

УДК 53.088.4: 53.082.531

Ю.Н. Кугук

*Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Россия, 111250, Москва, Красноказарменная ул., 14, E-mail: KugukYN@mpei.ru*

ЦИФРОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Данная работа посвящена анализу погрешностей корреляционного и кепстрального алгоритмов обработки сигналов, получаемых оптико-электронным методом оценки относительной деформации объектов с использованием высокоскоростной видеокамеры. Проведено исследование потенциальной точности оценки относительной деформации модели эталонной сетки, численное моделирование и исследование влияния параметров сигнала и шума на точность измерений. Выполнено сравнение нижней границы среднего квадратического отклонения (СКО) погрешностей эффективных оценок относительной деформации с погрешностями, полученными в результате численного моделирования алгоритмов обработки сигналов оптико-электронной измерительной системы.

**ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЕФОРМАЦИИ, ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ,
ЭТАЛОННАЯ СЕТКА, ВИДЕОКАМЕРА**

ВВЕДЕНИЕ

Многие современные технологии требуют непрерывного контроля параметров механического движения с высокой точностью, в частности, линейного перемещения и деформации [1]. Одним из методов оценки параметров перемещения объекта контроля является последовательная во времени регистрация его пространственного положения при помощи видеокамеры с последующей оценкой межкадрового сдвига, получаемой обычно с использованием корреляционного метода [2]. Одной из важнейших характеристик таких систем регистрации является погрешность оценки степени деформации объектов по их регистрируемым изображениям. Рассмотренным ниже методом измеряется относительная деформация объектов с помощью эталонной сетки, нанесенной на объект. Погрешность оценки межкадрового сдвига изображения штрихов эталонной сетки зависит от выбранного алгоритма оценки, а также от параметров зарегистрированных изображений. Если предположить, что систематическая погрешность регистрации пространственного положения эталонной сетки в кадре постоянна для соседних кадров, можно считать, что погрешность оценки относительной величины деформации имеет случайный характер.

Представляет интерес исследовать потенциальную точность оценки пространственного смещения штрихов модели эталонной сетки, а также провести численное моделирование и сравнить корреляционный и кепстральный методы обработки изображения.

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИДЕОКАМЕРЫ

Для получения сигналов, несущих информацию об относительной деформации объекта, используется метод регистрации последовательности изображений эталонной сетки,

нанесенной на контролируемый объект, в процессе деформации объекта. В первую очередь на персональном компьютере формируется эталонная сетка, которая печатается на лазерном принтере с необходимой разрешающей способностью. Далее прозрачная пленка с напечатанной на ней эталонной сеткой фиксируется на объекте, деформации которого необходимо оценить. После нанесенную сетку фотографируют и получают изображения. Затем объект исследования нагружают, фотографируют деформированную сетку, производят сравнение изображения эталонной и деформированной сеток и оценивают величины деформации на поверхность объекта.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ И КЕПСТРАЛЬНЫЙ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ.

Корреляционный метод заключается в нахождении АКФ пространственных сигналов эталонной сетки (в одномерном случае АКФ заданной математической модели) до нагрузки и после, максимумы которых соответствуют периоду штрихов до и после нагрузки.

Количественно величина относительной деформации оценивается по формуле:

$$\delta x = \frac{X_1 - X_0}{X_0}, \quad (1)$$

где X_0 – расстояние между двумя штрихами сетки (период штрихов) до нагрузки объекта, X_1 – расстояние между двумя штрихами сетки после нагрузки.

Аналогичным образом работает и кепстральный метод: вместо АКФ вычисляется кепстр суммы двух пространственных импульсов (которые соответствуют двум соседним линиям сетки) до и после нагрузки, максимумы кепстров соответствуют расстоянию между импульсами до и после нагрузки.

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИИ

Для анализа потенциальной точности оценки величины деформации эталонной сетки решим одномерную задачу: в одномерном пространстве величина деформации определяется изменением расстояний между двумя точками.

