

УДК 621.397:004.932

В.В. Слободянюк, А.В. Шаповалов

*Харьковский университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков*

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИДА РАЗВЕРТКИ ЗАШУМЛЕННОГО ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДА ПОДАВЛЕНИЯ ШУМА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ТЕХНОЛОГИЮ СУРРОГАТНЫХ ДАННЫХ**

*В статье проводится сравнение нескольких известных видов развертки цифрового изображения, которые используются при реализации метода подавления шума основанного на формировании псевдоансамбля изображений полученных по одной его экспозиции. Качество развертки определяется ее влиянием на разрешающую способность рассматриваемого метода подавления шума.*

**Ключевые слова:** суррогатные изображения, разрешающая способность, развертка.

### **Введение**

Известно, что визуальный шум может ухудшить степень детальности цифровых изображений, поэтому подавление шума может значительно улучшить качество изображения. Алгоритмы удаления шума в изображениях широко используются в различных задачах: корреляционно-экстремальной навигации, обработки цифровых изображений в системах дистанционного зондирования поверхности Земли, классификации изображений, распознавании образов, современной медицинской технике, и т. д.

В условиях, когда имеется единственная реализация изображения для подавления разнообразных видов шумов и помех на изображении обычно используют такие методы предварительной обработки изображений как, усреднение пикселей по соседям (оконная фильтрация), медианная фильтрация, математическая морфология, гауссовское размытие, методы на основе вейвлет-преобразования, метод главных компонент, анизотропная диффузия, фильтрация Винера [1-4] и другие.

Вместе с тем, существенным недостатком многих из указанных методов не зависимо от вида шумов является размытие деталей изображения, которое характеризует их разрешающую способность. В некоторых случаях, когда на изображении присутствуют достаточно большие однородные области например, вода или небо, сглаживание шума может быть приемлемо, однако мелкие детали изображения (дома, транспортные средства и др.) могут пострадать даже от наиболее осторожных попыток подавления шума.

Отмеченные недостатки известных методов уменьшения влияния шума на изображении стимулируют развитие новых подходов к задачам их предварительной обработки, способных сохранять эту важную характеристику метода обработки изображения.

Разрешающая способность занимает некое особое положение среди других критериев качества и является предметом углубленного исследования изображающих систем именно с этих позиций. Одна из основных причин отмеченного обстоятельства состоит в том, что существует несколько формальных описаний критерия разрешающей способности. В соответствии с вышеизложенным в дальнейшем будем использовать критерий разрешающей способности, учитывающий случайный характер полученного цифрового изображения известный как критерий разрешения – измерение [13].

Если на практике удастся получить большое число экспозиций объекта (изображений), то для решения задачи уменьшения шума на изображениях (шумоподавления) применяется усреднение по ансамблю изображений, которое способно подавить шумы, не разрушив его детальность, поскольку оно, по сути, увеличивает отношение сигнал-шум, определенное для одного снимка (экспозиции) объекта.

Усреднение изображений работает на основе предположения об абсолютно случайной природе шума в изображении. Соответственно, случайные отклонения от изображения полученного в отсутствии шума будут последовательно снижаться по мере усреднения возрастающего числа изображений. В общем случае уровень шума падает как квадратный корень от числа усредненных изображений.

Однако, нередко, на практике получить большое число изображений (снимков) не представляется возможным.

В условиях, когда имеется единственная реализация изображения, целесообразно использовать подход, позволяющий из единственного снимка формировать псевдоансамбль суррогатных изображений.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В статистическом и нелинейном анализе временных рядов способы формирования псевдоансамбля исходных данных, который можно исполь-

зовать для оценки некоторых характеристик временных рядов, получили название бутстреп-метода и технологии суррогатных данных соответственно. [5, 12].

Эти способы, предполагают интенсивное использование компьютерных средств (computer-intensive) и объединены общим термином “численный ресамплинг” (resampling).

