

УДК 621.391

П.Ю. Костенко, В.И. Васишлин, В.В. Слободянюк, А.В. Плахотенко

Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ШУМА НА ЦИФРОВОМ ИЗОБРАЖЕНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ СУРРОГАТНЫХ ДАННЫХ И ЕГО СИНГУЛЯРНОГО РАЗЛОЖЕНИЯ

В работе предложен нелинейный метод подавления аддитивного шума на цифровом изображении, основанный на его предварительной обработке с использованием технологии суррогатных данных и сингулярного разложения, позволяющий сохранять разрешающую способность при больших уровнях шума, чем при использовании линейной оконной фильтрации цифрового изображения. Представлены результаты имитационного моделирования предварительной обработки изображения, аппроксимированного с использованием его сингулярного разложения и ATS-алгоритма (attractor trajectory surrogates) формирования суррогатных изображений. Проведен сравнительный анализ разрешающей способности предложенного метода с методом линейной фильтрации изображений.

Ключевые слова: суррогатные изображения, ATS-алгоритм, сингулярное разложение изображения.

Введение

В ряде практических задач радиолокационные и оптические изображения служат источником информации, на основе которой принимается некоторое решение. Изображения в процессе их формирования зачастую подвергаются воздействию случайных помех или шумов. Поэтому актуальна задача разработки методов удаления шума на изображении, сохраняющих его информационные признаки.

Снижение уровня шумов (помех) и улучшение качества изображений является целью предварительной их обработки [1 – 4]. Обычно используют такие методы предварительной обработки изображений как линейное усреднение пикселей по соседям, медианную фильтрацию, гауссовское размытие, методы на основе вейвлет-преобразования, метод главных компонент, фильтр Винера и т.д. [1 – 4]. Вместе с тем, существенным недостатком рассмотренных выше методов обработки изображений при различных видах шумов является уменьшение разрешающей способности. Это обстоятельство стимулирует развитие новых подходов к задачам предварительной обработки цифровых изображений, которые способны сохранять эту важную характеристику метода обработки изображения.

В случае, когда число истинных наблюдений недостаточно – например, при наличии единственного снимка (изображения), перспективным направлением повышения эффективности обработки изображений являются компьютерно-ориентированные технологии получения псевдоансамбля наблюдений полученного из одной реализации (снимка). В работах по нетрадиционной статистике и нелинейной динамике этот подход к обработке данных объединен общим термином «численный ресамплинг»

(resampling) [5]. Развитием методов «численного ресамплинга» стала технология суррогатных данных (ТСД) [5]. Среди алгоритмов формирования суррогатных данных можно выделить такие группы: сохраняющие статистические свойства наблюдений (алгоритм со случайным перемешиванием входного массива данных (random shuffle algorithm), алгоритм с рандомизацией фаз отсчетов преобразования Фурье наблюдения) и сохраняющие свойства их аттракторов (ATS-алгоритм (attractor trajectory surrogates)) [5].

Некоторые приложения ТСД к задачам обработки сигналов и изображений были рассмотрены в работах [3, 5 – 11]. В работах [5 – 11] совместно с технологией суррогатных данных использовалось разложение корреляционной матрицы (КМ) наблюдения по собственным векторам (СВ) и собственным значениям (СЗ), широко применяемое для реализации так называемых собственноструктурных методов спектрального анализа и др. [10 – 14]. Эти методы позволяют осуществлять оценивание угловых координат источников излучения (частот гармонических компонент сигнала и т.д.) в режиме «сверхразрешения». С разложением КМ наблюдения по СЗ и СВ связано разложение по сингулярным значениям и векторам матрицы данных, которое находит применение в обработке сигналов и изображений [1, 4, 12 – 14]. Особенности его применения для матрицы данных, полученных плоской антенной решеткой, показаны в [13].