Для решения поставленной задачи используем идеальную упрощенную одномерную математическую модель изображения сечения двух линий эталонной сетки:

$$I(x) = \begin{cases} 0, x < x_0 \\ \left[\frac{I_0}{\Delta} \right] \cdot (x - x_0), x_0 \leq x < \Delta + x_0 \\ I_0, \Delta + x_0 \leq x < T + \Delta + x_0 \\ \left[I_0 - \left[\frac{I_0}{\Delta} \right] \cdot (x - (T + \Delta + x_0)) \right], T + \Delta + x_0 \leq x < T + 2\Delta + x_0 \\ 0, T + \Delta + x_0 \leq x < X + x_0 \\ \left[\left[\frac{I_0}{\Delta} \right] \cdot x - \left[\frac{I_0}{\Delta} \right] \cdot (X + x_0) \right], X + x_0 \leq x < X + \Delta + x_0 \\ I_0, X + \Delta + x_0 \leq x < X + T + \Delta + x_0 \\ \left[I_0 - \left[\frac{I_0}{\Delta} \right] \cdot (x - (T + \Delta + X + x_0)) \right], X + T + \Delta + x_0 \leq x < X + T + 2\Delta + x_0 \\ 0, X + T + 2\Delta + x_0 \leq x, \end{cases} \quad (2)$$

где $I(x)$ – зависимость интенсивности изображения эталонной сетки от пространственной координаты в сечении данного изображения плоскостью, параллельной оси x декартовой системы координат (ось x перпендикулярна направлению линий эталонной сетки); I_0 – амплитуда интенсивности изображения эталонной сетки; T – ширина пространственного импульса; Δ – длительность фронта и спада пространственного импульса, x_0 – смещение изображения в направлении оси x относительно начала отсчета; X – пространственный период. На рис. 1 графически показана одномерная математическая модель изображения сечения двух линий эталонной сетки.

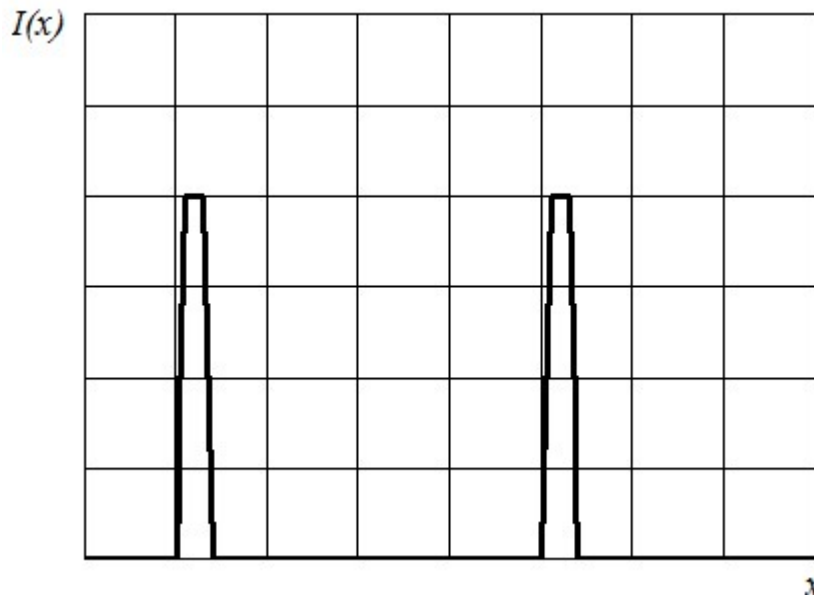


Рис. 1. Одномерная математическая модель изображения сечения двух линий эталонной сетки

Рассмотрим задачу оценки пространственного периода сетки, полагая, что зарегистрированное изображение представляет собой аддитивную смесь сигнала (1) и стационарного широкополосного гауссова шума $n(x)$ со средним значением n_0 :

$$y(x) = I(x) + n(x). \quad (3)$$

Корреляционную функцию шума $n(x)$ опишем выражением для функции корреляции «белого» шума:

$$R(x) = \frac{N_0}{2} \delta(x). \quad (4)$$

где N_0 – односторонняя пространственная спектральная плотность мощности шума. Возможность использования данной модели смеси сигнала и шума обусловлена полученным в [3,4] выводом о том, что в случае равномерной по площади и стационарной освещенности объекта наблюдения закон распределения уровня выходного сигнала видеосигнала близок к гауссову, а двумерная пространственная автокорреляционная функция сигнала имеет ярко выраженный пик в области малых сдвигов. В условиях априорной неопределенности относительно закона распределения случайного информационного параметра X в качестве критерия оптимальности его оценки примем максимум функции правдоподобия регистрируемой смеси сигнала и шума $y(x)$ [5].