Применение технологии суррогатных данных к задачам спектрального анализа и обработки изображений для уменьшения влияния шума в наблюдении рассматривалось в работах [6-8]. Для формирования псевдоансамбля из наблюдения использовались два алгоритма: сохраняющий статистические свойства наблюдений и сохраняющий свойства аттрактора наблюдения. Для формирования ансамбля “псевдо-выборок” с целью подавления шума на изображении использовался ATS-алгоритм (attractor trajectory surrogates) [6].

ATS-алгоритм формирования суррогатных данных предполагает погружение скалярного (временного) ряда в фазовое пространство. Этот подход может быть применен к формированию суррогатных изображений после применения известных методов развертки – преобразования изображения в скалярные значения некоторых функционалов, определенных на нем [1]. Упорядоченные таким образом функционалы это привычные скалярные “временные” ряды, к которым применимы хорошо развитые методы вложения, основанные на использовании теоремы Такенса [5].

Таким образом, важный этап реализации ATS-алгоритма применительно к решению задачи подавления шума на изображении предполагает развертку (преобразование) растрового изображения в вектор значений его интенсивности с последующим погружением в псевдофазовое пространство. В настоящее время на практике широко применяются телевизионные методы развертки позволяющие преобразовывать растровые цифровые изображения в вектор данных. Однако известно [11], что не все методы развертки одинаково эффективны, в случаях, когда важно сохранить характерные особенности изображений: двумерный характер статистических связей, наличие однородных областей, контуров и т.п. Учет указанной специфики позволяет повысить качество обработки, но приводит к усложнению соответствующих алгоритмов.

К разверткам предъявляются два важных требования – сохранение взаимной топологической близости элементов исходного и развернутого пространств, свойство квазинепрерывности и сохранение корреляционных связей между элементами в том и другом пространствах. Для анализа топологической близости было предложено использовать окрестностный индекс развертки (ОИП) [9] и BDS-

статистику [10]. Указанным свойствам удовлетворяют квазинепрерывные рекурсивные развертки. В частности, рекурсивные развертки Гильберта-Пeano (РГП), обладающие рядом полезных свойств. Двухмерность статистических связей элементов изображения для разных видов развертки также может проявляться в изменении интервала корреляции элементов развернутого изображения. Выбор вида развертки позволяет обеспечить компромисс между эффективностью сохранения близости элементов исходного и развернутого пространств, простотой алгоритма развертки и как следствие эффективностью формирования суррогатных изображений полученных погружением одномерных данных в псевдофазовое пространство.

Таким образом, возникает задача выбора вида развертки двумерного массива в одномерный: задания порядка на множестве элементов одномерного массива данных.

Влияние вида развертки для выделения фрактальных признаков представленных значениями BDS-статистик исследовалось в работе [10] где было показано, что степень сохранения окрестностей элементов массива по мере усложнения развертки не гарантирует лучшее выделение фрактальных признаков на изображении. Все рассмотренные виды разверток с разбросом ОИП от единицы до четырех, в отсутствие шума, дают надежные результаты локализации искусственных объектов на изображении по вычисленному полю BDS-статистик.

**Формулировка цели статьи.** Целью данной работы является исследование влияния вида развертки на такой важный показатель качества изображения, как его детальность при наличии шума, возникающего в процессе формирования изображения. Ниже рассмотрим сформулированную задачу на примере анализа разрешающей способности метода подавления шума на изображении, с использованием технологии суррогатных данных (формирования псевдоансамбля изображений и их усреднение) [6]. Этот мало известный метод представляется перспективным так как способен в большей степени чем известные линейные методы фильтрации шума на изображении сохранять разрешающую способность. Опишем один вариант реализации этого метода подавления шума на изображении, использующий псевдоансамбль изображений, полученных с помощью ATS-алгоритма из исходного снимка.

