

# Обробка інформації в складних технічних системах

УДК 621.391

В.В. Абрамова<sup>1</sup>, В.В. Лукин<sup>1</sup>, С.К. Абрамов<sup>1</sup>, К.Д. Абрамов<sup>1</sup>, Е.О. Колганова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

<sup>2</sup> *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*

## ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНИВАНИЯ ДИСПЕРСИИ ПРОСТРАНСТВЕННО-КОРРЕЛИРОВАННОГО ШУМА В СПЕКТРАЛЬНОЙ ОБЛАСТИ И ОДИН ИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПУТЕЙ ИХ РЕШЕНИЯ

*Рассмотрены проблемы, возникающие при оценивании дисперсии пространственно-коррелированного шума в спектральной области. Исследована возможность повышения точности оценивания дисперсии пространственно-коррелированного шума в спектральной области за счет прореживания исходного зашумленного изображения. Проведен сравнительный анализ точности оценивания дисперсии при обработке исходных и прореженных тестовых изображений, искаженных пространственно-коррелированным шумом, для наилучших методов, работающих в спектральной области. Приведены результаты численного моделирования для тестовых изображений из базы TID2008.*

**Ключевые слова:** аддитивный шум, автоматическая оценка дисперсии, пространственно-коррелированные помехи.

### Введение

В современном мире изображения являются одной из наиболее удобных и популярных форм передачи и представления информации. Они формируются и используются как в системах дистанционного зондирования (ДЗ) и мониторинга земной поверхности, в системах слежения, в медицинских диагностических системах и т.п., так и в обычных бытовых фотоаппаратах. Однако независимо от системы формирования на первичных изображениях неизбежно присутствуют различные помехи и искажения [1 – 3], которые не только снижают визуальное качество полученных изображений, но и усложняют процесс извлечения полезной информации. Для устранения помех на изображениях применяется фильтрация [2, 3]. Однако эффективные методы фильтрации требуют знания характеристик помех, присутствующих на изображении, в частности, их дисперсии [4].

Фильтрация является не единственным приложением, для которого требуется информация о характеристиках помех. Оценки дисперсии искажающих помех используются для выбора оптимальной рабочей точки некоторых методов сжатия, а также для расчета порога в задачах обнаружения границ и объектов, распознавания и классификации [5].

Тем не менее, даже в случае, когда характеристики системы формирования изображений (СФИ) известны, на практике практически невозможно заранее получить достаточно точное представление о величине дисперсии помех на полученных изображениях. Это связано с тем, что, кроме внутренних

по отношению к самой СФИ факторов, на величину дисперсии оказывают влияние и внешние факторы (параметры освещенности, среды распространения и т.п.). Следовательно, даже при работе с известными системами априорная информация о дисперсии помех на полученных изображениях зачастую отсутствует. В связи с этим необходимо проводить оценивание характеристик помех непосредственно по обрабатываемым изображениям, причем ввиду большого объема поступающих данных часто желательно осуществлять это вслепую, то есть при помощи автоматических методов, обладающих достаточно высоким быстродействием [3].

Оценивание дисперсии аддитивного шума возможно в спектральной и пространственной областях [6]. Отличительной особенностью методов, работающих в спектральной области, является то, что в случае, если шум является пространственно-некоррелированным, они обеспечивают более высокую точность при работе с высокотекстурными изображениями по сравнению с методами, работающими в пространственной области. Тем не менее, если шум является пространственно-коррелированным, то точность таких методов существенно снижается [7].

Таким образом, возникает следующая дилемма. Поскольку изображения, формируемые реальными системами, зачастую имеют достаточно сложную структуру, то для оценивания дисперсии помех предпочтительнее использовать методы, работающие в спектральной области. В то же время в силу влияния ряда факторов (влияние аппаратной функ-

ции СФИ, непределенная дискретизация данных, использование интерполяции при формировании изображения и т.п.) шум на таких изображениях, как правило, является в той или иной степени пространственно-коррелированным [7, 8, 9]. Для большинства систем ширина главного лепестка автокорреляционной функции (АКФ) шума не превышает 2...3 отсчетов, боковые лепестки при этом, как правило, практически отсутствуют. Тем не менее даже при такой форме АКФ неравномерность распределения энергии по спектральным компонентам проявляется достаточно отчетливо [8], в связи с чем возникает необходимость адаптации методов, работающих в спектральной области для случая пространственно-коррелированного шума.