В [9] алгоритм с рандомизацией фаз отсчетов преобразования Фурье наблюдения применялся к сигнальным СВ КМ наблюдения. Применение ТСД позволило повысить точность оценивания частот компонент сигнала в условиях низких отношений сигнала к шуму (ОСШ) и малой выборки. Однако

после некоторого порогового ОСШ наблюдалось насыщение среднеквадратической ошибки оценивания частот. Такой эффект можно связать с наличием суррогатного шума [7 – 9]. Уменьшение влияния суррогатного шума с использованием адаптации формирования суррогатных данных к ОСШ рассмотрено в работах [9 – 11]. Однако реализация этого подхода предполагает знание (или оценивание) величины ОСШ.

В работе [3] предложен нелинейный метод подавления аддитивного шума на цифровых изображениях, основанный на использовании ТСД. Однако применение ТСД в этом случае также сопровождается суррогатным шумом.

Кроме того, применение известных методов связано с использованием окна (маски) сканирования, что обуславливает уменьшение разрешающей способности. Поэтому целесообразно снижать уровень шума на изображении с сохранением разрешающей способности. Также представляет интерес реализовать снижение шума с использованием разложения по сингулярным значениям и векторам матрицы изображения [1, 4].

Цель данной работы – демонстрация возможности метода предварительной обработки цифрового изображения сохранять его детальность с использованием технологии суррогатных данных, реализованной с помощью ATS алгоритма и сингулярного разложения матрицы изображения.

Фильтрация шума на изображении с использованием его сингулярного разложения и ATS-алгоритма

Статистическая модель обрабатываемого изображения и особенности ATS алгоритма формирования суррогатных данных рассмотрены в [3]. Кратко опишем представление растрового изображения (матрицы яркостей) с использованием сингулярного разложения.

Пусть исходное изображение представлено матрицей \mathbf{X} размером $N \times N$. Сингулярное разложение такой матрицы имеет вид [1, 12 – 14]:

$$\mathbf{X} = \sum_{i=1}^N \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T + \sum_{i=N_c+1}^N \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T, \quad (1)$$

где N_c – число сигнальных компонент обрабатываемого массива данных (изображения), σ_i – сингулярные числа, \mathbf{p}_i , \mathbf{q}_i – собственные вектора матриц $\mathbf{X}\mathbf{X}^T$ и $\mathbf{X}^T\mathbf{X}$, соответственно, символ $(\cdot)^T$ означает транспонирование. Часто для аппроксимации изображения без ущерба для восприятия исходного изображения в этом представлении достаточно учесть меньшее число слагаемых [1, 4]. В связи с этим можно записать приближенное равенство [1, 4]:

$$\mathbf{X} \approx \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T. \quad (2)$$

Для формирования суррогатных изображений в работе псевдослучайно формируются по шумовой составляющей разложения (1) $\mathbf{X}_{ш} = \sum_{i=N_c+1}^N \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T$.

Это позволит ослабить влияние суррогатного шума. Предлагаемый подход по формированию суррогатного изображения состоит из следующих шагов:

- 1) выполнить разложение (1);
- 2) применить ATS-алгоритм [3] формирования суррогатных данных к $\mathbf{X}_{ш} = \sum_{i=N_c+1}^N \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T$ и получить в результате $\mathbf{X}_{сур.ш}$;

3) сформировать суррогатное изображение $\mathbf{X}_{сур.}$ путем добавления к $\mathbf{X}_c = \sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i \mathbf{p}_i \mathbf{q}_i^T$ суррогатной компоненты шума $\mathbf{X}_{сур.ш}$;

- 4) выполнить линейную оконную фильтрацию.

Следует отметить, что ATS-алгоритм применяется к каждой строке $\mathbf{X}_{ш}$. Формируется N_s суррогатных строк для каждой строки $\mathbf{X}_{ш}$. (формируется N_s суррогатных изображений). Суррогатная компонента шума $\mathbf{X}_{сур.ш}$ получается в результате построчного усреднения по N_s суррогатным изображениям [3].