### **Формирование псевдоансамбля изображений с применением ATS-алгоритма**

Для применения ATS-алгоритма формирования суррогатных данных развертка изображения (вектор данных) должна быть погружена в псевдофазовое пространство.

Для простоты изложения будем полагать, что размер изображения  $N \times N$ , где  $N$  – количество пикселей строки изображения,  $d$  – размерность псевдофазового пространства, в которое осуществляется вложение изображения [12]. Тогда ATS-алгоритм формирования суррогатных данных (изображений) будет состоять из следующих шагов:

1. Вектор  $\mathbf{z} = (I_n, I_{n+1}, I_{n+2}, \dots, I_{N^2})$ , полученный с использованием выбранного метода развертки цифрового растрового изображения с элементами  $\{I(k, n)\}_{k=1, n=1}^N$ , и выполняем его вложение в псевдофазовое пространство размерности  $d$ , элементами которого будут вектора вида:

$$\mathbf{y}_1 = (I_1, I_2, \dots, I_d),$$

$$\mathbf{y}_2 = (I_2, I_3, \dots, I_{d+1}),$$

$$\mathbf{y}_{N^2-d} = (I_{N^2-d}, I_{N^2-d+1}, \dots, I_{N^2}).$$

2. Выбираем начальное состояние

$$\mathbf{s}_1 \in \{\mathbf{y}_n \mid n = 1, \dots, N^2 - d\}.$$

3. Устанавливаем значение счетчика  $i = 0$ .

4. Выбираем случайным образом точку  $\mathbf{s}_i$  из множества  $\{\mathbf{y}_n\}_{n=1}^{N^2-d}$ , которая попадает в окрестность (гиперсферу) радиуса  $\varepsilon$  точки, например точки  $\mathbf{y}_j$ .

5. Установим  $\mathbf{s}_{i+1} = \mathbf{y}_{j+1}$  и увеличим  $i$  на единицу.

6. Повторяем шаги 4-5 до тех пор, пока не выполнится условие  $i = N^2 - d$ .

7. Возвращаем значения  $m$ -ых компонент векторов  $\{\mathbf{s}_n\}_m : n = 1, 2, \dots, N^2 - d$ , которые представляют элементы одной суррогатной реализации ряда данных

$$\mathbf{s}_{\text{sur}} = \{\mathbf{s}_{\text{sur}, i}\}_{i=1}^{N^2-d}.$$

Для моделирования этого алгоритма обработки изображений выбирались следующие значения ос-

новных параметров:  $m = 1$ , размерность вложения  $d = 3$ , радиус гиперсферы  $\varepsilon$  определялся, как математическое ожидание всех расстояний между точкой  $\mathbf{y}_j$  и оставшимися точками в псевдофазовом пространстве.

С целью уменьшения влияния шума сформируем ансамбль  $\{\mathbf{s}_{\text{sur}, n}\}_{n=1}^{N_s}$  из суррогатных реализаций и определим его математическое ожидание:

$$\langle \mathbf{s}_{\text{sur}} \rangle = \frac{1}{N_s} \sum_{n=1}^{N_s} \mathbf{s}_{\text{sur}, n}.$$

Данная процедура повторяется для каждого вида развертки. Затем вектору  $\langle \mathbf{s}_{\text{sur}} \rangle$  ставится в соответствие суррогатное изображение и описанным ниже методом определяется разрешающая способность используемого алгоритма подавления шума на изображении.

Исследование разрешающей способности проведем для линейных и рекурсивной развертки изображений:

1. Простейшие линейные развертки. Упорядочение элементов двумерного массива в этом случае производится построчно (рис. 1, а), к этому же типу можно отнести и спиральную (рис. 1, б), осуществляющую упорядочение по последовательно убывающим и чередующимся строкам и столбцам.

