

УДК 004.932.4

Р. А. КОЖЕМЯКИН

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

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ВАРИАЦИОННО-СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СЛУЧАЕ ПРИСУТСТВИЯ СЛОЖНЫХ ПОМЕХ

*Рассмотрены особенности применения вариационно-стабилизирующих преобразований (ВСП) разных типов для изображений, сформированных оптическими сенсорами. Показано, что для оптических изображений наиболее эффективным в плане стабилизации дисперсии сложного шума является ВСП на основе обобщенного преобразования Энскомба (ОПЭ). Так как ОПЭ относится к ВСП параметрического типа, было проведено исследование влияния точности используемых в ОПЭ оценок параметров компонент сложного шума на эффективность стабилизации дисперсии помех после преобразования. Были определены границы допустимой неточности оценок характеристик помех для эффективного применения ОПЭ в задачах фильтрации оптических изображений.*

**Ключевые слова:** вариационно-стабилизирующее преобразование, оптические изображения, сложные помехи, обобщенное преобразование Энскомба.

### Введение

В настоящее время системы формирования изображений (СФИ) получили широкое распространение, как в бытовом применении, так и для решения разнообразных научно-прикладных задач. Изображения широко используются в медицине, в системах дистанционного зондирования, для экологического мониторинга, в сельскохозяйственной (контроль эрозии почвы и степени зрелости урожая), промышленной (неразрушающий контроль качества продукции) областях и как одна из составляющих мультимедийных данных [1].

Ввиду неидеальности характеристик аппаратуры СФИ на практике помехи и искажения присутствуют практически на всех изображениях [2]. Однако за счет специфики визуального восприятия человека в зависимости от типа изображения и уровня помех искажения могут быть как визуально заметны, так и визуально незаметны [2]. Система визуального восприятия человека наиболее чувствительна к искажениям в областях малоразмерных деталей, границ площадных объектов и менее чувствительна к текстурным областям изображений вследствие эффекта маскирования шума в высокочастотной составляющей изображения [3]. Если же изображение на выходе СФИ будет иметь малое отношение сигнал-шум, то помехи будут хорошо заметны практически в любой ситуации. Кроме того, наличие помех не только ухудшает визуальное восприятие информации на изображении, но и ухудшает эффективность обработки, например, сжатия или классификации объектов [2, 3].

В современных оптических СФИ шум имеет сложный характер и состоит из смеси сигнально-зависимой  $\sigma_{\text{пуас}}^2$  (квази-пуассоновской) и сигнально-независимой  $\sigma_{\text{а}}^2$  (аддитивной гауссовской) компонент [4]. В зависимости от особенностей СФИ одна из компонент шума обычно является доминирующей. В большинстве случаев для оптических СФИ (вследствие использования высококачественной аппаратуры и уменьшения собственных тепловых шумов сенсоров) такой компонентой является сигнально-зависимая.

Для подавления шума и улучшения визуального качества изображений, а также повышения эффективности последующих процедур сжатия и классификации необходимо применять методы фильтрации. Большинство существующих методов фильтрации изображений не учитывают сложную структуру шума и рассчитаны на присутствие только одной из компонент: либо сигнально-независимой, либо сигнально-зависимой. Это, естественно, приводит к низкой эффективности их применения для обработки реальных изображений. Одним из возможных вариантов решений этой проблемы является применение вариационно-стабилизирующих преобразований (ВСП) к изображению непосредственно перед его обработкой. Соответственно для возвращения значений изображения в исходные пределы после процедуры обработки необходимо применять обратное ВСП. ВСП позволяют преобразовать сигнально-зависимые или смесь сигнально-зависимых и сигнально-независимых помех на изо-

бражении в чисто аддитивные сигнально-независимые помехи [5], для которых существуют эффективные методы фильтрации. Также одним из достоинств ВСП является возможность стабилизации дисперсии помех изображения на известном (обычно единичном) уровне [5], что позволяет существенно упростить процедуру определения оптимальных управляющих параметров фильтров или других алгоритмов обработки.