В случае, когда неинформационные параметры сигнала точно известны, а отношение энергии сигнала на интервале наблюдения к спектральной плотности мощности шума достаточно велико, оценка информационного параметра X сигнала является оптимальной и по критерию минимума среднеквадратической погрешности, нижняя граница дисперсии которой определяется неравенством Рао-Крамера [5]:

$$D_X \geq \left(\left\langle \left(\frac{\partial \ln p(y(x) | X)}{\partial X} \right)^2 \right\rangle \right)^{-1}. \quad (5)$$

где $\langle \rangle$ – знак математического ожидания, а $p(y(x) | X)$ функционал условной плотности вероятности наблюдаемой реализации $y(x)$.

Для принятой модели шума функционал $p(y(x) | X)$ удовлетворяет соотношению:

$$p(y(x) | X) \sim \exp \left(-\frac{1}{N_0} \int_0^{XM} [y(x) - I(x, X) - n_0]^2 dx \right), \quad (6)$$

где $[0, XM]$ – интервал наблюдения.

Нижняя граница дисперсии оценки смещения X может быть найдена с использованием (1) - (5):

$$\left\langle \left(\frac{\partial \ln p(y(x) | X)}{\partial X} \right)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{2}{N_0} \int_0^{XM} (n(x) - n_0) \frac{\partial I(x, X)}{\partial X} dx \right)^2 \right\rangle = \frac{2}{N_0} \int_0^{XM} \left(\frac{\partial I(x, X)}{\partial X} \right)^2 dx \quad (7)$$

Окончательное выражение для нижней границы дисперсии оценки смещения X :

$$D_X \geq \left(\frac{2}{N_0} \int_0^{XM} \left(\frac{\partial I(x, X)}{\partial X} \right)^2 dx \right)^{-1} = \frac{N_0 \cdot \Delta}{4I_0^2}. \quad (8)$$

На практике значительно важнее случай, когда неинформационные параметры сигнала неизвестны, и решается задача совместного оценивания. При этом нижние границы дисперсий оценок параметров определяются корреляционной матрицей ошибок D , которая вычисляется путем обращения информационной матрицы Фишера J . Элементы информационной матрицы определяются выражением [5]:

$$J_{\lambda_i, \lambda_j} = \left\langle \frac{\partial \ln p(y(x) | \Lambda)}{\partial \lambda_i} \frac{\partial \ln p(y(x) | \Lambda)}{\partial \lambda_j} \right\rangle. \quad (9)$$

где $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots)$ – вектор параметров сигнала, который в данном случае имеет вид $\Lambda = (x_0, X)$. Используя (2) - (4), (6) и (9) можно получить выражения для расчета элементов матрицы Фишера, которая будет иметь вид:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{8I_0^2}{N_0\Delta} & \frac{4I_0^2}{N_0\Delta} \\ \frac{4I_0^2}{N_0\Delta} & \frac{4I_0^2}{N_0\Delta} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Выполнив обращение матрицы J , можно получить корреляционную матрицу ошибок D :

$$D = J^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{N_0\Delta}{4I_0^2} & -\frac{N_0\Delta}{4I_0^2} \\ -\frac{N_0\Delta}{4I_0^2} & \frac{N_0\Delta}{2I_0^2} \end{pmatrix}, \quad (11)$$

диагональные элементы которой определяют нижние границы дисперсий совместных оценок всех параметров сигнала. Для случая оценки параметра X нижняя граница дисперсии определяется выражением (12) для элемента D_{22} корреляционной матрицы D :

$$D_{22} = \left(\frac{N_0\Delta}{2I_0^2} \right). \quad (12)$$

На рис. 2 и рис. 3 изображены зависимости нижней границы относительного среднеквадратического отклонения (СКО) оценки относительной деформации эталонной сетки, выраженной в процентах, от отношения сигнал-шум. Приведенные графики построены с использованием (8), (12) и результатов численного моделирования для случаев известных и неизвестных неинформационных параметров сигнала. Численное моделирование проводился для двух методов: корреляционного и кепстрального.

