

УДК 621.396:681.34

А.В. ТОЦКИЙ

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОМЕНТНЫХ ФУНКЦИЙ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА

Рассмотрена задача поиска оптимальных параметров аддитивной и мультипликативной функции предсказания строк, вводимых при восстановлении цифровых изображений, искаженных случайным взаимным сдвигом строк и смесью аддитивного гауссова и импульсного шума. Приведены результаты восстановления трех различных типов тестовых изображений с использованием оценивания моментных функций третьего порядка. Результаты компьютерного статистического моделирования дают возможность определить оптимальные параметры функций предсказаний с точки зрения обеспечения максимально-го показателя качества реставрации изображений.

восстановление изображений, пиксель, случайный сдвиг строк, биспектральная плотность

Введение

Методы пространственно-временной обработки одномерных сигналов с использованием оценивания моментных функций третьего порядка – оценок корреляционной функции третьего порядка (КФТП) и биспектральной плотности (преобразования Фурье КФТП) – достаточно хорошо изучены и находят широкое применение в различных приложениях [1 – 3]. Гораздо меньше внимания в научных статьях уделено методам биспектрального оценивания при решении задач реставрации двумерных изображений. Это объясняется тем, что для реализации алгоритмов восстановления двумерных сигналов по оценкам комплексной четырехмерной биспектральной плотности требуются значительно большие вычислительные ресурсы. Поэтому в последнее время появились публикации, где двумерные цифровые изображения различным образом преобразуют в одномерные последовательности отсчетов перед процедурой восстановления изображений по оценкам моментных функций третьего порядка [4, 5].

Следует также отметить, что использование метода биспектрального оценивания при решении задач восстановления изображений неизбежно связано с характерными ограничениями, специфика которых

проявляется в следующем. Восстановление фазового Фурье-спектра изображения отдельной строки по фазовому биспектру известными методами [4, 5] позволяет получить точный результат только в случае обработки минимально-фазовых сигналов, т.е. при условии, когда отсчеты фазового биспектра лежат в пределах интервала $[-\pi, \pi]$. В практической ситуации, однако, строки изображения соответствуют смешанно-фазовым сигналам и в фазовом биспектре строки изображения наблюдаются многочисленные разрывы (завороты фазы). В результате этого возникает проблема фазовой неоднозначности, которая приводит к появлению фазовых искажений в восстановленном изображении. Процедура разворота фазы в присутствии шума часто оказывается неэффективной, поскольку она сопровождается недопустимо большими фазовыми ошибками. Следует также обратить внимание на свойство инвариантности биспектральной плотности по отношению к пространственному сдвигу [1]. Это свойство проявляется в виде сдвига строки восстановленного изображения относительно своего исходного положения на величину, равную центру тяжести строки.

Решение задачи восстановления цифровых изображений, искаженных случайным сдвигом строк и аддитивным гауссовым и импульсным шумами, бы-

ло начато в работах [6, 7] с использованием моментных функций третьего порядка. В данных работах были предложены методы, обеспечивающие распознавание объекта неизвестной формы по изображению, восстановленному с помощью биспектральных оценок строк при ограниченном наборе наблюдаемых реализаций. Введение аддитивных [6] и мультипликативных [7] предискажений в строку восстанавливаемого изображения обеспечивает преобразование обрабатываемых процессов в класс максимально фазовых сигналов и, как следствие этого, позволяет избежать искажений, возникающих из-за фазовой неоднозначности при одновременном выравнивании строк.

Результаты восстановления тестовых изображений, представленные в статьях [6, 7], свидетельствуют об уменьшении искажений, достаточном для визуального распознавания объекта. Однако, вопросы выбора оптимального уровня аддитивных предискажений и формы мультипликативной функции предискажений с точки зрения минимальных ошибок в восстановленном изображении остаются открытыми.

Целью настоящей статьи является отыскание оптимальных параметров аддитивной и мультипликативной функции предискажений при решении задач восстановления изображений с использованием оценивания моментных функций третьего порядка.