Для рассматриваемой модели шума в виде смеси квази-пуассоновской и аддитивной компонент существует ВСП на основе обобщенного преобразования Энскомба (ОПЭ) [4]. Однако для его применения необходимо знать параметры компонент шума, которые на момент обработки неизвестны и требуют оценивания. На текущий момент в литературе отсутствуют сведения о влиянии неточности оценивания параметров шума на эффективность проведения вариационной стабилизации при помощи ОПЭ. Поэтому **целью данной статьи** является определение наиболее эффективного ВСП для изображений, искаженных сложным шумом, а также исследование допустимых пределов погрешности оценок компонент шума для эффективного применения ОПЭ в задачах фильтрации изображений.

## 1. Теоретические основы исследования

Основная модель шума в современных СФИ на основе ПЗС-сенсоров, в частности, гиперспектральных системах дистанционного зондирования нового поколения, имеет следующий вид [5]:

$$I_{ij} = n_{ij}^{\text{poiss}}(I_{ij}^{\text{true}}, k) + n_{ij}^{\text{add}}(g, \sigma_a^2), \quad (1)$$

где  $I_{ij}$  – зашумленный  $ij$ -й пиксель изображения;

$n_{ij}^{\text{poiss}}$  – квази-пуассоновская компонента шума;

$I_{ij}^{\text{true}}$  – истинное значение  $ij$ -го пикселя;

$k$  – коэффициент коррекции динамического диапазона изображения;

$n_{ij}^{\text{add}}$  – аддитивная компонента шума с дисперсией  $\sigma_a^2$  и математическим ожиданием  $g$ , которое полагается равным нулю.

Дисперсия помех для  $ij$ -го пикселя равна  $\sigma_{ij}^2 = k \cdot I_{ij}^{\text{true}} + \sigma_a^2$ . Шумы для этих двух компонент в рамках исследования полагались независимыми и пространственно-некоррелированными.

Для преобразования шума такого вида в чисто аддитивный гауссовский с единичной дисперсией существует специально разработанное обобщенное преобразование Энскомба [4]:

$$I_{ij}^{\text{ОПЭ}} = (2/k) \cdot \sqrt{I_{ij} \cdot k + k^2 \cdot 3/8 + \sigma_a^2}. \quad (2)$$

Также существует параметрическое ВСП разработанное Ц. Юньтао [6]:

$$I_{ij}^{\text{Ю}} = I_{ij} / (k \cdot \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij} / MN + \sigma_a^2)^{1/2}. \quad (3)$$

Помимо ВСП ОПЭ и Юньтао есть и другие ВСП, в частности, семейство корневых преобразований: Бартлетта и его модификаций ( $I_{ij}^{\text{Б1}} = 2 \cdot \sqrt{I_{ij}}$ ,  $I_{ij}^{\text{Б2}} = 2 \cdot \sqrt{I_{ij} + 1/2}$ ,  $I_{ij}^{\text{Б3}} = 2 \cdot \sqrt{I_{ij} + 1}$ ), Энскомба ( $I_{ij}^{\text{Э}} = 2 \cdot \sqrt{I_{ij} + 3/8}$ ), Тьюки и Фримена ( $I_{ij}^{\text{ТФ}} = \sqrt{I_{ij}} + \sqrt{I_{ij} + 1}$ ), однако они разработаны для случая присутствия на изображении только чисто пуассоновского шума ( $\sigma_a^2 = 0$ ,  $k=1$ ). Использование этих преобразований в случае модели помех (1) будет приводить к снижению эффективности стабилизации дисперсии, но, с другой стороны, эти ВСП являются непараметрическими и не требуют знания характеристик помех, что существенно упрощает их использование на практике. В связи с этим на первом этапе исследований была поставлена задача определения допустимых уровней отклонения от модели чисто пуассоновского шума, при которых применение этих ВСП позволяет осуществить стабилизацию дисперсии с приемлемой точностью.