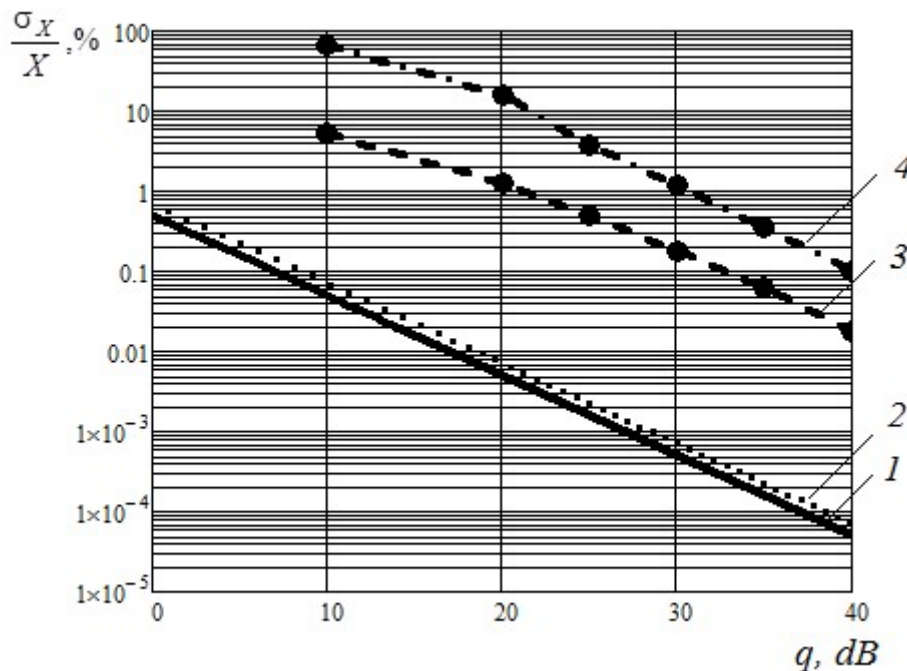


Рис. 2. Нижняя граница относительного СКО оценки относительной деформации эталонной сетки от отношения сигнал/шум, полученная аналитически и по результатам численного моделирования (1–

аналитическая зависимость для случая известных неинформационных параметров; 2– аналитическая зависимость для случая неизвестных неинформационных параметров; 3,4–результат численного моделирования для корреляционного и кепстрального методов соответственно).