Дополнительная сложность состоит в том, что на практике информация о виде и свойствах АКФ шума является весьма ограниченной и зачастую требуется оценивание характеристик АКФ шума непосредственно по обрабатываемому изображению, что само по себе является достаточно сложной задачей [6, 8].

### Постановка задачи исследования

Большинство методов оценивания дисперсии разработано в предположении, что шум на изображении является аддитивным. В принципе, для некоторых СФИ аддитивный шум действительно является преобладающим. Более того, в результате применения гомоморфных преобразований даже некоторые виды сигнално-зависимого шума (мультипликативный, пуассоновский, смесь пуассоновского и аддитивного) могут быть преобразованы в шум аддитивный [10]. Поэтому в данной работе будет рассмотрен случай аддитивного шума.

В основе большинства методов, работающих в спектральной области, лежит идея о том, что после применения декоррелирующего преобразования энергия, соответствующая информационной составляющей изображения, концентрируется в относительно небольшом числе низкочастотных спектральных компонент, в то время как энергия, соответствующая шуму, равномерно распределяется по всем спектральным компонентам. Таким образом, величина энергии, сосредоточенной в высокочастотных спектральных компонентах, определяется, главным образом, характеристиками шума, присутствующего на данном изображении.

Следовательно, обработав тем или иным образом высокочастотные спектральные коэффициенты, можно получить информацию о характеристиках (дисперсии) помех на данном изображении. В качестве декоррелирующих могут применяться различные ортогональные преобразования, например, дискретное косинусное (ДКП) [11, 12, 13] или вейвлет-преобразования (ВП) [14].

На рис. 1, а приведена АКФ пространственно-некоррелированного шума с нулевым средним и дисперсией 100. На рис. 1, б приведен усредненный ДКП-спектр этого шума, полученный в блоках  $8 \times 8$  пикселей. Как видим, ширина главного лепестка АКФ не превышает одного отсчета, и энергия приблизительно одинаково распределена по всем спектральным компонентам.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда шум является пространственно-коррелированным. На рис. 1, в и к приведены АКФ смоделированных «сильно» и «слабо» коррелированных шумов [15] с нулевым средним и дисперсией 100 соответственно. На рис. 1, е и н показаны ДКП-спектры для этих ситуаций, полученные в блоках  $8 \times 8$  пикселей. Как видим, в обоих случаях энергия распределена по спектральным компонентам неравномерно и сосредоточена, главным образом, в низкочастотной части спектра. Следовательно, если шум является пространственно-коррелированным, нарушается основная идея, положенная в основу методов, работающих в спектральной области, и в результате анализа высокочастотных спектральных коэффициентов полученные оценки дисперсии оказываются, как правило, существенно заниженными по сравнению со своими истинными значениями.

Как видим (см. рис. 1, в и к), ширина главного лепестка АКФ пространственно-коррелированного шума не превышает 2...3 отсчетов в обоих направлениях, причем это справедливо для шума как с сильной, так и со слабой корреляцией. Это позволяет предположить, что если проредить исходное изображение в некоторое число раз в обоих направлениях, то возможно существенно уменьшить или даже практически полностью устранить пространственную коррелированность шума.

АКФ пространственно-коррелированного шума с сильной корреляцией после прореживания исходного двумерного массива в 2 и 3 раза в обоих направлениях приведены на рис. 1, г и д. Соответствующие спектры приведены на рис. 1, ж и з. Как видим, после двукратного прореживания ширина главного лепестка АКФ уменьшилась до двух отсчетов, а основная энергия спектральных компонент распределилась между областями нижних и средних частот. Следовательно, степень коррелированности шума несколько уменьшилась, но осталась достаточно существенной. После трехкратного прореживания ширина главного лепестка АКФ составляет один отсчет и энергия распределена достаточно равномерно по всем спектральным компонентам, как и в случае, когда шум является пространственно-некоррелированным (сравните графики на рис. 1, а и д и на рис. 1, б и з).

Аналогичная ситуация наблюдается и для шума со слабой корреляцией (АКФ приведены на рис. 1, л

и м, спектры показаны на рис. 1,о и п). Следовательно, в результате прореживания исходного массива в 3 раза пространственная коррелированность шума для рассматриваемых моделей коррелированных помех может быть устранена практически полностью, в результате чего представляется возможным применение для оценивания его дисперсии методов, работающих в спектральной области.

