sin(\omega L/2)}{(\omega L/2)}. \quad (3)$$

Поскольку изменения функции (3) аналогичны изменениям функции (1), то в структуре изображения тест-объекта в виде штрихов с различными пространственными частотами должны наблюдаться аналогичные эффекты: положительный, нулевой и отрицательный контрасты. Однако эти эффекты не были подтверждены О'Нейлом экспериментально, так как уровень технического развития не позволял провести соответствующие эксперименты.

Цель данной работы – уточнение понятия оптического контраста для парных штрихов и экспериментальная проверка теоретических положений О'Нейла по изменению контраста в изображении вибрирующего тест-объекта в виде параллельных парных штрихов с использованием ПЗС-фотоприемника.

Под оптическим контрастом понимается известное соотношение яркостей или освещенностей [4]:

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}}, \quad (4)$$

где  $L_{\max}$  – максимальная яркость в изображении исследуемого объекта;  $L_{\min}$  – минимальная яркость. Если при вычислении контраста по формуле (4) не налагать никаких условий, то мы всегда при вычислении будем иметь положительный контраст.

Эту классическую формулу используют в фазовом контрасте с условием, что фиксируют яркости визуализируемого изображения  $L_u$  и фона  $L_\phi$  [8]:

$$K = \frac{L_u - L_\phi}{L_u + L_\phi}. \quad (5)$$

Из последней формулы следует, что в зависимости от яркости изображения и яркости фона контраст может быть и положительным, и отрицательным, и нулевым. Воспользуемся аналогичным условием для анализа изменения контраста в штрихах и запишем формулу оптического контраста применительно к темным штрихам на светлом фоне в виде:

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

где  $L_o$  – яркость светлого промежутка в изображении штрихов;  $L_{ш}$  – яркость на штрихах.

В такой формулировке формула (6) будет согласована с формулами (1) и (3). При наличии фазового сдвига, когда светлый промежуток между штрихами становится темным, контраст приобретает отрицательное значение.

Для экспериментальной проверки теоретических положений О'Нейла по изменению контраста в изображении тест-объекта в виде параллельных парных штрихов при его вибрации была разработана экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 1.



Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка состоит из звукового генератора синусоидальных колебаний, усилителя звуковых сигналов, динамика, на диффузоре которого закреплен тест-объект, видеокамеры, цифрового функционального генератора сигналов и персонального компьютера. Звуковым генератором формируется синусоидальный сигнал с задаваемой частотой и амплитудой, который через усилитель приводит в движение диффузор динамика 25ГДН-1-8-80. К диффузору динамика жестко прикреплен тест-объект, изображение которого приведено на рисунке 2. Видеокамера устанавливается от тест-объекта на расстоянии 0,5 м и состоит из объектива Индустар-61л/3-МС и ПЗС-матрицы ICX415AL с электронным блоком ввода данных в персональный компьютер. Видеокамера осуществляет ввод изображений по внешнему синхроимпульсу от цифрового функционального генератора сигналов PCGU1000.

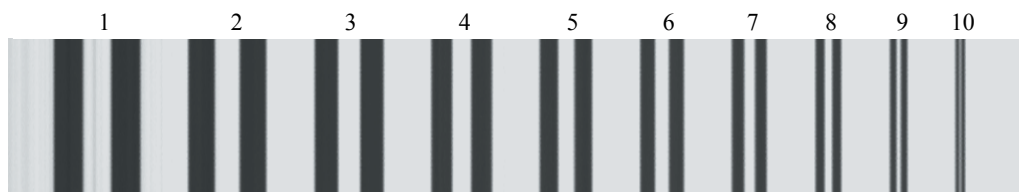


Рис. 2. Статическое изображение тест-объекта в виде набора парных штрихов

Для дальнейшего анализа теории О'Нейла перейдем в уравнении (3) от циклической пространственной частоты  $\omega$  к пространственной частоте  $\nu$ :

$$\omega = 2\pi\nu,$$

где  $\nu = 1/A$  – пространственная частота штрихов, выраженная в  $\text{мм}^{-1}$ ;  $A$  – расстояние между центрами штрихов, или период.