1. Постановка задачи

Для произвольных изображений практически невозможно однозначно оценить качественные показатели того или иного алгоритма восстановления. Лишь для однородных участков можно приблизительно определить степень улучшения изображения, анализируя для них дисперсию помех σ^2 на исходном изображении и дисперсию остаточных помех σ_{res}^2 на восстановленном. Однако, вследствие проблематичности выбора действительно однородного

“тестового” участка, оценки σ^2 и σ_{res}^2 могут заметно отличаться от соответствующих истинных величин. Поэтому для проведения статистических исследований представляется целесообразным использование стандартных тестовых изображений с априорно известной структурой, в которые искусственно вносят искажения и помехи.

Поскольку исследуемые изображения могут содержать как плоские участки (участки, на которых значения интенсивности пикселей близки к локальному среднему значению), соответствующие крупномасштабным однородным образованиям, так и различные “неоднородности”, к которым относятся малоразмерные (точечные) объекты, а также одномерные протяженные объекты, то для проведения исследований нами были выбраны несколько разнообразных по характеристикам тестовых изображений: baboon – высоко текстурированное изображение с большим количеством малоразмерных объектов и резких перепадов интенсивности (рис. 1, а); Barbara – изображение с множеством объектов линейчатой формы и наличием нескольких однородных участков (рис. 1, б) и Lenna – изображение с протяженными однородными объектами с достаточно четкими границами и небольшим количеством текстурированных областей (рис. 1, в).



Рис. 1. Тестовые исходные изображения:
а – baboon; б – Barbara; в – Lenna

При компьютерном моделировании исследовались изображения, искаженные смесью аддитивного гауссова шума с нулевым средним значением и дисперсией со значениями 70, 100 и 130, и импульсного шума с равномерным законом распределения в диа-

пазоне уровней интенсивности 0...255 и вероятностями появления импульсов 1%, 3% и 5%. Девиация случайного взаимного сдвига соседних строк выбиралась равной ±10, ±30 и ±50 пикселей. Примеры тестовых изображений, искаженных случайным сдвигом строк с девиацией ±30 пикселей, представлены на рис. 2.

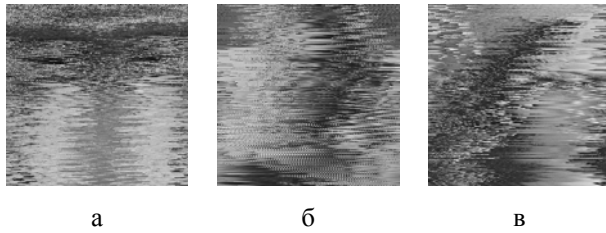


Рис. 2. Тестовые изображения, искаженные случайным взаимным сдвигом строк:
а – baboon; б – Barbara; в – Lenna

Для количественной оценки точности предложенных методов восстановления изображений и сравнительного анализа эффективности восстановления изображений различными методами нами проводился расчет и анализ следующих величин:

а) дисперсия флуктуаций $\bar{\sigma}_{inp}^2$ интенсивности изображения, искаженного помехами

$$\bar{\sigma}_{inp}^2 = \left\langle \frac{1}{IJ-1} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [x^{(m)}(i, j) - s(i, j)]^2 \right\rangle_{M_1}, \quad (1)$$

где M_1 – количество статистически независимых кадров изображения – реализаций, участвующих в усреднении по ансамблю этих реализаций; $x^{(m)}(i, j)$ – m -я реализация интенсивности (i, j) -го пикселя искаженного изображения; $s(i, j)$ – интенсивность (i, j) -го пикселя неискаженного изображения;

б) отношение сигнал/шум SNR_{inp} на входе системы восстановления изображений:

$$\overline{SNR}_{inp} = \frac{P_s}{\bar{\sigma}_{inp}^2}, \quad (2)$$

где $P_s = \frac{1}{IJ} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} [s(i, j) - E]^2$;

$$E = \frac{1}{IJ} \sum_{i=0}^{I-1} \sum_{j=0}^{J-1} s(i, j);$$

в) дисперсия флуктуаций интенсивности $\bar{\sigma}_{out}^2$ в восстановленном изображении:

$$\bar{\sigma}_{out}^2 = \left\langle \min \left\{ \frac{1}{IJ-1} \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J [s^{(m)}(i, j) - s(i-t, j)]^2 \right\} \right\rangle_{M_1}, \quad (3)$$