Данная статья посвящена исследованию возможности повышения точности оценивания дисперсии пространственно-коррелированных помех в спектральной области за счет прореживания исходного изображения, а также сравнительному анализу точностных характеристик различных автоматических методов оценивания дисперсии аддитивных помех, работающих в спектральной области.

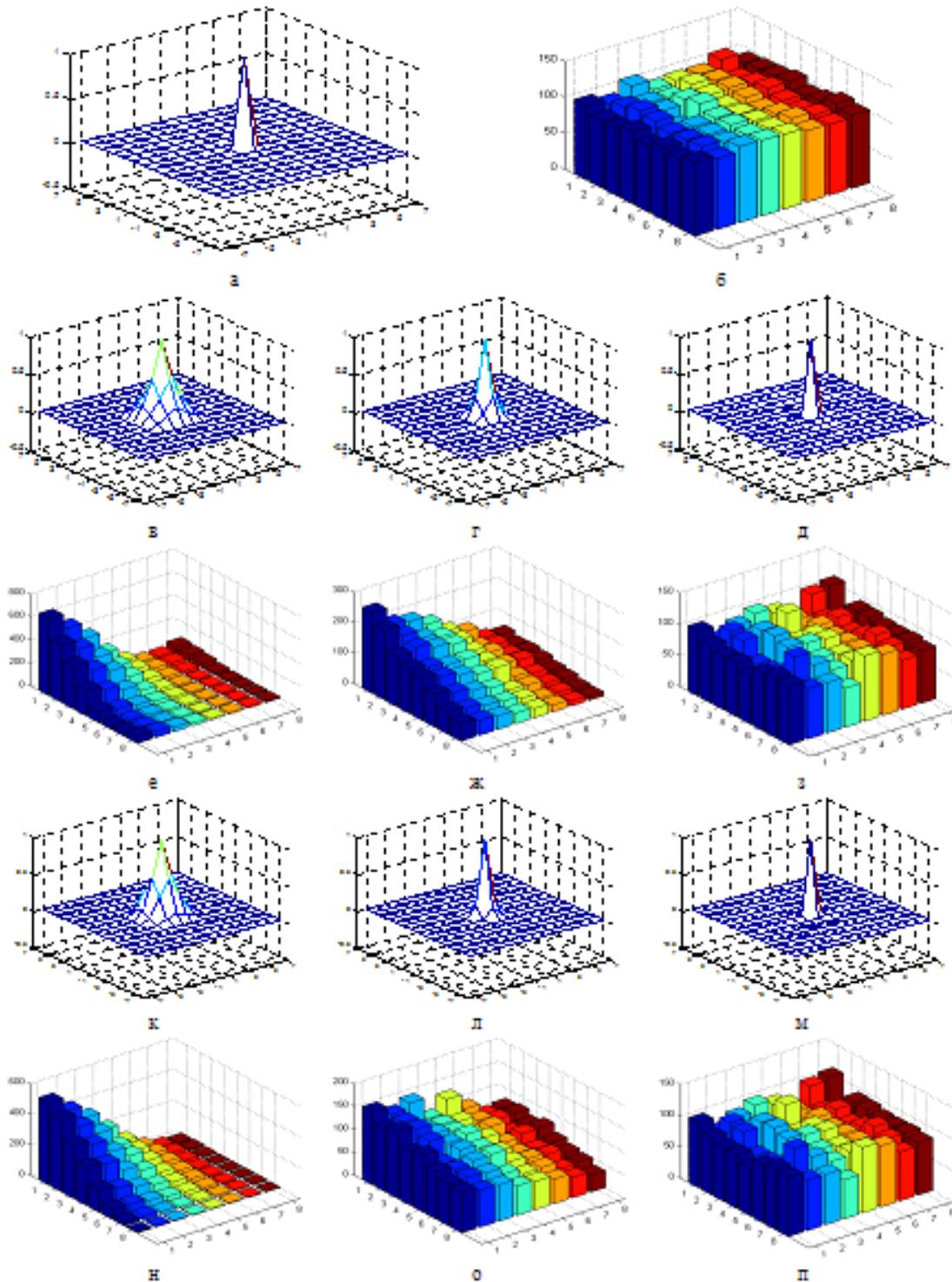


Рис. 1. Автокорреляционные функции (а, в – д, н – п) и спектры шума (б, е – з, к – м) на исходном изображении (а, б, в, е, к, н) и после прореживания изображения в 2 (г, ж, л, о) и 3 (д, з, м, п) раза: пространственно-некоррелированный шум (а, б), пространственно-коррелированный шум с «сильной» корреляцией (в, е) и пространственно-коррелированный шум со «слабой» корреляцией (к – п)

### Сравнительный анализ точности методов оценивания дисперсии аддитивных помех для случая пространственно-коррелированного шума

Для проведения сравнительного анализа было выбрано несколько методов [11 – 14], работающих в спектральной области, относящихся к числу наилучших среди разработанных на данный момент.