2. Рекурсивные развертки. Строятся последовательным приближением к некоторой заполняющей пространство кривой [9]. Степень приближения регулируется целым числом  $m > 0$ . Для построения  $m$ -го приближения заполняющей пространство кривой используется её  $(m - 1)$ -е приближение. В качестве начального приближения используется так называемая порождающая ячейка.

В первом случае упорядочивание элементов изображения осуществляется по строкам (столбцам) (рис. 1, а) или по спирали начиная с центрального элемента (рис. 1, б).

Во втором случае, в качестве рекурсивной развертки была применена развертка Гильберта (рис. 1, в).

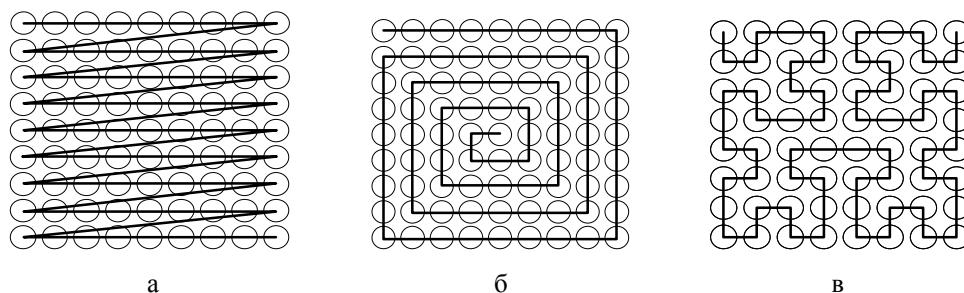


Рис. 1. Основные типы разверток

Тестовое цифровое изображение размером  $N \times N$  (рис. 2, а) представим двумя объектами раз-

несенными в пространстве, имеющими гауссовское распределение интенсивности (яркости):

$$I_1(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2}{2\sigma^2}},$$

$$I_2(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2}{2\sigma^2}}.$$

где  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$  - координаты максимумов двух гауссиан;  $\sigma$  - параметр характеризующий ширину гауссиана.

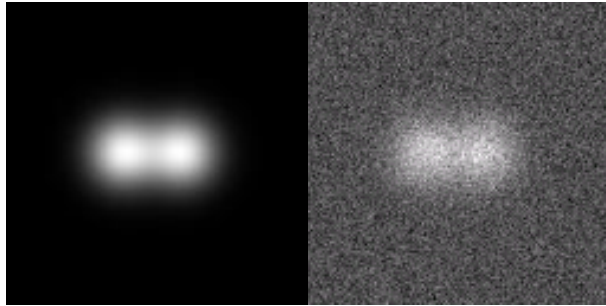


Рис. 2. Тестовое изображение (а) с наложенным на него белым гауссовским шумом  $\eta(x, y)$  (б)

Модель аддитивного шума хорошо описывает действие зернистости фотопленки, флуктуационный шум в радиотехнических системах, шум квантования в аналого-цифровых преобразователях и т.п. Цифровое тестовое восьмибитовое изображение, искаженное аддитивным белым гауссовским шумом с нулевым математическим ожиданием при отношении шум/сигнал равным 0,1 показано на рис. 2, б.

### Оценка разрешающей способности по псевдоансамблю изображения искаженного шумом

Будем полагать, что  $\sigma$  известно, максимумы гауссиан находятся на одной линии например, на оси  $x$ , т.е.  $y_1 = y_2$ , а координаты  $x$ ,  $y$  принимают дискретные значения  $x_k = k \cdot \Delta x$  по строкам и столбцам  $y_n = n \cdot \Delta y$  с шагом дискретизации  $\Delta x = \Delta y = 1$ .