Исследование проведем на тестовом цифровом изображении размером $N \times N$, представляющем два разнесенных в пространстве объекта, имеющих гауссовское распределение интенсивности (яркости):

$$I_j(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (3)$$

где $j=1, 2$, с наложенным на него белым гауссовским шумом $\eta(x, y)$. Здесь (x_1, y_1) и (x_2, y_2) – координаты максимумов двух гауссиан. Таким образом, зарегистрированное тестовое изображение определяется как $I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + \eta(x, y)$. Будем полагать, что $y_1 = y_2$, σ известно, а координаты x, y принимают дискретные значения $x_k = k\Delta x$ по строкам и столбцам $y_n = n\Delta y$ с шагом дискретизации $\Delta x = 1$ и $\Delta y = 1$.

Матрица $\mathbf{X}_{сур.}$ преобразуется в одномерный массив данных (вектор) суммированием её строк $s = \sum_{x=1}^N I_{x,y}$. Разрешающую способность метода будем характеризовать вероятностью принятия правильного решения о присутствии в зарегистриро-

ванном тестовом изображении двух гауссиан. Для анализа разрешающей способности в качестве критерия разрешения источников используется критерий Релея, который реализуется поиском максимальных значений $\max s$ усредненной строки s (по числу N_c сигнальных пиков). Также вычисляется минимальное значение $\min s$ между пиками. В качестве критерия разрешения источников используется критерий Релея, который можно представить как $(\max s - \min s) \leq 0.26$ [1].

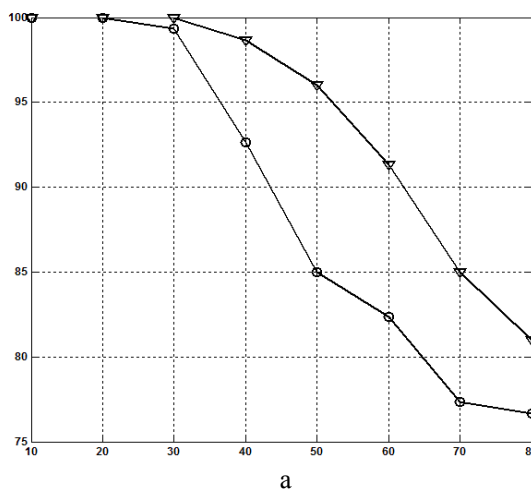
Сравнительный анализ предложенного метода подавления шума на изображении с линейной оконной фильтрацией

При моделировании выбирались такие значения параметров: размер тестового изображения 128×128 , $y_1 = y_2 = 64$, $x_1 = 50$, $x_2 = 75$, $N_s = 50$. Гауссовский шум моделировался выражением

$$\eta(x, y) = A + \sigma_{\text{ш}} \sqrt{-2 \ln(\text{rnd}(1))} \cos(2\pi \text{rnd}(1)),$$

где $\text{rnd}(1)$ возвращает случайное число с равномерным распределением в диапазоне между 0 и 1 с параметром $A = 0$, для разных значений среднеквадратического отклонения шума $\sigma_{\text{ш}}$.

Для реализации ATS алгоритма при обработке изображений использовались следующие значения основных параметров: размерность вложения $d_e = 3$, радиус гиперсферы ε определяется как среднеквадратическое отклонение расстояний между всеми точками образа строки изображения в фазовом пространстве.



Эмпирическая вероятность разрешения источников определялась статистическим моделированием (методом Монте-Карло) с использованием выражения $P_{\text{раз}} = L_{\text{раз}} / L$, где $L_{\text{раз}}$ – число испытаний, в котором критерий разрешения выполнялся, а L – общее число испытаний. Число испытаний равно 300.

Эффективность предложенного метода сравнивалась с эффективностью метода линейной оконной фильтрации, реализуемой с помощью встроенной функции Matlab *imfilter*. Размер окна выбирался равным 11×11 .