Тест-объект имеет 10 пар параллельных штрихов. В каждой паре размеры штрихов  $a$  и промежуток между ними равны, поэтому  $A = 2a$ ,  $\nu = 1/2a$ . Пары штрихов, приведенные на рисунке 2, имеют следующие размеры штрихов (в мм):  $a_1 = 0,91$ ;  $a_2 = 0,83$ ;  $a_3 = 0,75$ ;  $a_4 = 0,66$ ;  $a_5 = 0,58$ ;  $a_6 = 0,50$ ;  $a_7 = 0,42$ ;  $a_8 = 0,33$ ;  $a_9 = 0,25$ ;  $a_{10} = 0,17$ . Указанным парам соответствуют следующие пространственные частоты (в  $\text{мм}^{-1}$ ):  $\nu_1 = 0,55$ ;  $\nu_2 = 0,60$ ;  $\nu_3 = 0,67$ ;  $\nu_4 = 0,76$ ;  $\nu_5 = 0,86$ ;  $\nu_6 = 1,00$ ;  $\nu_7 = 1,19$ ;  $\nu_8 = 1,51$ ;  $\nu_9 = 2,00$ ;  $\nu_{10} = 2,94$ .

Поскольку экспериментальная установка содержит ряд звеньев: объектив, фотоприемник, блок электроники, то результирующая равна произведению частотно-контрастной характеристики этих звеньев [4, 6]. Так как в установке применен высококачественный объектив, то частотно-контрастную характеристику объектива можно принять за единицу. Действительно, если размер смаза изображения тест-объекта в плоскости фотоприемника на порядок превышает размер пятна рассеяния объектива, то размер пятна рассеяния можно принять за  $\delta$ -функцию, которая и дает результат единицы в частотной области. Примем, что блок электроники передает пространственную структуру изображения без искажений на экран монитора.

Рассмотрим влияние фотоприемника на пространственную структуру оптического изображения. Для матричного ПЗС-фотоприемника с размерами дискретных фоточувствительных элементов  $p \times p$  (мм), когда изображение перемещается в вертикальном направлении, а считывание сигнала осуществляется в горизонтальном направлении, результирующая частотно-контрастная характеристика  $\tau(\nu)$  вдоль оси перемещения изображения имеет вид [10]:

$$\tau(\nu) = \frac{\sin(\pi\nu t_{\text{экс}})}{\pi\nu t_{\text{экс}}} \cdot \frac{\sin(\pi\nu p)}{\pi\nu p}, \quad (7)$$

где  $\nu$  – скорость перемещения изображения тест-объекта относительно фотоприемника;  $t_{\text{экс}}$  – время

экспозиции;  $\nu$  – пространственная частота парных штрихов;  $p$  – размер дискретных фоточувствительных элементов.

Первый множитель в формуле (7) характеризует влияние вибрации на контраст в изображении парных штрихов. Второй множитель в этой формуле характеризует влияние размера дискретного фоточувствительного элемента на контраст в изображении парных штрихов. Его влияние на результат эксперимента желательно исключить. Этой цели можно достичь при калибровке измерительной системы в статическом изображении штрихов тест-объекта. Необходимо установить такое увеличение оптической системы, чтобы светлый промежуток между штрихами в изображении тест-объекта на самой высокой пространственной частоте (штрихи 10 на рисунке 2) составлял  $1 \div 2$  пикселя, что соответствует размеру  $1p \div 2p$  мм в области фотоприемника.

