

Е. А. ЗРЮМОВ, С. П. ПРОНИН

АНАЛИЗ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИДЕОСИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКА ПРИ ВИБРАЦИИ ТЕСТ-ОБЪЕКТА

Проанализирован классический вид частотно-контрастной характеристики видеосистемы при вибрации тест-объекта. Выявлены различия теоретических и экспериментальных результатов, на основе чего предложен уточненный вид частотно-контрастной характеристики.

Ключевые слова: частотно-контрастная характеристика, тест-объект, вибрация, ПЗС-фотоприемник.

Проблеме формирования оптического изображения при влиянии на него различных факторов посвящено большое количество научных работ [1—3]. Тем не менее эта тема и сегодня является актуальной. Среди факторов, влияющих на структуру изображения, можно выделить вибрацию объекта исследования, которая влияет на вид частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) видеосистемы.

Для матричного фотоприемника с размерами дискретных фоточувствительных элементов $p \times p$ мм, когда изображение контролируемого объекта перемещается в вертикальном направлении, а считывание сигнала осуществляется в горизонтальном направлении, ЧКХ вдоль оси перемещения изображения определяется как [4]

$$K(\nu) = \frac{\sin(\pi\nu\nu t_{\text{экс}})}{\pi\nu\nu t_{\text{экс}}} \cdot \frac{\sin(\pi\nu p)}{\pi\nu p}, \quad (1)$$

где ν — скорость перемещения изображения тест-объекта относительно фотоприемника; $t_{\text{экс}}$ — время экспозиции; ν — пространственная частота парных штрихов в изображении.

Второй множитель в формуле (1) характеризует влияние размера дискретного фоточувствительного элемента на контраст в изображении парных штрихов. Для упрощения дальнейшего анализа примем, что размах вибрации объекта намного превышает размер дискретного фоточувствительного элемента, поэтому вторым множителем в уравнении (1) можно пренебречь. Тогда выражение для ЧКХ можно записать следующим образом:

$$K(\nu) = \frac{\sin(\pi\nu\nu t_{\text{экс}})}{\pi\nu\nu t_{\text{экс}}}. \quad (2)$$

Анализ формулы (2) позволяет сделать вывод, что ЧКХ имеет нулевые значения при выполнении условия

$$\nu t_{\text{экс}} = n/\nu = nA, \quad (3)$$

где A — расстояние между штрихами в паре штрихов, обратно пропорциональное пространственной частоте ν этой пары штрихов; n — целое число.

Следовательно, в данном случае при вибрациях, когда время экспозиции равно периоду вибрации, т.е. наблюдается стробоскопический эффект, ЧКХ с повышением пространственной частоты периодически проходит нулевые значения, меняя знак. При этом положительный контраст наблюдается в изображении пары штрихов, яркость которой между штрихами выше, чем яркость самих штрихов; нулевой контраст наблюдается при равенстве яркости изображений штрихов и яркости между штрихами; отрицательный же контраст наблюдается в случае, когда яркость между штрихами меньше, чем яркость самих штрихов.

Рассмотрим тест-объект, состоящий из десяти параллельных парных черных штрихов, нанесенных на белую бумагу. Коэффициент заполнения каждой пары составляет 0,5, высота всех штрихов равна 40 мкм. Размеры a штрихов составляют 0,91; 0,83; 0,75; 0,66; 0,58; 0,50; 0,42; 0,33; 0,25; 0,17 мкм, а соответствующие им пространственные частоты ν равны 0,54; 0,60; 0,67; 0,75; 0,86; 1,00; 1,20; 1,50; 1,99; 2,99 мм^{-1} .

На рис. 1, *а*, *б* представлены соответственно изображение штрихового тест-объекта [5] и графики теоретической и экспериментальной ЧКХ при размахе вибрации $R = 0,42$ мкм. Согласно формуле (2) переход ЧКХ через нуль соответствует пространственной частоте

$$\nu = \frac{1}{\nu t_{\text{экс}}} = \frac{1}{2R} = \frac{1}{2 \cdot 0,42} \approx 1,19 \text{ мм}^{-1}. \quad (4)$$

Следовательно, в парных штрихах, имеющих аналогичную пространственную частоту, должен возникать нулевой контраст.

