

ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ СПЕКЛОГРАММ НА ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ МЕТОДОМ СПЕКЛ-ФОТОГРАФИИ

© 2011 г. А. А. Гребенюк*; В. П. Рябухо** **, доктор физ.-мат. наук

* Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Саратов

** Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук, Саратов

E-mail: GrebenyukAA@yandex.ru

Рассмотрено влияние нелинейной обработки цифровых спеклограмм на точность определения смещения спекл-структур методом аппроксимации коэффициента корреляции. Показано, что нелинейная обработка может приводить к повышению точности определения смещений. Проведен анализ условий применимости такой обработки.

Ключевые слова: спекл-структура, цифровая корреляция изображений, цифровая спекл-фотография, прецизионные измерения.

Коды OCIS: 110.6150, 120.6150

Поступила в редакцию 13.01.2011

Введение

Для измерения перемещений, деформаций, потоков жидкостей, изменения ориентации объектов и др. широко используются методы спекл-фотографии [1–3]. Они основаны на записи распределения интенсивности объектного поля в исходном и измененном состояниях и анализе изменений, произошедших с объектным полем между экспозициями. Для определения смещения объектного поля в качестве несущего сигнала используются лазерные спеклы (при использовании когерентного лазерного света для освещения рассеивающего объекта). Если освещение объекта некогерентно, но объект обладает существенно неоднородным распределением коэффициента отражения, это также может дать несущую структуру в изображении. Точность метода спекл-фотографии определяется точностью метода анализа смещения таких структур в зарегистрированных изображениях.

В некоторых задачах прецизионных измерений, связанных со спеклами, используются нелинейность записи цифровой камеры или специальная нелинейная обработка сигнала [4, 5]. В работе [6] приведена теория корреляции спекл-структур в присутствии нелинейности регистрации, но оставлен в стороне вопрос влияния нелинейности записи спеклограмм

на точность определения смещений. Вопрос влияния нелинейности регистрации (или специальной нелинейной обработки) спеклограмм на точность метода цифровой спекл-фотографии остается недостаточно исследованным.

Данная работа посвящена исследованию влияния нелинейности записи цифровых спеклограмм (или специальной нелинейной обработки записанных спеклограмм) на точность определения смещений методом аппроксимации коэффициента корреляции. Проведено компьютерное моделирование спеклограмм (описанное в разделе 1), определены смещения промоделированных спеклограмм (алгоритм описан в разделе 2) при различных видах предварительной нелинейной обработки. Результаты анализа представлены в разделе 3.

1. Моделирование спеклограмм

Для анализа точности работы алгоритма определения субпикселных смещений необходимо с высокой точностью знать условия записи и взаимное смещение спекл-структур в анализируемых спеклограммах. Наиболее подходящим методом получения спеклограмм для такого анализа является численное моделирование, которое позволяет получать спеклограммы с известным взаимным сдвигом в контролируемых условиях. Для создания спе-

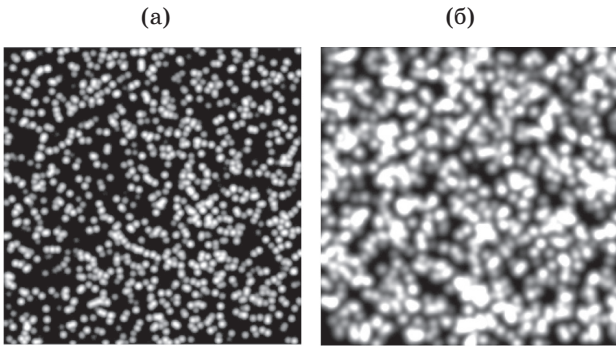


Рис. 1. Примеры модельных спекл-структур $n = 256, m = 256, s = 1200, R = 2$ (а), $R = 4$ (б).