где $s^{(m)}(i, j)$ – интенсивность в (i, j) -м пикселе в восстановленном изображении; t – сдвиг, который введен с учетом инвариантности биспектра к сдвигу восстанавливаемой строки изображения;

в) отношение сигнал/шум \overline{SNR}_{out} в восстановленном изображении

$$\overline{SNR}_{out} = \frac{P_s}{\bar{\sigma}_{out}^2}; \quad (4)$$

г) среднеквадратичный показатель качества (точности) восстановления изображения ε , позволяющий оценить улучшение отношения сигнал/помеха в восстановленном изображении

$$\varepsilon = \frac{\overline{SNR}_{out}}{\overline{SNR}_{inp}}. \quad (5)$$

2. Восстановление изображений с использованием аддитивных предсказаний

Данный метод, подробно описанный в статье [6], включает устранение случайного взаимного сдвига строк с использованием расчета поправок в виде разностей координат максимумов взаимных корреляционных функций соседних строк и координат центров тяжести автокорреляционных функций строк, восстановленных по оценкам их биспектральных плотностей. При введении аддитивных предсказаний в виде двух мощных δ -импульсов в начало и конец строки решалась задача поиска и оценки оптимальной амплитуды данных δ -импульсов для обеспечения минимальных искажений в восстановленном изображении.

Для оценки оптимального по критерию (5) уровня аддитивных предсказаний проводилось компьютерное моделирование восстановления выше перечисленных тестовых изображений, при котором в

широких пределах варьировалась амплитуда аддитивных предискажений. Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 3 – 5.

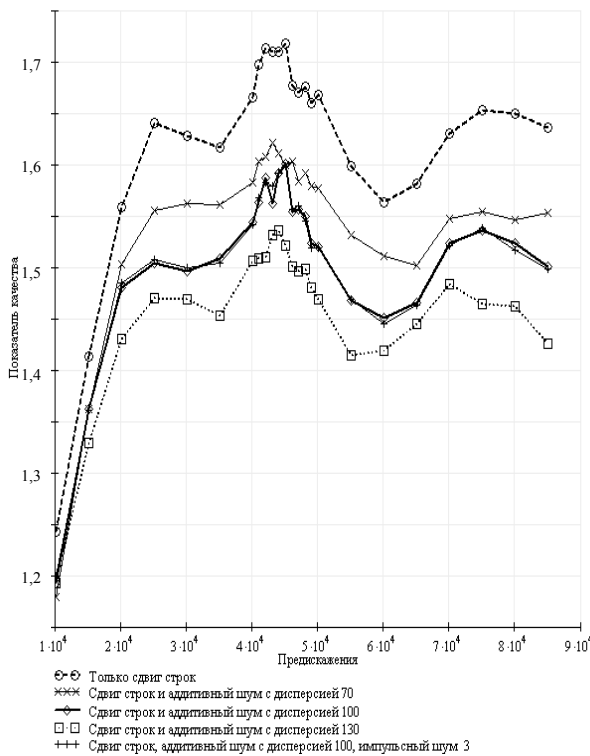


Рис. 3. Кривые зависимостей показателя качества ε от амплитуды предискажающих δ -импульсов для изображения Lenna

Анализ графиков на рис. 3 – 5 позволяет отметить следующее:

- зависимость эффективности восстановления изображений от амплитуды предискажающих δ -импульсов носит нелинейный характер;

- для всех трех типов исследуемых изображений наблюдается наличие нескольких локальных максимумов эффективности восстановления. В окрестности глобального максимума присутствуют небольшие флуктуации показателя качества восстановленного изображения ε ;

- приведенные зависимости имеют «колоколообразную» форму, то есть при слишком маленьких, или при слишком больших предискажениях показатель эффективности ε низкий;

- как правило, для более-менее гладких тестовых изображений Lenna и Barbara оптимальными амплитудами δ -импульсов следует считать амплитуды,

лежащие в окрестности 45000, а для сильно текстурированного изображения baboon данная величина меньше – приблизительно 20000;

- в присутствии аддитивного шума эффективность восстановления снижается при оптимальном выборе амплитуду предискажающих δ -импульсов, а при неоптимальном выборе амплитуд эффективность реставрации изображений приблизительно одинакова.