Следовательно, период  $A$  для этой пары штрихов будет равен  $2p \div 4p$  мм и второй множитель в (7) на самой высокой пространственной частоте примет постоянное значение  $0,64 \div 0,90$ , т.е. будет стремиться к единице. При выполнении этого условия изменение контраста будет определять только первый множитель, который по виду очень близок к формуле (3). При выполнении заданной калибровки дискретизация фоточувствительных элементов также не будет существенно влиять на результат эксперимента. По паспорту к фотоприемнику период дискретизации фоточувствительных элементов составляет 12 мкм. Период изображения 10-й пары штрихов составляет:  $A \geq 24$  мкм. Следовательно, частота дискретизации более чем в два раза превышает самую высокую пространственную частоту в тест-объекте (10-я пара штрихов). Поэтому в используемых штрихах не должен проявляться эффект наложения частот.

Задача проверки теории заключается в следующем. Создать на экране монитора компьютера статическое изображение вибрирующих штрихов, которое позволило бы визуально оценить эффекты, вытекаемые из формулы (3).

Очевидно, что статическое изображение можно получить при стробоскопическом эффекте, когда частота вибрации тест-объекта  $f_0$  равна кадровой частоте ПЗС-фотоприемника  $f_{\text{IV}}$ . Величину пространственного смещения в этом случае может определять время экспозиции фотоприемника  $t_{\text{экс}}$ .

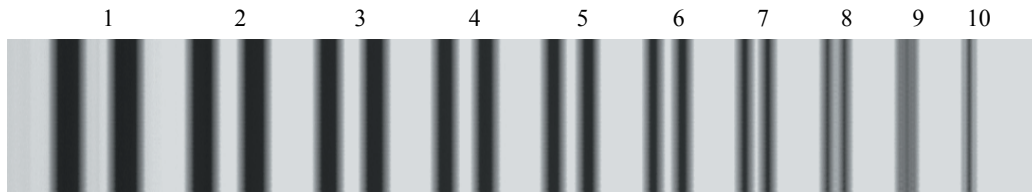


Рис. 3. Изображение вибрирующего тест-объекта при  $f_0 = 25$  Гц,  $R = 0,25$  мм,  $f_{iv} = 25$  Гц и  $t_s = 40$  мс

Задавая время экспозиции у фотоприемника равным периоду смены кадров, а также принимая во внимание стробоскопический эффект, когда каждая точка тест-объекта за время смены кадров проходит путь  $L$ , равный удвоенному размаху вибрации  $2R$ , аргумент синуса в формуле (7) преобразуется к виду:

$$\pi\nu \cdot \nu t_{\text{экс}} = \pi\nu \cdot L = \pi\nu \cdot 2R. \quad (8)$$

Таким образом, опуская постоянный множитель в (3), изменение контраста в парных штрихах при стробоскопическом эффекте можно записать в виде:

$$\tau(\nu) = \frac{\sin(\pi\nu t_{\text{экс}})}{\pi\nu t_{\text{экс}}} = \frac{\sin(\pi\nu L)}{\pi\nu L} = \frac{\sin(\pi\nu 2R)}{\pi\nu 2R}. \quad (9)$$

При заданных условиях эксперимента формула (9) полностью совпадает с формулой (3). Следовательно, первым критерием возникновения нулевого контраста является стробоскопический эффект.

Переход функции (9) через нулевое значение соответствует пространственной частоте:  $\nu_0 = 1/2R$ . Согласно теории О'Нейла в штрихах, имеющих такую же пространственную частоту, должен возникать нулевой контраст. На основании сказанного запишем цепочку равенств:

$$\nu_0 = \frac{1}{2R} = \frac{1}{A} = \frac{1}{2a}. \quad (10)$$

Следовательно, вторым критерием возникновения нулевого контраста является равенство ширины штриха размаху вибрации:  $R = a$ .

При проведении эксперимента частота вибрации  $f_0$  тест-объекта и кадровая частота  $f_{iv}$  составляли 25 Гц, а время экспозиции  $t_s = 40$  мс. Перед экспериментами на заданной частоте была проведена калибровка экспериментальной установки по размаху вибрации тест-объекта. Увеличивая напряжение, подаваемое на усилитель, размах вибрации измеряли визуально по размытым границам выбранного штриха с помощью микроскопа Мир-2.