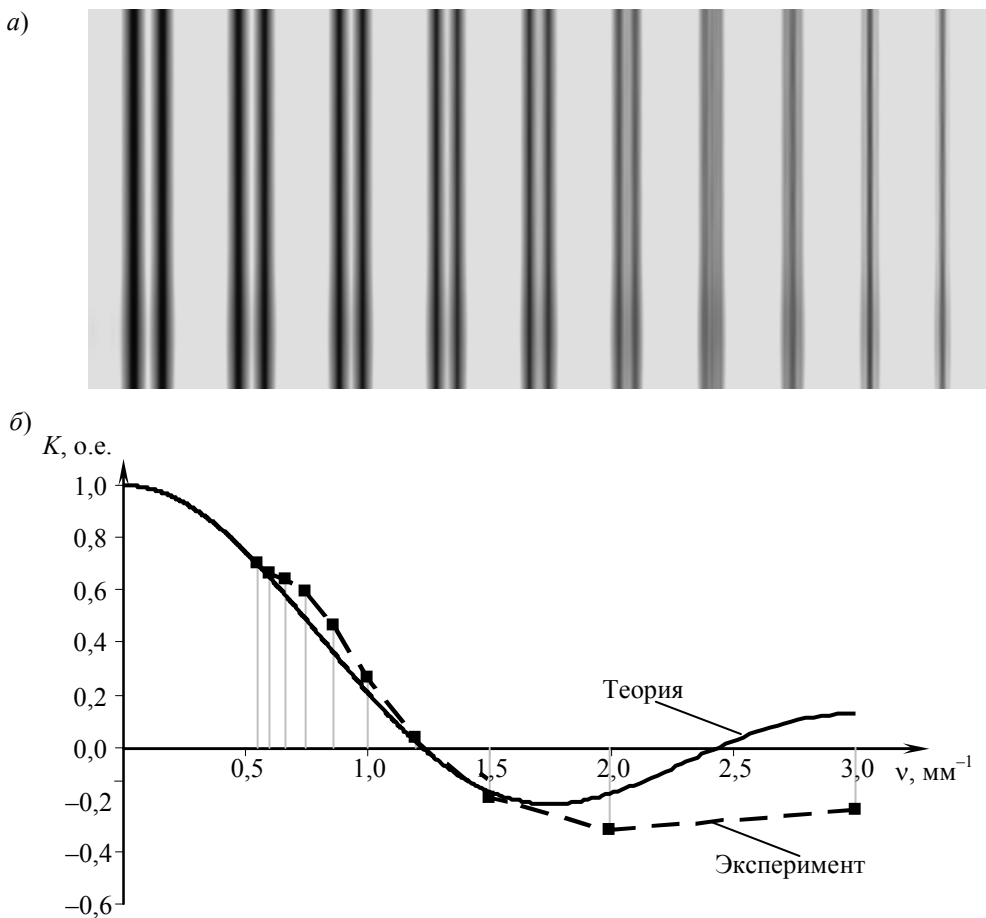


Рис. 1

Как видно из теоретического и экспериментального графиков, области первого нулевого контраста имеют хорошее совпадение. Однако в диапазоне частот 1,5—3,0 мм^{-1} контраст в изображении штрихов остается отрицательным, хотя согласно теории должны наблюдаться и отрицательный, и нулевой, и положительный контрасты.

Более существенное отличие наблюдается при увеличении размаха вибрации. Изображение штрихового тест-объекта и графики теоретической и экспериментальной ЧКХ при размахе вибрации $R = 0,84$ мкм приведены на рис. 2, *а*, *б* соответственно. Аналогично предыдущему примеру области первого нулевого контраста имеют хорошее совпадение, при повышении пространственной частоты значение $K(\nu)$ становится отрицательным и асимптотически стремится к нулю, хотя в соответствии с формулой (2) знак должен периодически меняться.