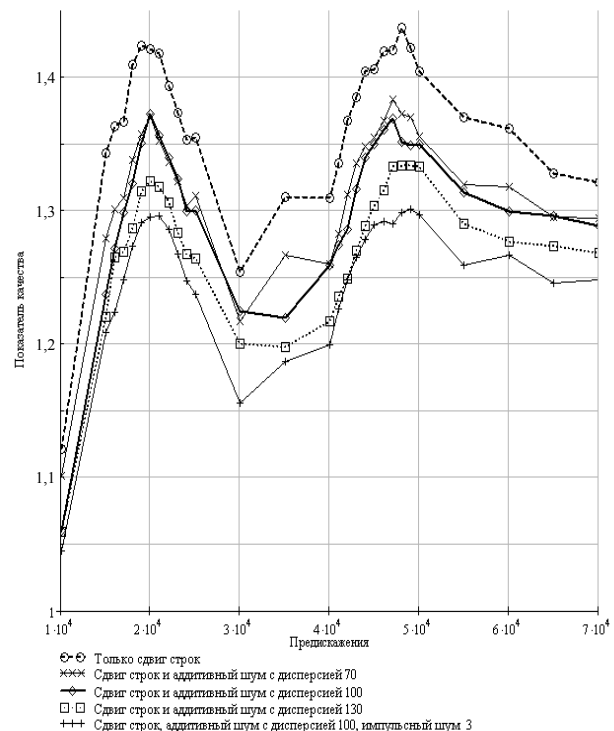


Рис. 4. Кривые зависимостей показателя качества ε от амплитуды предискажающих δ -импульсов для изображения Barbara

При воздействии импульсного шума небольшого уровня с вероятностью 3% величина ε уменьшается в среднем на 0,00025, однако при увеличении вероятности импульсного шума до величины 5% показатель восстановления существенно ухудшается: в среднем – величина ε уменьшается на 0,042.

В целом, приведенные на графиках результаты моделирования свидетельствуют о достаточно высоких показателях эффективности для решения задач надежного распознавания априорно неизвестного объекта, маскированного случайным взаимным сдвигом строк, аддитивным и импульсным шумом.

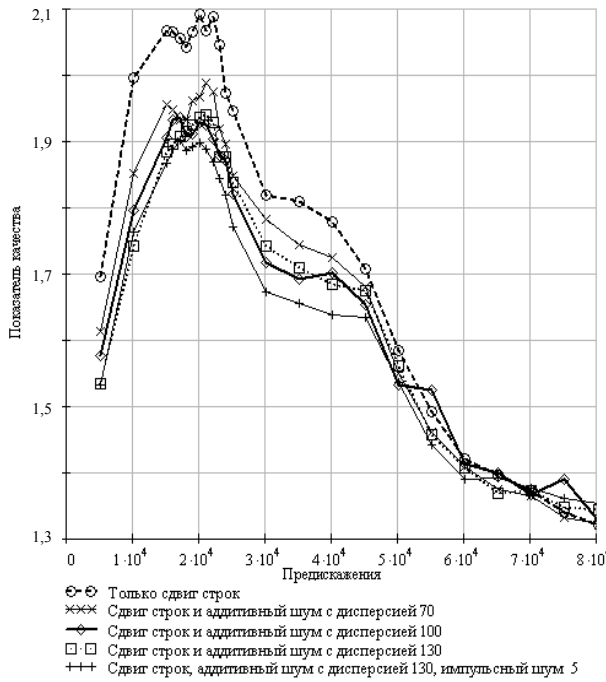


Рис. 5. Кривые зависимостей показателя качества ε от амплитуды предсказывающих δ -импульсов для изображения baboon

3. Восстановление изображений с использованием мультипликативных предсказаний

Метод восстановления изображений с использованием мультипликативных предсказаний строк [7] обеспечивает улучшенные показатели восстановления изображений по сравнению с методом [6]. В статье [7] исследовалась гладкая функция предсказаний вида:

$$w_{pr}(i) = e^{\mu(L-i)^2}, \quad (6)$$

где величины L и μ определяют протяженность и остроту функции (6) соответственно.