В качестве критерия эффективности сравниваемых методов рассматривалась разрешающая способность. Следует отметить, что оконная фильтрация также влияет на показатель PSNR (peak signal-to-noise ratio – пиковое соотношение сигнал/шум), которое определяется следующим выражением:

$$\text{PSNR} = 255 / \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}, \quad (4)$$

где x_i, y_i – i -е пиксели отфильтрованного изображения и изображения без шума, $N = N_1 N_2$ – общее число пикселей на каждом изображении, N_2 – число пикселей в столбце изображения.

На рис. 1 приведены зависимости вероятности разрешения $P_{\text{раз}}$ (в процентах) двух гауссиан (рис. 1, а) и PSNR (рис. 1, б) от $\sigma_{\text{ш}}$ для предложенного метода (расчетные значения отмечены символами “V”) и метода линейной оконной фильтрации (расчетные значения отмечены символами “o”).

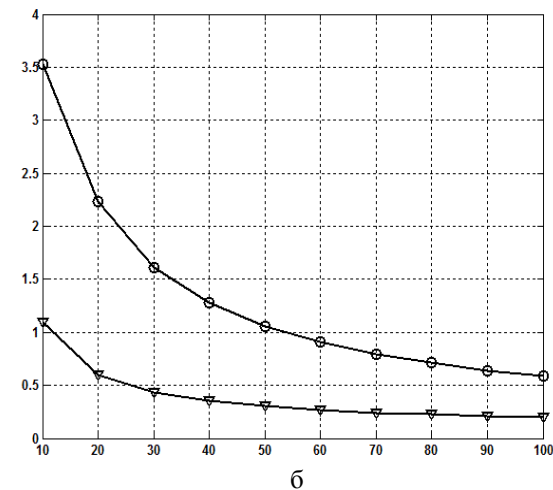


Рис. 1. Зависимости: а – $P_{\text{раз}}$ от $\sigma_{\text{ш}}$; б – PSNR от $\sigma_{\text{ш}}$

Из анализа рис. 1, а видно, что применение предложенного метода позволяет сохранить разрешающую способность при больших значениях шум/сигнал по сравнению с методом линейной фильтрации. Однако, пиковое отношение шум/сигнал, которое слабо корр-

лировано с визуальным качеством изображения, незначительно меньше. К примеру, более размытое изображение, в котором вместе с шумом удалены мелкие детали, может иметь значение PSNR выше, чем изображение с более аккуратно подавленным шумом.

Выводы

В работе предложен метод предварительной обработки изображений для уменьшения влияния аддитивного шума с использованием технологии суррогатных данных, реализованной с помощью ATS-алгоритма формирования суррогатных изображений и сингулярного разложения изображения. Результаты имитационного моделирования показывают, что предложенный метод демонстрирует большую эффективность, чем метод линейной оконной фильтрации изображений при равных значениях интенсивности шума.

Список литературы

1. Хуанг Т. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг. – М.: Мир, 1979. – 315 с.
2. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 352 с.
3. Костенко П.Ю. Уменьшение аддитивного шума на цифровых изображениях с использованием технологии суррогатных данных / П.Ю. Костенко, В.И. Василишин, В.В. Слободянюк // Системи обробки інформації. – X.: ХУ ПС, 2014. – Вып. 8(124). – С. 33-38.
4. Василишин В.И. Предварительная обработка сигналов с использованием метода SSA в задачах спектрального анализа / В.И. Василишин // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 43-50.
5. Small M. Applied Nonlinear Time Series Analysis Applications in Physics, Physiology and Finance / M. Small // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2005. – 245 p.
6. Непараметрический BDS-обнаружитель хаотических сигналов на фоне белого шума / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, С.Н. Симоненко, А.Н. Барсуков // Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, №1. – С. 23-31. – (Изв. Вузов).
7. Костенко П.Ю. Коррекция обработки сигналов при их спектральном анализе с использованием суррогатных автоковариационных функций наблюдения, полученных ATS-алгоритмом / П.Ю. Костенко, В.И. Василишин //

Радиоэлектроника. – 2014. – Том 57, №6. – С. 3-12. – (Изв. Вузов).