На рисунке 3 представлено изображение тест-объекта при размахе вибрации  $R = 0,25$  мм. Как и предсказывает теория, в девятой паре штрихов наблюдается нулевой контраст.

На рисунке 4 представлены теоретическая (пунктирная линия) и экспериментальная (сплошная линия) частотно-контрастные характеристики.

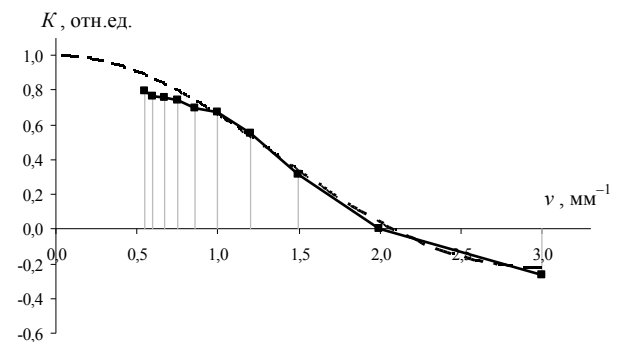


Рис. 4. Экспериментальное изменение контраста в изображении штрихов (сплошная линия) и теоретическая частотно-контрастная характеристика (пунктирная линия) при  $f_0 = 25$  Гц,  $R = 0,25$  мм,  $f_{iv} = 25$  Гц и  $t_s = 40$  мс

Теоретическую частотно-контрастную характеристику рассчитывали по формуле (9) при  $R = 0,25$  мм. Экспериментальную частотно-контрастную характеристику рассчитывали по формуле контраста (6) для каждой пары штрихов, т.е. для каждой пространственной частоты. Такая процедура расчета частотно-контрастной характеристики возможна по определению [6, 11], если контраст предмета равен единице. В нашем случае штрихи тест-объекта имели единичный контраст.

Как видно из графика, теория и эксперимент хорошо совпадают. Например, в восьмой паре штрихов наблюдается положительный контраст (светлый промежуток между темными штрихами), а в десятой – отрицательный контраст (темный промежуток между светлыми штрихами).

**Вывод.** Впервые экспериментально подтверждена формула О'Нейла, выражающая изменение контраста в вибрирующих штрихах с различной пространственной частотой, и условия ее технической реализации: кадровая частота ПЗС-фотоприемника равна частоте вибрации (стробоскопирование), время экспозиции равно периоду кадра, частота пространственной выборки в два раза превышает максимальную пространственную частоту в изображении парных штрихов.

Теоретически и экспериментально установлено, что условием возникновения нулевого контраста в изображении штрихов является стробоскопический эффект и равенство размаха вибрации размеру штриха.

Признаки стробоскопического эффекта и нулевого контраста могут быть использованы в оптиче-

ском измерении параметров гармонической вибрации. Применение стробоскопического эффекта значительно увеличивает диапазон измерения частоты вибрации, так как не требует дискретизации гармонической функции с ее последующим восстановлением.

### Библиографический список

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М., 1973.
2. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. – М., 1964.
3. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику. – М., 1966.
4. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л., 1977.
5. Дубовик А.С., Апенко М.И., Дурейко Г.В. Прикладная оптика. – М., 1982.
6. Гребенников О.Ф. Основы записи и воспроизведения изображения. – М., 1982.
7. Rule E., Suellentrop F.J. and Peris T.A. Optical Method for Measurement of Vibration Amplitudes // *Rev. Scientif. Instrum.* – 1959. – №1.
8. Трофимова А.В., Грачев А.И., Могильный В.В. Скрытые фазовые изображения с переменным знаком контраста // *Прикладная оптика–2010.* – СПб., 2010.
9. Смирнов А.Я., Меньщиков Г.Г. Сканирующие приборы. – Л., 1986.
10. Писаревский А.Н., Чернявский А.Ф., Афанасьев Г.К. и др. Системы технического зрения. – Л., 1988.
11. Физический энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – М., 1984.