Следовательно, модель ЧКХ фотоприемника при вибрации изображения тест-объекта требует уточнения.

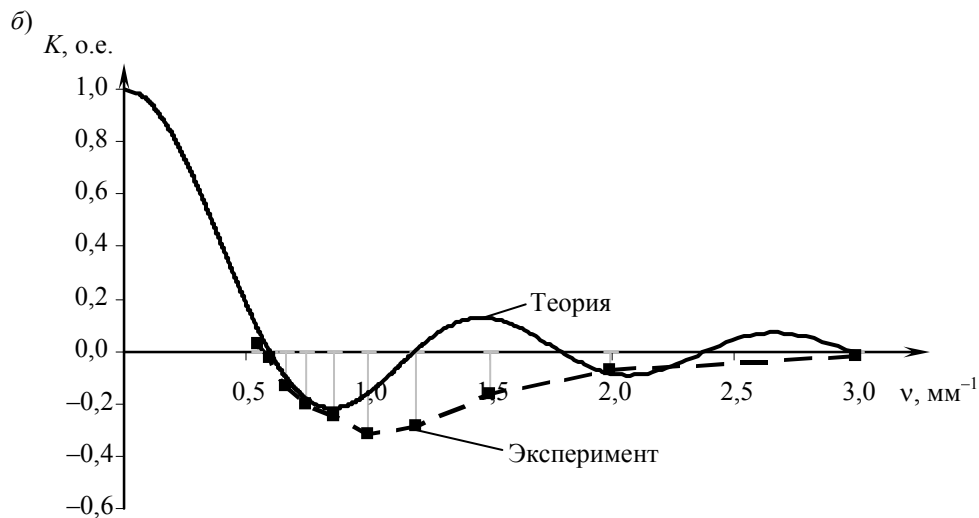
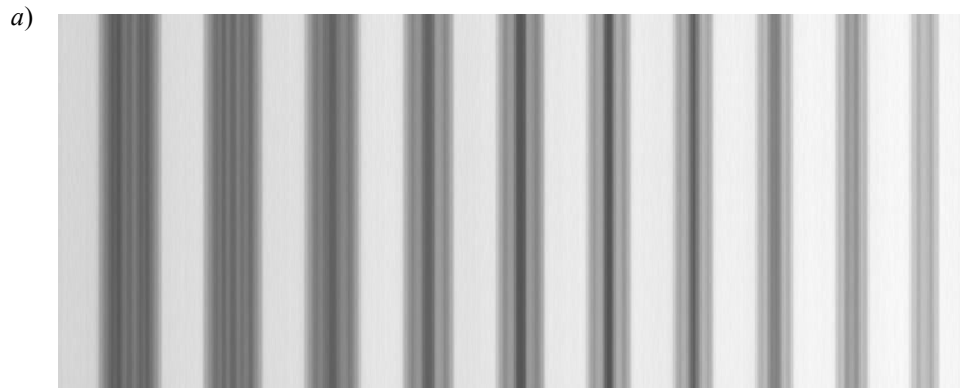


Рис. 2

Рассмотрим в качестве тест-объекта парные штрихи, коэффициент заполнения которых равен 0,5, т.е. размер штриха в два раза меньше расстояния между штрихами. Распределение яркости по координате x в изображении штриха размером a при вибрации с учетом влияния функции рассеяния точки объектива можно описать с помощью функции

$$f(x, a, R) = \frac{a}{2} / \left(\frac{a}{2} + \frac{R}{2} \right) \exp \left[-x^\alpha / \left(\frac{1}{2a} + \frac{R}{2} \right)^\alpha \right], \quad (5)$$

где α — степень гауссоиды, характеризующая крутизну фронта.