8. Костенко П.Ю. Повышение эффективности спектрального анализа сигналов методом Root-MUSIC с использованием суррогатных данных / П.Ю. Костенко, В.И. Василишин // Радиоэлектроника. – 2014. – Том 57, №1. – С. 31-39. – (Изв. Вузов).

9. Василишин В.И. Повышение эффективности спектрального анализа собственноструктурными методами с использованием технологии суррогатных данных для собственных векторов ковариационной матрицы наблюдения / В.И. Василишин // Радиотехника. Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник. – 2013. – Вып. 174. – С. 66-72.

10. Vasylyshyn V.I. Improving the performance of Root-MUSIC via pseudo-noise resampling and conventional beamformer / V.I. Vasylyshyn // Third Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium: int.conf., 2011, Kyiv (Ukraine): proc. of conf. – 2011. – P. 246-249.

11. Vasylyshyn V. Removing the outliers in root-MUSIC via pseudo-noise resampling and conventional beamformer / V. Vasylyshyn // Signal processing. – 2013. – Vol. 93. – P. 3423-3429.

12. Vasylyshyn V.I. High-resolution phased array signal processing via DFT Beamspace TLS-ESPRIT with structure weighting / V.I. Vasylyshyn // 2003 IEEE Phased Array Systems and Technology Symposium: int. conf., 2003, Boston, Massachusetts (USA): proc. of conf. – 2003. – P. 605-610.

13. Vasylyshyn V.I. 2-D DFT Beamspace TLS-ESPRIT algorithm with structure weighting for joint azimuth-elevation estimation weighting / V.I. Vasylyshyn // European Conference on Wireless Technology: int. conf., 2003, Munich (Germany): proc. of conf. – 2003. – P. 179-182.

14. Vasylyshyn V.I. Closed-form DOA estimation with multiscale unitary ESPRIT algorithm/ V.I. Vasylyshyn // European Radar Conference: int. conf., 2004, Amsterdam (Netherlands): proc. of conf. – 2004. – P. 101-104.

Поступила в редколлегию 17.01.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.И. Сухаревский, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

ЗМЕНШЕННЯ РІВНЯ ШУМУ НА ЦИФРОВОМУ ЗОБРАЖЕННІ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ СУРОГАТНИХ ДАНИХ ТА ЙОГО СИНГУЛЯРНОГО РОЗКЛАДЕННЯ

П.Ю. Костенко, В.І. Василишин, В.В. Слободянюк, О.В. Плахотенко

В роботі запропоновано нелінійний метод подавлення адитивного шуму на цифровому зображенні, оснований на його попередній обробці з використанням технології суррогатних даних та сингулярного розкладення зображення, що дозволяє зберегти роздільну здатність при більших рівнях шуму чим при використанні лінійної віконної фільтрації цифрового зображення. Представлені результати імітаційного моделювання попередньої обробки зображення апроксимованого з використанням сингулярного розкладення та ATS-алгоритму (attractor trajectory surrogates) формування суррогатних зображень. Проведено порівняльний аналіз роздільної здатності запропонованого методу з методом лінійної фільтрації зображень.

Ключові слова: сурогатні зображення, ATS- алгоритм, сингулярне розкладення зображення.

REDUCTION OF NOISE LEVEL ON DIGITAL IMAGE USING SURROGATE DATA TECHNOLOGY AND SINGULAR VALUE DECOMPOSITION

P.Yu. Kostenko, V.I. Vasylyshyn, V.V. Slobodyanyuk, A.V. Plakhotenko

The nonlinear method of suppression of an additive noise on digital image based on the preliminary image processing using the surrogate data technology and singular value decomposition is proposed in the paper. It allows to save the resolution capability in the case of higher noise level as compared to linear window filtering method. The simulation results of preliminary processing of the image approximated with using of the image singular value decomposition and ATS (attractor trajectory surrogates) algorithm of surrogate image generation are presented. The comparative analysis of the resolution capability of proposed method with the method of image median filtering is performed.

Keywords: surrogate images, ATS algorithm, image singular value decomposition.