В соответствии с методом [11] анализируются характеристики распределений ДКП коэффициентов для 63 различных пространственных частот (ДКП-спектр получен в блоках  $8 \times 8$ , коэффициенты с индексами  $(0,0)$  при анализе не учитываются). В качестве оценки среднеквадратического отклонения (СКО) шума принимается медиана абсолютных медианных отклонений (АМО) ДКП коэффициентов для тех пространственных частот, для которых закон распределения близок к гауссову.

Для метода [12] в качестве оценки СКО шума принимается среднее 16-ти наименьших АМО-оценок, полученных для 63 пространственных частот ДКП-спектра изображения (как и для метода [11], ДКП-спектр получен в блоках  $8 \times 8$ , коэффициенты с индексами  $(0,0)$  не рассматриваются).

Метод [13] также работает в ДКП области. В качестве итоговой оценки дисперсии для этого метода принимается аргумент минимума двумерной функции эксцесса и дисперсии, полученных для 63 различных пространственных частот ДКП-спектра.

В отличие от предыдущих, метод [14] работает в вейвлет-области. При получении результирующей оценки дисперсии шума используется медиана амплитуд некоторого количества высокочастотных вейвлет-коэффициентов, деленная на корректирующий коэффициент.

Для проведения сравнительного анализа были использованы цветные изображения из базы TID2008 [16], искаженные аддитивным шумом с дисперсией 65 и «сильной» корреляцией.

Оценки дисперсии, полученные с использованием вышеописанных методов, приведены на рис. 2. По горизонтальной оси отложены индексы (номера) изображений в базе TID2008. Сплошная прямая без маркеров соответствует истинному значению дисперсии шума на обрабатываемых изображениях. Результаты для рассматриваемых методов представлены в виде кривых с маркерами различной формы: круглые маркеры соответствуют методу [11], квадратные – методу [12], треугольные – методу [13], ромбовидные – методу [14]. Все данные представлены для красной компоненты цветных изображений. Для других компонент зависимости аналогичны.

Как было показано в [17], для большинства практических приложений достаточно обеспечить точность оценивания дисперсии в пределах 20 % от