Физический смысл формулы (5) заключается в следующем. При отсутствии вибрации ширина изображения штриха по уровню 0,5 близка к величине a , яркость штриха близка к единице. При увеличении размаха вибрации ширина изображения штриха увеличивается, при этом яркость штриха снижается.

Для упрощения дальнейшего анализа частотно-контрастной характеристики в формуле (5) перейдем от размера a штриха к пространственной частоте ν :

$$f(x, \nu, R) = \frac{1}{4\nu} / \left(\frac{1}{4\nu} + \frac{R}{2} \right) \exp \left[-x^\alpha / \left(\frac{1}{4\nu} + \frac{R}{2} \right)^\alpha \right]. \quad (6)$$

Построим теоретическую ЧКХ на основе предложенной модели искажения изображения штриха при вибрации. Тогда распределение яркости в изображении расположенных на расстоянии A пары штрихов размером a , с коэффициентом заполнения 0,5, характеризуется выражением

$$g(x, \nu, R) = f\left(x + \frac{A}{2}, \nu, R\right) + f\left(x - \frac{A}{2}, \nu, R\right). \quad (7)$$

Используя эту модель, можно получить аналитическое выражение зависимости $K(\nu, R)$:

$$K(\nu, R) = \frac{g\left(\frac{A}{2}, \nu, R\right) - g(0, \nu, R)}{g\left(\frac{A}{2}, \nu, R\right) + g(0, \nu, R)}. \quad (8)$$

Графики теоретической ЧКХ, рассчитанной по формуле (8), и экспериментальной ЧКХ при $R = 0,42$ мм и $R = 0,84$ мм представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Как показывает анализ рис. 3, при фиксированном значении вибрации $K(\nu) = 0$ только единожды. При увеличении R (см. рис. 4) крутизна фронта графика ЧКХ увеличивается, и $K(\nu) = 0$ на более низких частотах, однако при увеличении ν значение $K(\nu)$ остается отрицательным и асимптотически стремится к нулю. При уменьшении R крутизна фронта графика ЧКХ также уменьшается, и $K(\nu) = 0$ на более высоких частотах.