Для оценки оптимальной формы предсказывающей функции с точки зрения максимума величины показателя качества (5) нами были проведены статистические исследования восстановления трех типов выше отмеченных тестовых изображений, когда в широких пределах варьировались параметры L и μ , определяющие протяженность и остроту функции предсказаний (6). Результаты компьютерного моделирования приведены на рис. 6 – 11.

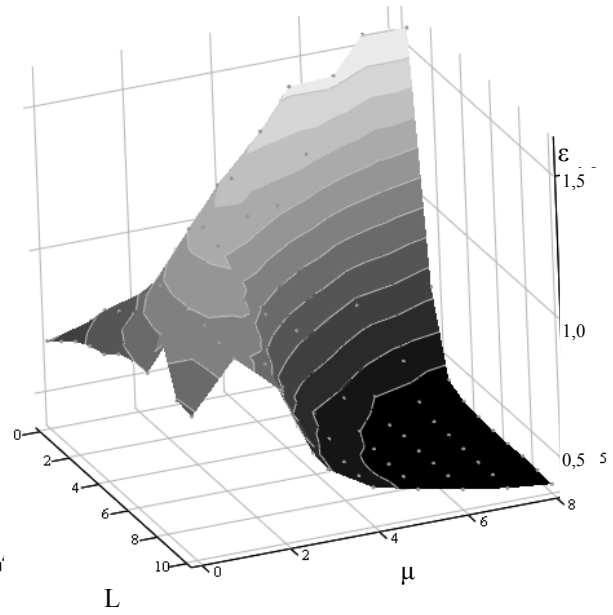


Рис. 6. Зависимость показателя качества ε от параметров L и μ для изображения Lenna, искаженного случайным сдвигом строк ± 30 пикселей и смесью аддитивного гауссова шума с дисперсией 100 и импульсного шума с вероятностью 3%

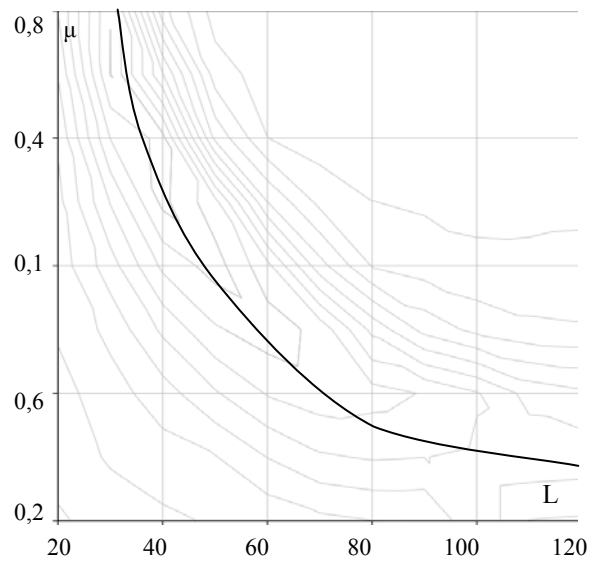


Рис. 7. Кривая оптимального выбора параметров L и μ для данных на рис. 6

Анализ графиков, представленных на рис. 6, 8 и 10, показывает, что величина ε нелинейно зависит от варьируемых параметров L и μ , и при этом наблюдается экстремум показателя качества восстановления изображений при определенных – оптимальных величинах L и μ .