Сложность использования ОПЭ (2) и ВСП Ц. Юньтао (3) заключается в том, что для их применения необходимо знать параметры шума, что не всегда возможно на практике [5]. Если же использовать алгоритмы оценивания шумовых параметров, возникает вопрос о влиянии неточности оценивания на эффективность преобразования. Поэтому на втором этапе исследования была поставлена задача определения допустимых уровней погрешности оценивания параметров шума, при которых эффективность стабилизации дисперсии при помощи ОПЭ является приемлемой.

Для задачи фильтрации изображений установлено, что допустимой ошибкой оценивания параметров аддитивного шума, при которой снижение эффективности фильтрации визуально незаметно, является величина  $\pm 20\%$  от истинного значения. В связи с этим, эффективной будем считать такую стабилизацию, при которой дисперсия для различных участков тестового изображения после ВСП будет лежать в пределах 0,8-1,2. Это соответствует 20% диапазону относительно единичной дисперсии, которая, согласно теории, должна быть получена после применения ВСП.

## 2. Исследование эффективности различных ВСП

Эффективность будет оцениваться с точки зрения обеспечения минимума приведенной ошибки преобразования по набору реализаций шума для специального изображения «Полосы» (рис. 1). Выбор именно такого тестового изображения обусловлен тем, что оно имеет четко выраженные однородные участки и не содержит собственного шума, что позволяет исключить влияние информационной составляющей на точность оценки шума после применения ВСП. На изображении находится шестнадцать участков со средним значением пикселей в полосе от 20 до 170 с шагом 10.

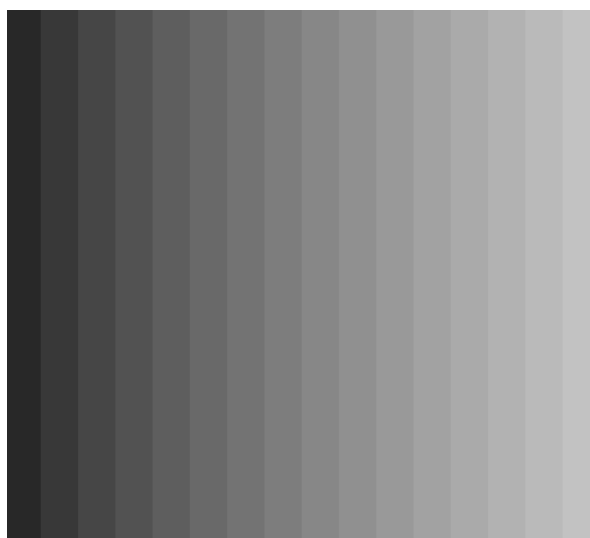


Рис. 1. Тестовое изображение «Полосы»

В качестве численных критериев эффективности применения ВСП использовались: смещенность оценки дисперсии шума после ВСП –  $\Delta = \left| \langle \hat{X} \rangle - X_{\text{ист}} \right|$ ; дисперсия оценок дисперсии шума после ВСП –  $\theta^2 = 1/15 \cdot \sum_{i=1}^{16} \left( \langle \sigma_{\text{пол},i}^2 \rangle - \langle \hat{X} \rangle \right)^2$ ; приведенная ошибка преобразования –  $\varepsilon = \theta^2 + \Delta^2$ , где  $X_{\text{ист}}$  – требуемое значение дисперсии шума после ВСП ( $X_{\text{ист}}=1$ );  $\langle \hat{X} \rangle$  – математическое ожидание полученных усредненных оценок дисперсии шума по всем полосам:  $\langle \hat{X} \rangle = 1/16 \cdot \sum_{i=1}^{16} \langle \sigma_{\text{пол},i}^2 \rangle$ ;  $\langle \sigma_{\text{пол},i}^2 \rangle$  – усредненная по реализациям шума оценка дисперсии в пределах  $i$ -й полосы;  $\langle \cdot \rangle$  – операция усреднения по реализациям, для статистической достоверности результатов использовалось 100 реализаций шума.