Переходя к модели цифрового изображения, указанную выше формулу запишем в виде:

$$f(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \cdot e^{-\frac{(i-y_1)^2}{2\sigma^2}} \cdot \left[ e^{-\frac{(j-x_1)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(j-x_2)^2}{2\sigma^2}} \right].$$

Разрешающую способность метода будем характеризовать вероятностью принятия правильного решения о присутствии в тестовом изображении

$$I(k, n) = I_1(k, n) + I_2(k, n) + \eta(k, n)$$

двух гауссиан по результатам оценок  $\hat{x}_1$  и  $\hat{x}_2$  координат максимумов функции полученной суммирова-

нием всех строк тестового цифрового изображения

$$s_k = \sum_{n=1}^N I_{n,k}^T,$$

где  $T$  – оператор транспонирования, которое в отсутствии шума имеет вид суммы двух гауссиан:

$$h_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \left[ e^{-\frac{(j-l_1)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(j-d_1)^2}{2\sigma^2}} \right],$$

где  $l_1$  и  $d_1$  – истинные координаты максимумов первой и второй гауссианы, принимающие целочисленные значения.

Оценки целочисленных значений координат максимумов находятся методом наименьших квадратов реализуемого минимизацией функции следующего вида:

$$\min_{d,l} \sum_{j=1}^N \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \cdot \left[ e^{-\frac{(j-l)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(j-d)^2}{2\sigma^2}} \right] \cdot \frac{s_j}{\max\left(\{s_j\}_{j=1}^N\right)} \cdot \frac{1}{\max\left(\{h_j\}_{j=1}^N\right)}$$

Полученные оценки проверяются на выполнение следующего условия:

$$|x_1 - \hat{x}_1| + |x_2 - \hat{x}_2| \leq |x_1 - x_2|.$$

Результате моделирования влияния вида развертки на разрешающую способность выбранного алгоритма подавления шума представлены на рис. 3.

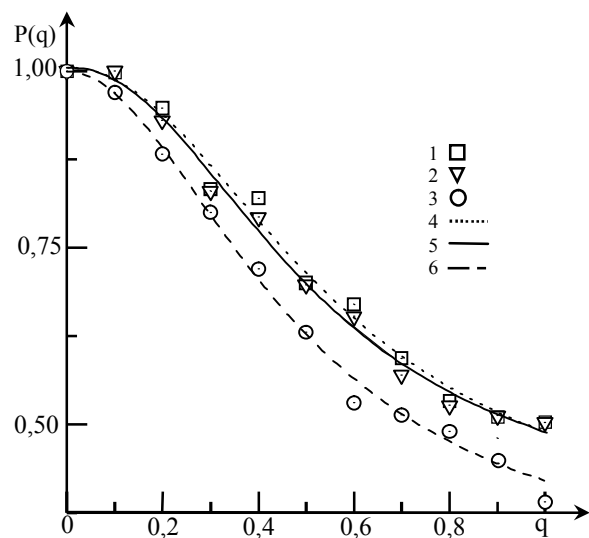


Рис. 3. Зависимость вероятности разрешения на изображении двух гауссиан от отношения шум/сигнал для трех видов развертки

На рис. 3 введені наступні позначення:  $q = \sigma_n / 255$  – відношення шум/сигнал;  $P(q)$  – ймовірність розрешення двох гаусіан; розрахункові значення ймовірності розрешення позначені точками з номерами 1, 2, 3; криві з номерами 4, 5, 6 представляють апроксимації розрахункових значень  $P(q)$  для телевізійної розвертки – “1”, рекурсивної розвертки Гільберта – “2” і спіральної розвертки – “3” відповідно.

## Выводы

В роботі проведено аналіз впливу виду розвертки зашумленого цифрового зображення на ефективність методу подавлення шуму, використовуючого технологію суррогатних даних. Результати імітаційного моделювання показують, що телевізійна розвертка, і розвертка Гільберта оказують приблизно однакове вплив на розрешаючу здатність використовуваного методу подавлення шуму. Однак, в практичних застосуваннях, можна віддати перевагу телевізійній розвертці, так як вона простіше реалізується.