клограмм в данном исследовании использовалась модель, описанная в работе [7]. Модельная спекл-структура задавалась в виде суперпозиции вкладов s пятнышек в виде

$$I(x, y) = \sum_{k=1}^s I_{0k} \exp \left\{ - \left[(x - x_k - d_x)^2 + (y - y_k - d_y)^2 \right] / R^2 \right\}, \quad (1)$$

$$C(v, u) = \frac{\sum_{i=-\Delta y}^{\Delta y} \sum_{j=-\Delta x}^{\Delta x} [I_{1ij} - I_{1m}] [I_{2i+u, j+v} - I_{2m}]}{\left\{ \left(\sum_{i=-\Delta y}^{\Delta y} \sum_{j=-\Delta x}^{\Delta x} [I_{1ij} - I_{1m}]^2 \right)^{1/2} \left(\sum_{i=-\Delta y}^{\Delta y} \sum_{j=-\Delta x}^{\Delta x} [I_{2i+u, j+v} - I_{2m}]^2 \right)^{1/2} \right\}} \quad (2)$$

двух спеклограмм, где I_{1ij}, I_{2ij} – распределения интенсивности (дискретно заданные) в рассматриваемых участках спеклограмм, I_{1m}, I_{2m} – соответствующие локальные средние. Затем для анализа выбираются значения коэффициента корреляции, окружающие найденный пик (всего 9 точек).

• Пик коэффициента корреляции, заданный в этих точках, аппроксимируется по методу наименьших квадратов полиномом вида

$$C(j, i) = a_0 + a_1 j + a_2 i + a_3 j^2 + a_4 j i + a_5 i^2. \quad (3)$$

Положение максимума этой аппроксимирующей функции, определяемое по формулам

$$c_x = (2a_1 a_5 - a_2 a_4) / (a_4^2 - 4a_3 a_5), \quad (4a)$$

$$c_y = (2a_2 a_3 - a_1 a_4) / (a_4^2 - 4a_3 a_5), \quad (4б)$$

вместе с ранее определенным значением (d_{xm}, d_{ym}) принимается за положение максимума непрерывного коэффициента корреляции $(m_x, m_y) = (d_{xm} + c_x, d_{ym} + c_y)$.

где для каждого k случайным образом задавались x_k, y_k, I_{0k} , равномерно распределенные на отрезках $[1, n], [1, m], [0, I_0]$ соответственно; n и m – количество точек в моделируемой спеклограмме по осям x и y , (d_x, d_y) – заданное значение смещения (для исходной спеклограммы $d_x = 0, d_y = 0$). Примеры моделированных спекл-структур представлены на рис. 1.

2. Алгоритм анализа смещения спеклограмм

Для определения субпиксельных смещений в данной работе использовался метод аппроксимации пика коэффициента корреляции полиномом второй степени [7, 8]. Он позволяет получать информацию о субпиксельных смещениях непосредственно по коэффициенту корреляции, заданному с шагом в один пиксел (получаемому на этапе анализа с точностью до пиксела матрицы, точнее до $\pm 0,5$ пикс). Суть этого метода сводится к следующему.

• На первом этапе алгоритма с точностью до $\pm 0,5$ пикс определяется положение (d_{xm}, d_{ym}) максимума коэффициента корреляции

3. Определение смещения спекл-структур с использованием обработки нелинейной функцией

Для исследования влияния нелинейной обработки на точность определения смещения спекл-структур с помощью метода, описанного в разделе 2, проведен анализ смещений цифровых спеклограмм, получаемых в результате численного моделирования, при различных видах предварительной обработки нелинейной функцией. Были промоделированы спеклограммы с $n = 256, m = 256$, без смещения вдоль оси y и смещением от нуля до $0,5$ пикс с шагом $0,1$ пикс вдоль оси x . Затем в каждой спеклограмме с помощью алгоритма аппроксимации пика коэффициента корреляции было определено смещение в $961 (31 \times 31)$ точке с использованием окна размером 31×31 , при различных функциях $f(I) = I^n$. Отклонения средних значений определенных смещений вдоль оси x от истинных (заданных при моделировании)

значений смещения представлены на рис. 2. На рис. 3 приведены среднеквадратичные отклонения σ_x измеренных смещений от средних значений.