В табл. 1 представлены численные критерии эффективности применения различных ВСП к тес-

товому изображению «Полосы», искаженному пуассоновским шумом ( $k=1, \sigma_a^2=0$ ). Для чисто пуассоновского шума ОПЭ вырождается в ВСП Энскомба, а ВСП Юньтао принимает вид

$$I_{ij}^{\text{Ю}} = I_{ij} / \left( \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_{ij} / MN \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Как видно из анализа данных табл. 1 для чисто пуассоновского шума все преобразования имеют небольшую (менее 1%) смещенность и малую дисперсию. Исключение составляет ВСП Юньтао (4), для которого дисперсия существенно выше. Наиболее эффективным (обеспечивающим наименьшее значение приведенной ошибки) является ВСП Энскомба (2).

Таблица 1

Численные критерии эффективности применения ВСП к изображению «Полосы», искаженному пуассоновским шумом

Тип ВСП	$\Delta$	$\theta^2$	$\varepsilon$
Бартлетта 1	0,0046	1,72E-04	1,93E-04
Бартлетта 2	0,0078	2,12E-04	2,72E-04
Бартлетта 3	0,0023	1,47E-04	1,52E-04
Энскомба	0,0007	7,10E-05	7,14E-05
Тьюки и Фримена	0,0075	1,23E-04	1,79E-04
Юньтао	0,0010	0,2506	0,2506

Так как на практике оптические изображения искажены сложным шумом [7], была исследована эффективность применения ВСП для смеси сигнално-зависимого шума с различными уровнями компонент (пуассоновской и гауссовской) (табл. 2).

Из полученных данных видно, что для всех ВСП кроме ОПЭ и ВСП Юньтао (3) наблюдается уменьшение эффективности применения ВСП (увеличение приведенной ошибки стабилизации) при увеличении уровня сигнално-независимой компоненты и при увеличении разницы уровня сигнално-зависимой компоненты относительно единичного. Исключение составляет лишь ситуация с малым уровнем пуассоновской компоненты ( $k=0,1, \sigma_a^2 = 65$ ), когда суммарный уровень сигнално-независимой и зависимой компонент близки к единичному.

Таким образом, получается, что даже незначительные отклонения параметров сложного шума от пуассоновской модели приводят к появлению смещенности стабилизации дисперсии большей чем 0,2, то есть применение этих ВСП для задач фильтрации оказывается неприемлемым.

Таблица 2

Численные критерии эффективности применения ВСП к изображению «Полосы»,  
искаженному сложным шумом

Тип ВСП	$\Delta$	$\Theta^2$	$\varepsilon$	$\Delta$	$\Theta^2$	$\varepsilon$
	$\sigma_a^2 = 5$			$\sigma_a^2 = 65$		
	k=0,1					
Бартлетта 1	0,823	0,004	0,681	0,174	0,928	0,959
Бартлетта 2	0,825	0,003	0,684	0,157	0,860	0,884
Бартлетта 3	0,826	0,003	0,686	0,139	0,793	0,812
Энскомба	0,824	0,003	0,683	0,160	0,874	0,900
Тьюки и Фримена	0,825	0,003	0,683	0,156	0,855	0,880
ОПЭ	5E-04	1E-04	1E-04	1E-06	1E-04	1E-04
Юньтао	2E-04	0,101	0,101	5E-06	0,004	0,004
	k=0,6					
Бартлетта 1	0,316	0,005	0,104	0,715	1,082	1,594
Бартлетта 2	0,322	0,004	0,108	0,691	0,991	1,469
Бартлетта 3	0,328	0,003	0,111	0,668	0,910	1,356
Энскомба	0,321	0,004	0,107	0,697	1,015	1,501
Тьюки и Фримена	0,322	0,004	0,108	0,691	0,992	1,470
ОПЭ	0,005	1E-04	1E-04	0,051	1E-04	1E-04
Юньтао	1E-04	0,199	0,199	5E-04	0,051	0,051
	k=1,2					
Бартлетта 1	0,303	0,008	0,100	1,377	1,300	3,199
Бартлетта 2	0,291	0,006	0,091	1,344	1,178	2,987
Бартлетта 3	0,280	0,005	0,083	1,315	1,074	2,806
Энскомба	0,294	0,006	0,093	1,353	1,213	3,045
Тьюки и Фримена	0,292	0,006	0,091	1,345	1,177	2,988
ОПЭ	0,009	1E-04	1E-04	0,005	1E-04	1E-04
Юньтао	1E-04	0,216	0,216	5E-04	0,096	0,096

В целом же, ОПЭ и ВСП Юньтао для всех ситуаций (различных уровней помех) обладают наиболее высокой эффективностью. Среди этих двух ВСП лучшие результаты обеспечивает ОПЭ.