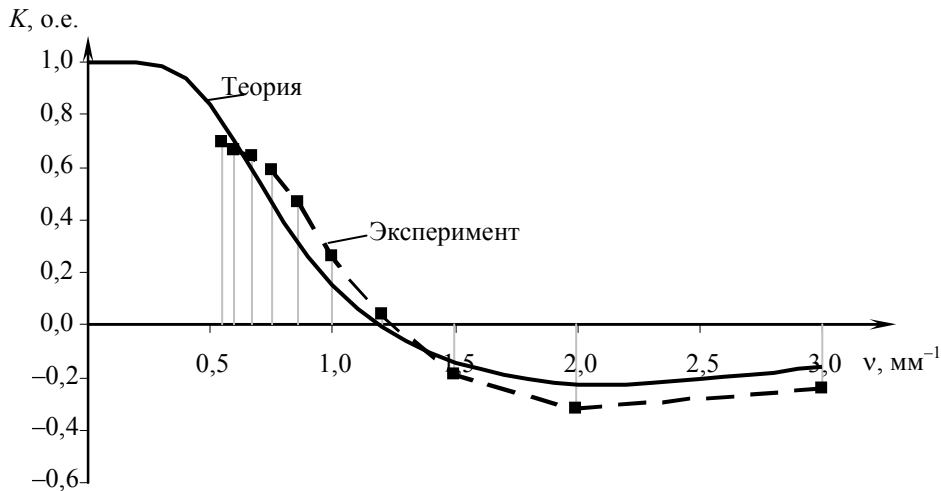


Рис. 3

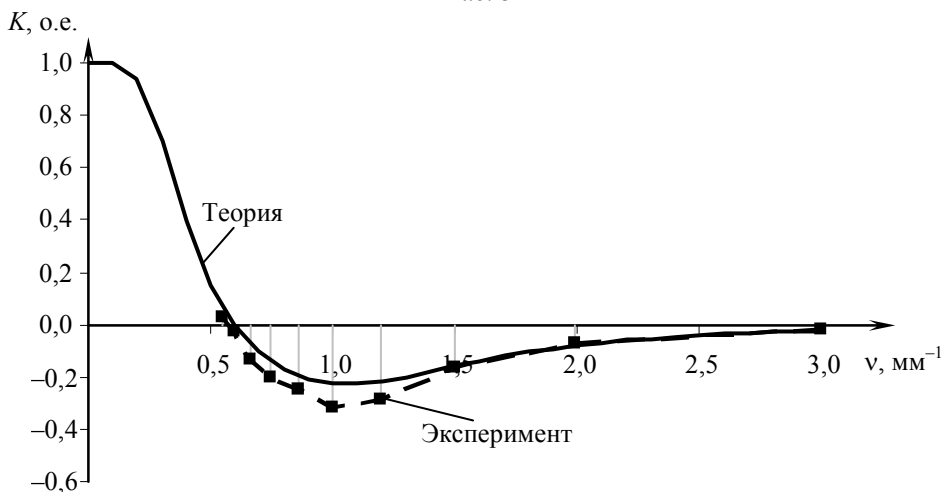


Рис. 4

Сравнивая модели ЧКХ, построенные по формулам (2) и (8) при одних и тех же значениях размаха вибрации, можно сделать вывод, что изменение контраста как в первом, так и во втором случае практически одинаково на низких пространственных частотах до первого пересечения оси ν . При повышении ν ЧКХ, вычисленная по формуле (2), осциллирует вокруг оси пространственных частот, затухая и периодически меняя знак, а ЧКХ, вычисленная по формуле (8), остается отрицательной и асимптотически стремится к нулю.

Оценим с помощью регрессионного анализа, насколько точно каждая из представленных моделей описывает проведенные эксперименты [6].

При $R = 0,42$ мм коэффициент детерминации D экспериментальной ЧКХ и ЧКХ, рассчитанной по формуле (2), составляет 0,88, а для экспериментальной ЧКХ и ЧКХ, рассчитанной по формуле (8), $D = 0,84$. Из этого можно сделать вывод, что при размахе вибрации, сопоставимом с размером самых малых по ширине штрихов, ЧКХ (2) и ЧКХ (8) корректно описывают проведенный эксперимент.

При $R = 0,84$ мм коэффициент детерминации экспериментальной ЧКХ и ЧКХ, рассчитанной по формуле (2), составляет 0,27, а для экспериментальной ЧКХ и ЧКХ, рассчитанной по формуле (8), $D = 0,78$. Следовательно, при повышении размаха вибрации модель ЧКХ (2) плохо интерпретирует проведенный эксперимент, так как $D < 0,50$. ЧКХ (8) как при малом, так и при большом R сохраняет стабильное значение, превышающее 0,70.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что классическая формула ЧКХ при движении тест-объекта не может быть использована для вычисления контраста стробоскопического изображения тест-объекта при его вибрации, так как согласно экспериментам ЧКХ имеет лишь одно пересечение оси пространственных частот. Предложенная модель ЧКХ, рассчитанной по формуле (8), позволяет корректно описать проведенный эксперимент для различных значений размаха вибрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 721 с.
2. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М.: Мир, 1964. 295 с.
3. О'Нейл Э. Введение в статистическую оптику. М.: Мир, 1966. 254 с.
4. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. СПб: Лань, 2010. 704 с.
5. ГОСТ 24346-80. Вибрация. Термины и определения. Введ. 01.01.1981. М.: Изд-во стандартов, 1980. 34 с.
6. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Диалектика, 2007. 912 с.

Сведения об авторах

- Евгений Александрович Зрюмов** — канд. техн. наук, доцент; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, кафедра информационных технологий, Барнаул; E-mail: e.zrumov@mail.ru
- Сергей Петрович Пронин** — д-р техн. наук, профессор; Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, кафедра информационных технологий, Барнаул; E-mail: spronin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационных технологий

Поступила в редакцию
28.12.12 г.