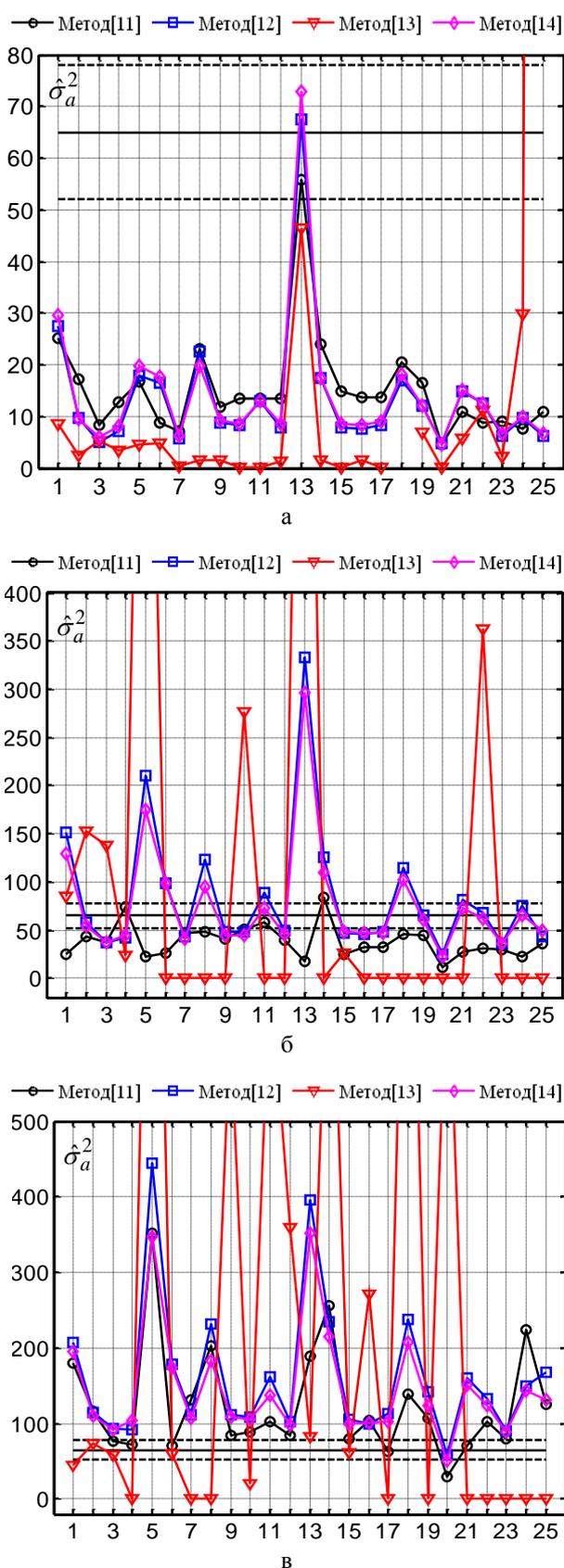


Рис. 2. Сравнительный анализ результатов оценивания дисперсии коррелированного шума ( $\sigma_a^2 = 65$ ) на изображениях из базы TID2008 (красная компонента): а – исходные изображения, б, в – изображения, прореженные в 2 и 3 раза соответственно

ее истинного значения. При истинном значении дисперсии 65 приемлемыми являются оценки дисперсии, попадающие в пределы от 52 до 78. Границы этого диапазона на рис. 2 показаны штриховыми линиями.

На рис. 2, а приведены оценки дисперсии, полученные по исходным (непрореженным) тестовым изображениям. Как видим, в этом случае для всех рассматриваемых методов были получены оценки дисперсии, которые для подавляющего большинства тестовых изображений существенно занижены по сравнению с истинным значением (65). Причины этого были рассмотрены ранее. Следует также отметить, что кривые для методов [12] и [14] практически совпадают.

Результаты, полученные по изображениям, прореженным в 2 раза в обоих направлениях, приведены на рис. 2, б. Метод [13] по-прежнему остается неработоспособным: большая часть оценок дисперсии близка к нулю, остальные оценки превышают истинное значение дисперсии в несколько (иногда в десятки) раз.

Методы [12] и [14] обеспечивают приемлемые значения оценок лишь для 6 из 25 тестовых изображений (№ 2, 11, 19, 21, 22, 24). Для высокотекстурных изображений (№ 1, 5, 8, 13, 14, 18) оценки дисперсии являются существенно завышенными. Для остальных изображений полученные оценки дисперсии занижены. Что касается метода [11], то для него практически все оценки дисперсии остаются заниженными, хотя и существенно ближе к истинному значению дисперсии по сравнению со случаем, когда оценивание производится по исходным (непрореженным) изображениям.

Итак, при оценивании дисперсии коррелированного шума по изображениям, прореженным в 2 раза, наблюдается два противоположных эффекта. С одной стороны, в силу того, что прореживание в 2 раза в данном случае не позволяет полностью устранить пространственную коррелированность шума, большая часть оценок дисперсии остаются заниженными. С другой стороны, появляются оценки, которые существенно выше истинного значения дисперсии. Как правило, это оценки дисперсии, полученные для высокотекстурных изображений. Связано это с тем, что в результате прореживания структура изображения становится более сложной, уменьшается количество однородных участков и их общая площадь. Поэтому большое число аномальных (соответствующих текстуре и неоднородностям) локальных оценок оказывает влияние на результирующую оценку дисперсии, что приводит к ее завышению.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда оценивание дисперсии производится по изображениям, прореженным в 3 раза. Результаты для этого случая приведены на рис. 2, в. Как видим, оценки диспер-

сии, полученные с использованием метода [13], весьма нестабильны: только для четырех изображений полученные оценки попадают в требуемые пределы, для остальных изображений они либо близки к нулю, либо существенно (в десятки раз) выше истинного значения дисперсии.