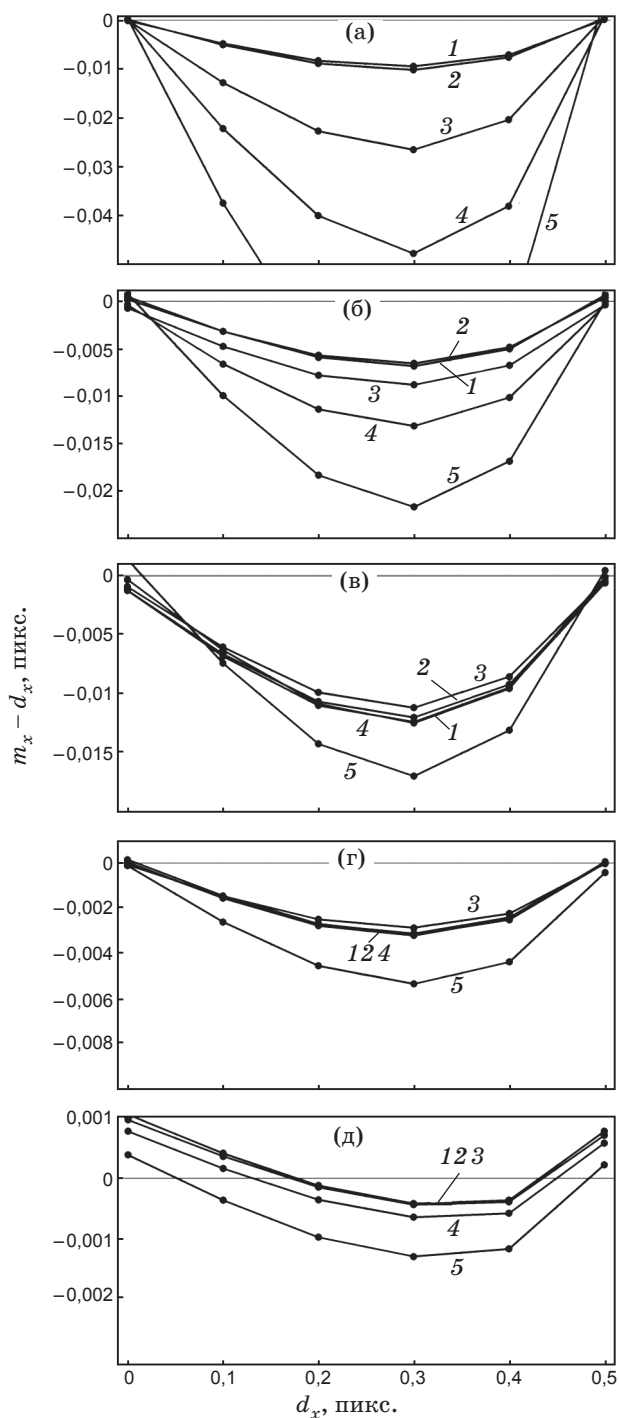


Рис. 2. Систематические ошибки алгоритма определения смещения при различных показателях степени функции нелинейной обработки и различных спекл-структурах $s = 1200, R = 1$ (а); $s = 1200, R = 2$ (б); $s = 4800, R = 2$ (в); $s = 1200, R = 4$ (г); $s = 1200, R = 8$ (д). $n_p = 0,05 - 1, n_p = 0,1 - 2, n_p = 0,5 - 3, n_p = 1 - 4$ (отсутствие нелинейной обработки), $n_p = 2 - 5$.

Из рис. 2 видно, что обработка с использованием функции с показателем степени $n_p = 2$ привела к негативному эффекту во всех рассмотренных случаях. Обработка функциями