Таким образом, согласно проведенному исследованию можно сделать вывод, что для наиболее эффективной стабилизации дисперсии сложного шума оптических изображений целесообразно применять ВСП ОПЭ.

### 3. Исследование эффективности ОПЭ при неточных оценках характеристик сложного шума

Поскольку ОПЭ является параметрическим ВСП, то проведем исследование эффективности применения ОПЭ к тестовому изображению «Полосы» в зависимости от неточности оценок параметров сложного шума.

На данное изображение согласно модели (1) был наложен искусственный шум с различными комбинациями параметров  $\sigma_a^2=1; 5; 25; 65; 130$ ; и  $k=0,01; 0,3; 0,6; 1; 1,2$ . Далее после применения ОПЭ с различной степенью смещенностей входных параметров оценивалось значение дисперсии шума для

каждой полосы изображения. Если хоть в одной полосе дисперсия шума после ОПЭ не ложилась в диапазон 0,8-1,2, то такая комбинация смещенностей оценок считалась неприемлемой.

Финальная область допустимых отклонений была сформирована наложением приемлемых областей (согласно введенному критерию смещенности) для всех комбинаций уровней параметров компонент шума.

Аналогичное исследование было проведено и для реальных оптических изображений (рис. 2). Эффективность применения ОПЭ для реальных изображений оценивалась по разностному изображению  $I_{ij}^{разн} = |I_{ij}^{ОПЭ_{оц}} - I_{ij}^{ОПЭ_{ист}}|$ , где  $I_{ij}^{ОПЭ_{оц}}$  – изображение после применения ОПЭ с оцененными (смещенными) параметрами шума;  $I_{ij}^{ОПЭ_{ист}}$  – изображение после применения ОПЭ с истинными (несмещенными) параметрами шума.

Численные критерии эффективности применения ОПЭ к реальным изображениям вычислялись таким же образом, как и для тестового, с той лишь разницей, что вычисление смещенности и дисперсии оценок гауссового шума (после применения

ОПЭ) проводились по всему разностному изображению.

Алгоритм определения допустимых комбинаций смещенностей и финальной области допустимых отклонений оставался таким же, как для тестового изображения.

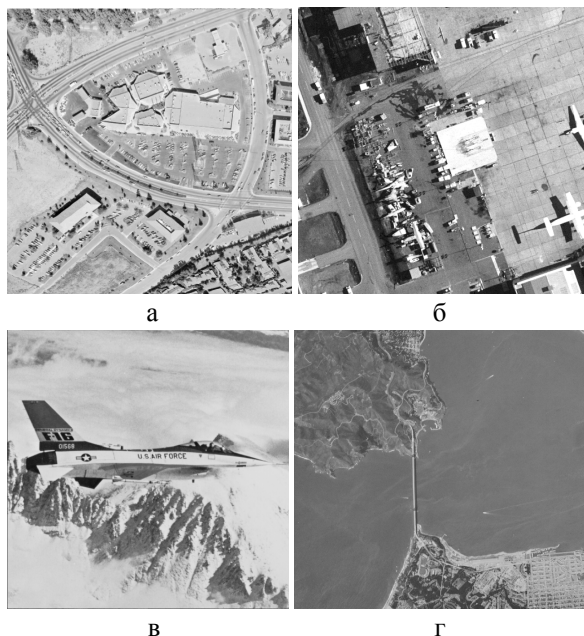


Рис. 2 Реальные оптические изображения для исследования эффективности применения ОПЭ в зависимости от неточности используемых оценок шума

На рис. 3 приведена область (заштрихованная) допустимых отклонений оценок компонент шума, где  $\hat{\sigma}_{a \text{ ист}}^2$  и  $\hat{k}_{\text{ист}}$  являются истинными (несмещенными) параметрами сложного шума. Допустимая величина отклонения оценки  $\hat{\sigma}_a^2$  составляет от -18% до +25%, для  $\hat{k}$  – от -15% до +25%. В этих пределах смещенности оценок дисперсии шума после ВСП не выходят за пределы 0,8-1,2. Анализируя данные для реальных изображений (рис. 4) видно, что допустимы границы смещенностей остались практически в тех же пределах.