Оценки дисперсии, полученные при помощи методов [12] и [14], являются завышенными для всех изображений (кроме изображения №20). Метод [11] обеспечивает приемлемые оценки для 9-ти из 25-ти тестовых изображений, в остальных случаях оценки завышены. Исключением является тестовое изображение № 20, на котором присутствует эффект клиппирования, что дополнительно приводит к занижению оценок для всех методов. В целом, метод [11] обеспечивает наилучшую точность по сравнению с остальными рассмотренными методами, хотя и для него большая часть полученных оценок существенно выше истинного значения дисперсии.

Полученные результаты можно объяснить следующим образом. С одной стороны, после прореживания шум на обрабатываемых изображениях оказывается практически некоррелированным, что и проявляется в отсутствии заниженных оценок дисперсии. (Исключением является метод [13], результаты для которого существенно отличаются от остальных методов; поскольку при проведении исследования был использован оригинальный код, разработанный авторами, понять причины столь своеобразного поведения данного метода не удалось).

С другой стороны, в результате прореживания усложняется структура обрабатываемых изображений, увеличивается число участков, содержащих текстуру и неоднородности, и уменьшается число однородных областей. Это свидетельствует о необходимости дополнительного усовершенствования рассмотренных методов оценивания дисперсии.

## Заключение

Согласно результатам проведенного исследования, в результате прореживания исходного изображения в обоих направлениях может быть практически полностью устранена пространственная коррелированность искажающих помех. Кратность прореживания при этом должна примерно равняться ширине главного лепестка АКФ помех. Использование прореживания позволяет повысить точность оценивания дисперсии коррелированного шума при использовании методов, работающих в спектральной области. В то же время усложнение структуры прореженных изображений по сравнению с их исходными вариантами в некоторых ситуациях приводит к существенному завышению полученных оценок дисперсии. Это свидетельствует о необходимости дополнительного усовершенствования методов для борьбы с этим эффектом.

Очевидно, что для выбора параметров прореживания желателен априорно знать или оценивать по изображению характеристики двумерной АКФ помех. Поэтому вторым направлением будущих исследований является разработка эффективных автоматических методов оценивания корреляционных характеристик помех на обрабатываемых изображениях.