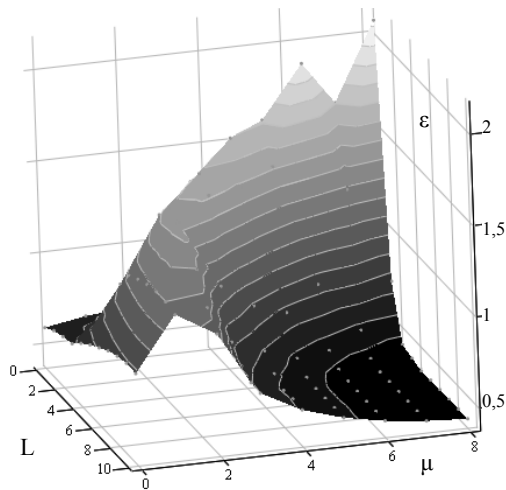


Рис. 8. Зависимость показателя качества ε от параметров L и μ для тестового изображения Babar, искаженного случайным сдвигом строк ± 30 пикселей и смесью аддитивного гауссова шума с дисперсией 130 и равномерным импульсным шумом с вероятностью 5%

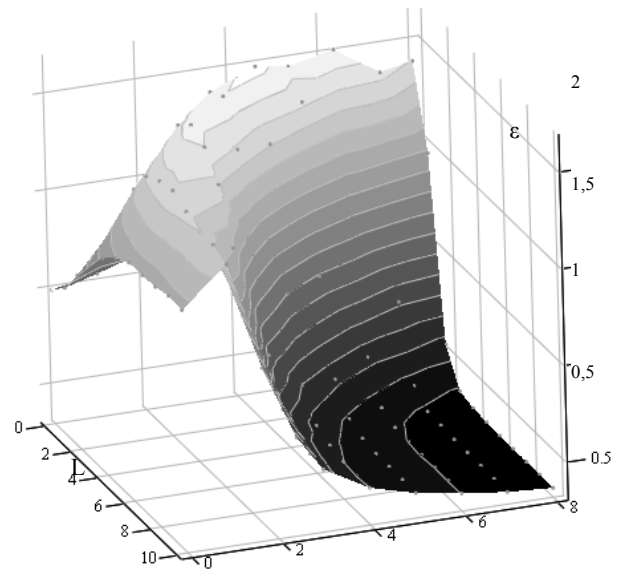


Рис. 10. Зависимость показателя качества ε от параметров L и μ для тестового изображения baboon, искаженного случайным сдвигом строк ± 30 пикселей и смесью аддитивного гауссова шума с дисперсией 130 и равномерного импульсного шума с вероятностью 5%

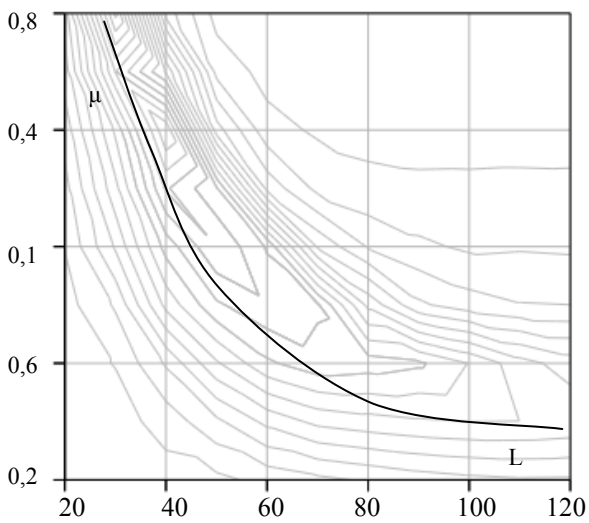


Рис. 9. Кривая оптимального выбора параметров L и μ для данных рис. 8

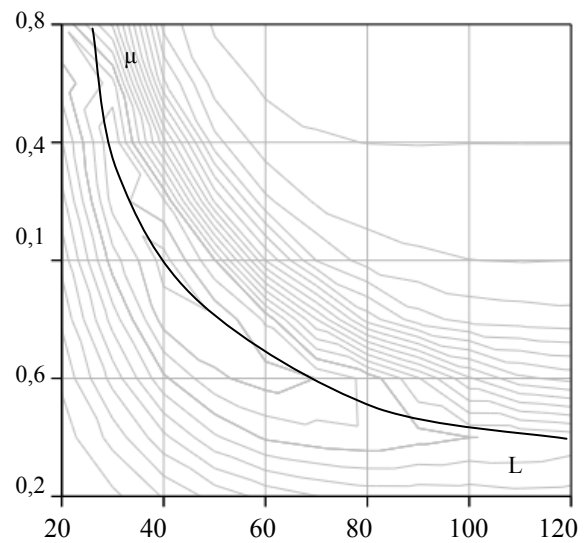


Рис. 11. Кривая оптимального выбора параметров L и μ для данных рис. 10

Характер поведения зависимости величины ε от оптимальных параметров L и μ (рис. 7, 9 и 11) близок к экспоненциальному закону.