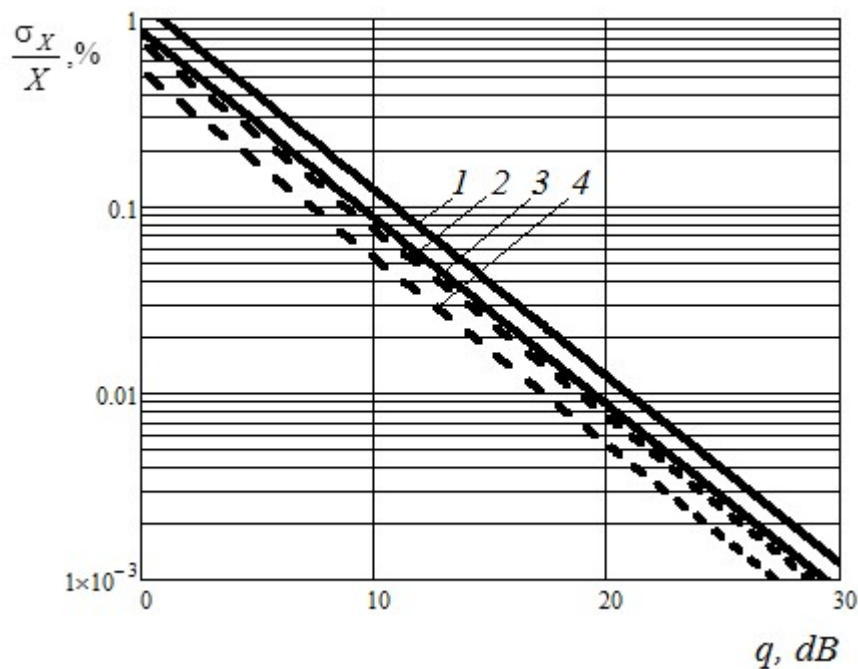


Рис. 3. Нижняя граница относительного СКО оценки относительной деформации эталонной сетки от отношения сигнал/шум при разном параметре Δ (1–для случая неизвестных неинформационных параметров, $\Delta = 0.05X$; 2– для случая известных неинформационных параметров, $\Delta = 0.05X$; 3– для случая неизвестных неинформационных параметров, $\Delta = 0.2X$; 4– для случая известных неинформационных параметров, $\Delta = 0.2X$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатом проведенного исследования является возможность численно оценить значение нижней границы СКО оценки относительной деформации объектов в зависимости от отношения сигнал/шум. Графики на рис.2 и рис.3 свидетельствуют от том, что нижняя граница СКО обратно пропорциональна отношению сигнал/шум. В случае, когда неинформационные параметры регистрируемого сигнала неизвестны, погрешность оценивания относительной деформации оказывается больше, следовательно, чем больше имеется информации сигнале, тем больше точность измерения относительной деформации. Погрешности использования корреляционного метода для оценки относительной деформации значительно меньше, чем погрешность использования кепстрального метода, выигрыш в отношении сигнал/шум при использовании корреляционного метода составляет около 5-15 дБ.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

δx – количественная оценка величины деформации, мкм.

$I(x)$ – зависимость интенсивности изображения, отн.ед.

I_0 – амплитуда интенсивности изображения, отн.ед.

Δ – величина фронта и спада пространственного импульса, мкм.

x – координата, мкм.

x_0 - смещение изображения в направлении оси x относительно начала отсчета, мкм.

X - пространственный период, мкм.

$y(x)$ – отсчеты аддитивной смеси сигнала и шума, отн.ед.

$n(x)$ – белый шум, отн.ед.

N_0 – односторонняя пространственная спектральная плотность мощности шума, (отн.ед)·мкм.

D – нижняя граница дисперсии оценки относительной деформации, мкм².

p – функционал условной плотности вероятности наблюдаемой реализации $y(x)$.

n_0 – среднее значение шума, отн.ед.

σ_x – Нижняя граница относительного среднеквадратического отклонения оценки относительной деформации эталонной сетки, мкм.

$\langle \rangle$ – знак математического ожидания.

$\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots)$ – вектор параметров сигнала.

J – информационная матрица Фишера.

СКО– среднеквадратичное отклонение.

АКФ– автокорреляционная функция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Иванов А.Н., Киреев В.Е., Нижегородова К.В.** // Современные наукоемкие технологии. № 3-2. 2016 . С.241-245.
2. **Sutton M.A., Yan J.H., Tiwari V., Schreier H.W., and Orteu J.J.** The effect of out-of-plane motion on 2d and 3d digital image correlation measurements // Optics and Lasers in Engineering, 46, 2008, P.746–757.
3. **Гречихин В.А., Расковская И.Л.** Анализ характеристик системы цифровой регистрации оптических сигналов на базе матричного фотоприемника // Измерительная техника. 2009. №4. С.29-33.
4. **Grechikhin V.A., Raskovskaya I.L.** Analysis of the characteristics of a system for digital recording of optical signals based on an array photodetector // Measurement Techniques: Volume 52, Issue 4 (2009). P.1-8.
5. **Перов А.И.** Статистическая теория радиотехнических систем. – М.: Радиотехника, 2003.

Y.N. Kuguk

*National research university "MPEI",
Russia, 111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14, E-mail: KugukYN@mpei.ru*

DIGITAL IMAGE PROCESSING

This work is about the analysis of errors in correlation and cepstral algorithms of signal processing by using the optical electronic method of estimating the relative deformation of objects with a high-speed video camera. The research of the potential accuracy of the estimation of the relative deformation of the model of the reference grid, numerical simulation and investigation of the influence of the signal and noise parameters on the accuracy of the measurements was made. The comparison of the lower limit of the mean square deviation (MSD) of the errors of effective estimates relative strain with errors obtained as a result of numerical simulation of signal processing algorithms for the optical electronic measuring system was performed.

ESTIMATE OF RELATIVE DEFORMATION, POTENTIAL ACCURACY,
REFERENCE GRID, VIDEOCAMERA