### Список литературы

1. *Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 3-rd edition [Text]* / Jia Xiuping, J.A. Richards, W. Gessner, D.E. Ricken. – Berlin: Springer-Verlag, 1999. – 400 p.
2. *Hoffman R. Interpreting Remote Sensing Imagery: Human Factors [Text]* / R. Hoffman, A. Markman // CRC Press, LLC, 2001. – 424 p.
3. *Methods for Blind Estimation of the Variance of Mixed Noise and Their Performance Analysis [Text]* // Numerical Analysis – Theory and Application / S. Abramov, V. Zabrodina, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi, J. Astola; Ed. Jan Awrejcewicz. – InTech, 2011. ISBN: 978-953-307-389-7.
4. *Methods and automatic procedures for processing images based on blind evaluation of noise type and characteristics [Text]* / V.V. Lukin, S.K. Abramov, N.N. Ponomarenko, M.L. Uss, M.S. Zriakhov, B. Vozel, K. Chehdi, J.T. Astola // Journal of Applied Remote Sensing. – 2011. – N5(1). – P. 21-40.
5. *Neural network Based Edge Detection in Prefiltered SAR Images [Text]* / A.V. Naumenko, V.V. Lukin, K.O. Egiazarian // Proceedings of the 5-th World Congress “Aviation in the XXI-st Century” 2012, Kiev, Ukraine. – Vol. 2. – P. 3.7.61-3.7.66
6. *Methods for blind evaluation of noise variance in multichannel optical and radar images [Text]* / V.V. Lukin, S.K. Abramov, N.N. Ponomarenko, B. Vozel, K. Chehdi // Telecommunications and Radio Engineering. – 2006. – N65 (6). – P. 509-537.
7. *Segmentation-based method for blind evaluation of noise variance in images [Text]* / V. Lukin, S. Abramov, B. Vozel, K. Chehdi, J. Astola // SPIE Journal on Applied Remote Sensing. – 2008. – Vol. 2. – P. 22-37.
8. *Adaptive DCT-based filtering of images corrupted by spatially correlated noise [Text]* / V. Lukin, N. Ponomarenko, K. Egiazarian, J. Astola // Proc. SPIE Conference Image Processing: Algorithms and Systems VI. – 2008. – Vol. 6812. – P. 50-62.
9. *Oliver C. Understanding Synthetic Aperture Radar Images [Text]* / C. Oliver, S. Quegan // SciTech Publishing, 2004. – 479 p.
10. *Кожмеякин Р.А. Анализ эффективности дисперсионно-стабилизирующих преобразований в случае присутствия на изображениях сложных по-мех [Текст]* / Р.А. Кожмеякин, С.К. Абрамов // 15-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке»: матер. конф. – Х.: ХНУРЭ, 2011. – Т. 3. – С. 119-120.
11. *Image DCT coefficient statistics and their use in blind noise variance estimation [Text]* / D. Kurkin, V. Lukin, V. Abramova, S. Abramov, B. Vozel, K. Chehdi // International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET 2012), Kharkov, Ukraine, August 28-30, 2012. – Conference Proceedings CD-ROM. ISBN: 978-1-4673-4479-1
12. *Blind evaluation of additive noise variance in textured images by nonlinear processing of block DCT coefficients [Text]* / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, S.K. Abramov, K.O. Egiazarian, J. Astola // Image Processing: Algorithms and Systems II: Proc. of Internat. Conf. – 2003. – SPIE Vol. 5014. – P. 178-189.
13. *Zoran D. Scale Invariance and Noise in Natural Images [Text]* / D. Zoran, Y. Weiss // ICCV. – 2009. – P. 2209-2216.
14. *Sendur L. Bivariate shrinkage with local variance estimation [Text]* / L. Sendur, I.W. Selesnick // IEEE Signal Processing Letters. – 2002. – Vol. 9. – No 12. – P. 438-441.
15. *Фильтрація кольорових зображень: коли вона необхідна? [Текст]* / В.В. Лукін, Д.В. Февралев, Н.Н. Пономаренко, С.К. Абрамов // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2010. – №4(45). – С. 65-74.
16. *Tampere Image Database 2008 TID2008, version 1.0 [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://ponomarenko.info/tid2008.htm>. – 7.05.2010 г.*
17. *Influence of multiplicative noise variance evaluation accuracy on MM-band SLAR image filtering efficiency [Text]* / S.K. Abramov, V.V. Lukin, N.N. Ponomarenko, K.O. Egiazarian, O.B. Pogrebnyak // Proceedings of the Fifth International Kharkov Symposium “Physics and Engineering of Millimeter and Sub-Millimeter Waves”, Kharkov, Ukraine, 2004. – Vol.1. – P. 250-252.

Поступила в редколлегию 13.08.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Э.Н. Хомяков, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

### ПРОБЛЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ДИСПЕРСІЇ ПРОСТОРОВО-КОРЕЛЬОВАНОГО ШУМУ В СПЕКТРАЛЬНІЙ ОБЛАСТІ ТА ОДИН З МОЖЛИВИХ ШЛЯХІВ ЇХ ВИРІШЕННЯ

В.В. Абрамова, В.В. Лукін, С.К. Абрамов, К.Д. Абрамов, О.О. Колганова

Розглянуто проблеми, що виникають при оцінюванні дисперсії просторово-корельованого шуму в спектральній області. Досліджено можливість підвищення точності оцінювання дисперсії просторово-корельованого шуму в спектральній області за рахунок прорідження вихідного зашумленого зображення. Проведено порівняльний аналіз точності оцінювання дисперсії при обробці вихідних та проріджених тестових зображень, спотворених просторово-корельованими завадами, для найкращих методів, що працюють в спектральній області. Наведено результати чисельного моделювання для різних тестових зображень з бази TID2008.

**Ключові слова:** адитивний шум, автоматична оцінка дисперсії, просторово-корельовані завади.

### PROBLEMS OF SPATIALLY CORRELATED NOISE VARIANCE EVALUATION IN SPECTRAL DOMAIN AND ONE OF THEIR POSSIBLE SOLUTIONS

V.V. Abramova, V.V. Lukin, S.K. Abramov, K.D. Abramov, E.O. Kolganova

The problems encountered in spatially correlated noise variance estimation in spectral domain are considered. The possibility of accuracy improvement of spatially correlated noise variance estimation in spectral domain by means of original noisy image decimation is studied. The comparative analysis of estimation accuracy while processing original and decimated test images corrupted by the spatially correlated noise for several best methods operating in spectral domain is carried out. The results of numerical simulations for different test images from TID2008 database are presented.

**Keywords:** additive noise, blind variance evaluation, spatially correlated noise.