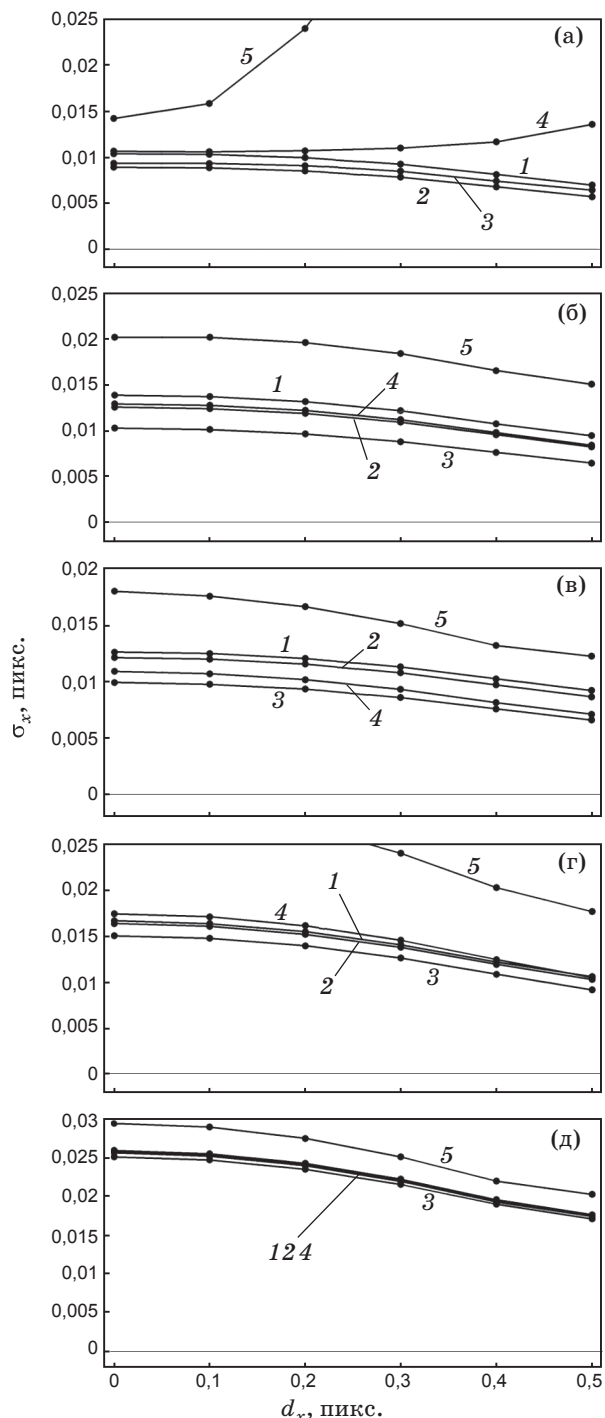


Рис. 3. Среднеквадратическое отклонение от среднего значения при различных показателях степени функции нелинейной обработки и различных спекл-структурах $s = 1200, R = 1$ (а); $s = 1200, R = 2$ (б); $s = 4800, R = 2$ (в); $s = 1200, R = 4$ (г); $s = 1200, R = 8$ (д). $n_p = 0,05 - 1, n_p = 0,1 - 2, n_p = 0,5 - 3, n_p = 1 - 4$ (отсутствие нелинейной обработки), $n_p = 2 - 5$.

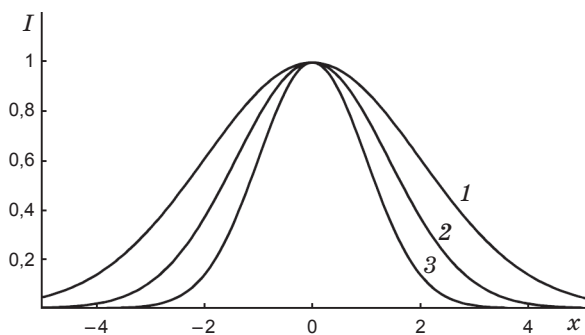


Рис. 4. Графики функций $I^{0,5}(x) - 1$, $I(x) - 2$, $I^2(x) - 3$. ($I(x) = \exp[-x^2/4]$).

с показателями степени $n_p < 1$ может приводить к увеличению точности измерений (рис. 3а, б), причем чем более неоднородна спекл-структура (вследствие малого размера спеклов или их разреженности), тем выше эффективность обработки и тем более “сильная” обработка (с малыми n_p) может быть использована (см. рис. 2). Точность определения смещений в результате такой обработки может повышаться в 4–5 раз (рис. 2а). Анализ среднеквадратичных отклонений показывает, что нелинейная обработка с использованием функции $f(I) = I^{n_p}$ при $n_p < 1$ уменьшила разброс результатов (рис. 3а–г).