Використання спіральної розвертки не цілком ефективно, так як вона поступає телевізійній розвертці і розвертці Гільберта по розрешаючій здатності розглянутого методу подавлення шуму. В той же час, для подальшого дослідження представляє інтерес аналіз впливу виду розвертки на візуальне сприйняття об'єктів на реальних зображеннях.

## Список литературы

1. Хуанг Т. Обработка изображений и цифровая фильтрация / Т. Хуанг. – М.: Мир, 1979. – 315 с.
2. Фисенко В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.
3. Грузман И.С. Цифровая обработка изображений в информационных системах / И.С. Грузман, В.С. Киричук. – Новосибирск: НГТУ, 2002. – 352 с.

4. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т.С. Хуанг и др. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.

5. Kantz H. Nonlinear time series analysis / H. Kantz, T. Schreiber // University Press, Cambridge. – 2004. – 369 p.

6. Костенко П.Ю. Уменьшение аддитивного шума на цифровых изображениях с использованием технологии суррогатных данных / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин, В.В. Слободянюк // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2014. – Вып. 8 (124). – С. 33-38.

7. Костенко П.Ю. Использование суррогатных сигналов для повышения качества оценки параметров регулярных и хаотических сигналов, наблюдаемых на фоне аддитивного шума / П.Ю. Костенко, К.С. Васюта, В.В. Слободянюк, Д.С. Яковенко // Системи управління, навігації та зв'язку. – К., 2010. – Вып. 4 (16). – С. 28-32.

8. Костенко П.Ю. Коррекция обработки сигналов при их спектральном анализе с использованием суррогатных автоковариационных функций наблюдения, полученных АТС-алгоритмом / П.Ю. Костенко, В.И. Василюшин // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2014. – Т. 57. – № 6. – С. 3-12. – ISSN 0021-3470.

9. Александров Р.В. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход / Р.В. Александров, И.Д. Горский. – Л.: Наука, 1985. – 102 с.

10. Шаповалов А.В. Выбор метода развертки цифровых изображений при анализе их фрактальных признаков в фазовом пространстве с использованием BDS-теста / А.В. Шаповалов // Системи управління, навігації та зв'язку. – К., 2012. – Вып. 3 (23). – С. 116-121. – ISSN 2073-7394.

11. Sagan H. Space-Filling Curves / H. Sagan. – New York: Springer-Verlag. – 1994. – 208 p. – ISBN 0-387-94265-3.

12. Small M. Applied Nonlinear Time Series Analysis Applications in Physics, Physiology and Finance / M. Small // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2005. – 245 p.

13. Шурман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов / Я.Д. Шурман – М.: Сов. радио. – 1974. – 360 с.

Поступила в редколлегию 11. 02.2015

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. П.Ю. Костенко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВИДУ РОЗГОРТКИ ЗАШУМЛЕННОГО ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ МЕТОДУ ЗМЕНШЕННЯ ШУМУ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ СУРОГАТНИХ ДАНИХ

В.В. Слободянюк, О.В. Шаповалов

У статті проводиться порівняння декількох відомих видів розгортки цифрового зображення, які використовуються при реалізації методу зменшення шуму заснованого на формуванні псевдоансамбля зображень отриманих по одній його експозиції. Якість розгортки визначається її впливом на роздільну здатність розглянутого методу зменшення шуму.

**Ключові слова:** сурогатні зображення, роздільна здатність, розгортка.

## THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE KIND OF SCANNING DIGITAL IMAGE ON EFFICIENCY OF THE SUPPRESSION NOISE METHOD USING SURROGATE DATA TECHNOLOGY

V.V. Slobodyanuk, O.V. Shapovalov

In article compares several known kinds of scanning the digital image used at the realisation of reduction noise method, which is based on the formation of the pseudo ensemble of the images received from its one exposition. The quality of the image scanning is determined by its impact on the image resolution with the reduction noise method which is being considered.

**Keywords:** surrogate images, resolution, image scanning.