Хотя для исследуемых типов изображений кривые на рис. 7, 9 и 11 похожи друг на друга, для каждого конкретного изображения значения функции $\varepsilon(L, \mu)$ отличаются.

При воздействии аддитивного гауссова шума показатель качества ε падает в среднем на 0,5, а при воздействии импульсного шума величина ε уменьшается незначительно.

Следовательно, предложенный метод реставрации изображений является достаточно устойчивым к небольшому аддитивному шуму.

Анализ приведенных результатов позволяет отметить, что предложенный метод достаточно эффективно устраняет искажения в виде случайного взаимного сдвига строк. Однако в то же время на восстановленных изображениях присутствуют различные артефакты, такие как: полный негатив абсолютно белого в локальных областях и некоторое искажение яркости изображения.

Таким образом, приведенные результаты моделирования свидетельствуют о достаточно высоких показателях эффективности для надежного распознавания априорно неизвестного объекта, маскированного случайным сдвигом строк (в зависимости от характера изображения). Однако следует отметить, что надежность распознавания объекта, маскированного аддитивным и импульсным шумом, снижается. Это объясняется малым объемом выборки обрабатываемых изображений. С ростом объема выборки точность биспектральной оценки улучшается, а значит, можно ожидать улучшения показателей качества системы восстановления изображений.

Заклучение

Проведены исследования методов реставрации цифровых изображений с использованием оценивания моментных функций третьего порядка и добавления аддитивных и мультипликативных предискажений строк. Предложенный подход позволяет избежать проблемы фазовой неоднозначности, и, следовательно, обеспечивает уменьшение фазовых искажений в восстановленном изображении. Результаты компьютерного моделирования восстановления изображений трех типовых тестовых изображений дают возможность выбрать оптимальные параметры аддитивной и мультипликативной функции предискажений с точки зрения максимального качества восстановленного изображения. Предложенные методы и алгоритмы восстановления изображений представляются перспективными для применения в

системах автоматического распознавания образов, функционирующих в условиях минимальных априорных сведений о свойствах распознаваемого объекта и характеристиках помех.

Литература

1. Nikias C.L., Raghuvеer M.R. Bispectral estimation: A digital signal processing framework // Proc. IEEE. – 1987. – Vol. 75, no. 7. – P. 869-891.
2. Важинский В.Н., Тетерин В.В. Корреляционная функция третьего порядка и биспектр в задачах обработки сигналов // ОМП. – 1991. – № 4. – С. 4-14.
3. Цифровая обработка сигналов и изображений / М.А. Басараб, В.К. Волосюк, О.В. Горячкин, А.А. Зеленский, В.Ф. Кравченко, А.В. Ксендзук, Б.Г. Кутуза, В.В. Лукин, А.В. Тоцкий, В.П. Яковлев. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – С. 92-173.
4. Sundaramoorthy G., Raghuvеer M.R., Dianat S.A. Bispectral reconstruction of signals in noise: Amplitude reconstruction issues // IEEE Transact. Acoustics, Speech, Signal Processing. – 1990. – Vol. 38, No. 7. – P. 1297-1306.
5. Diant S.A., Raghuvеer M.R. Fast algorithms for phase and magnitude reconstruction from bispectra // Optical Engineering. – 1990. – Vol. 29, No 5. – P. 504-512.
6. Тоцкий А.В. Метод восстановления изображений, искаженных случайным сдвигом строк и аддитивным гауссовым шумом // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2005. – № 1 (9). – С. 5-10.
7. Тоцкий А.В. Метод восстановления изображений с использованием предискажений строк и оценок их биспектральных плотностей // Радиотехника. – 2005. – Вып. 143. – С. 44-48.

Поступила в редакцию 25.02.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.