Полученные результаты можно качественно объяснить следующим образом. Пусть распределение интенсивности в пределах спекла имеет форму $I(x)$, и это распределение подвергается обработке нелинейной функцией $f(I)$. Если производная $df(I)/dI$ – возрастающая функция, бóльшим значениям I соответствуют бóльшие значения $f(I)$, значит $f(I(x))$ уже, чем $I(x)$ (например, по ширине на половине высоты). Если $df(I)/dI$ – убывающая функция, $f(I(x))$ становится более широкой по сравнению с $I(x)$. Это может быть проиллюстрировано на примере обработки функциями $f(I) = I^{1/2}$ и $f(I) = I^2$ (рис. 4). Таким образом, нелинейная обработка распределений интенсивности с использованием функции с показателем степени $n_p < 1$ приводит к большей равномерности спекл-структуры, обработка функциями с $n_p > 1$ – к большей неоднородности. Поскольку метод

аппроксимации пика коэффициента корреляции основан на приближении пика несколькими элементами (в рассмотренном случае – до второго порядка включительно) соответствующего ряда Тейлора, для правильной работы необходимо, чтобы коэффициент корреляции медленно менялся вблизи максимума. Сглаживание спекл-структуры дает сглаживание коэффициента корреляции. Возможно, это является причиной улучшения результатов, полученных с помощью данного метода. Кроме того, некоторое сглаживание коэффициента корреляции приводит к уменьшению дисперсии результатов измерений (рис. 3). Однако, как видно по кривым 1 и 2 рис. 2 и 3, чрезмерно сильная сглаживающая нелинейная обработка также приводит к уменьшению точности.

Отметим, что эти рассуждения справедливы лишь для распределений $I(x)$, обладающих единственным максимумом (монотонно спадающим по его краям) (как на рис. 4а). Для распределений $I(x)$, имеющих внешние осцилляции, нелинейная обработка функциями с $n_p < 1$ приведет к развитию этих внешних осцилляций по сравнению с центральной частью функции, что может оказать негативный эффект на точность определения смещений методом аппроксимации пика коэффициента корреляции.

Заключение

В настоящей работе исследовано влияние нелинейной обработки цифровых спеклограмм на точность определения смещения спекл-структур методом аппроксимации пика коэффициента корреляции. Показано, что нелинейная обработка степенными функциями с показателем степени, меньшим единицы (более широко – функциями с положительной убывающей производной), может приводить к улучшению результатов измерений для неоднородных структур. Чем более неоднородна структура, тем более “сильная” (с меньшим n_p) обработка нелинейной функцией может быть использована и тем выше ее эффективность.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Springer handbook of experimental solid mechanics / Ed. by Sharpe W.N. N. Y.: Springer, 2008. P. 655–673.
2. Петров Н.В., Беспалов В.Г., Жевлаков А.П., Солдатов Ю.И. Определение скорости движения объекта в воде с использованием метода цифровой спекл-фотографии // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 11. С. 70–73.

3. Горбатенко Б.Б., Гребенюк А.А., Максимова Л.А., Перепелицына О.А., Рябухо В.П. Спекл-фотография и голографическая интерферометрия с цифровой записью дифракционного поля в фурье-плоскости // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 1. С. 69–81.
 4. Joenathan C., Haible P., Tiziani H.J. Speckle interferometry with temporal phase evaluation: influence of decorrelation, speckle size, and nonlinearity of the camera // Appl. Opt. 1999. V. 38. № 7. P. 1169–1178.
 5. Refregier P., Laude V., Javidi. B. Nonlinear joint-transform correlation: an optimal solution for adaptive image discrimination and input noise robustness // Opt. Lett. 1994. V. 19. № 6. P. 405–407.
 6. Pedersen H.M. Theory of speckle-correlation measurements using nonlinear detectors // JOSA. 1984. V. 1. № 8. P. 850–855.
 7. Pang Bing, Xie Hui-min, Xu Bo-qin, Dai Fu-long. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation // Measurement Science and Technology. 2006. V. 17 P. 1615–1621.
 8. Wei Sun, Chenggen Quan, Cho Jui Tay, Xiaoyuan He. Global and local coordinates in digital image correlation // Appl. Opt. 2007. V. 46. № 7. P. 1050–1056.
-