Таким образом, были сформированы и обоснованы общие требования к точности оценок сигнално-зависимой и независимой компонент для применения их в ОПЭ.

### Заключение

В статье показано, что наилучшую эффективность стабилизации дисперсии сложного шума обеспечивает применение ВСП ОПЭ. Так как эффективность ОПЭ зависит от точности используемых

оценок параметров сложного шума, было проанализировано влияние погрешности их оценивания на эффективность стабилизации дисперсии шума. Согласно введенному критерию показано, что погрешность используемых оценок в ОПЭ не должна превышать приблизительно 15% в меньшую и около 25% в большую сторону относительно истинных значений параметров шума как для  $\sigma_a^2$ , так и для  $k$ .

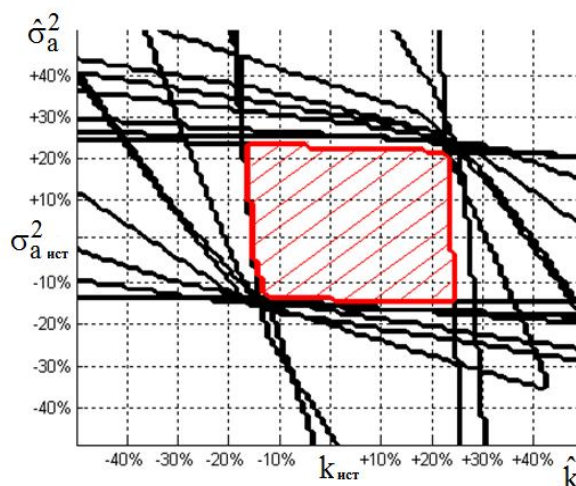


Рис. 3. Область допустимых комбинаций смещенных оценок шума для тестового изображения «Полосы»

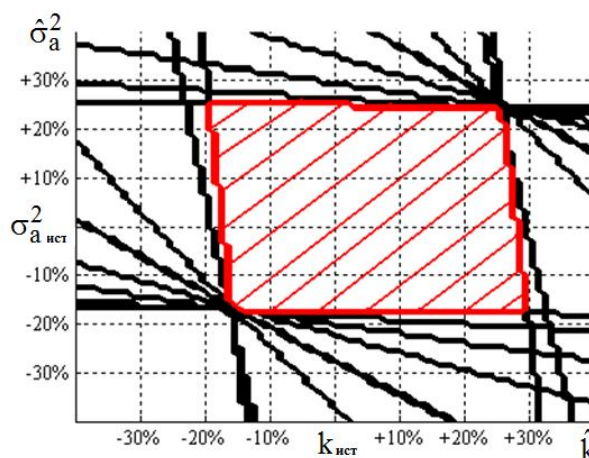


Рис. 4. Область допустимых комбинаций смещенностей оценок шума для реальных изображений

### Литература

1. Чобану, М. К. Многомерные многоскоростные системы обработки сигналов [Текст] / М. К. Чобану. – М. : Техносфера, 2009. – 480 с.
2. Фильтрация цветных изображений: когда она необходима? [Текст] / В. В. Лукин, Д. В. Февра-

лев, Н. Н. Пономаренко, С. К. Абрамов // *Радиоэлектронні та комп'ютерні системи*. – 2010. – № 4 (44). – С. 65-74.

3. *On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Text]* / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli, J. Astola, V. Lukin // *Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics*. – Scottsdale, Arizona, USA. – Jan. 2007. – 4 p.

4. Murtagh, F. *Astronomical image and signal processing [Text]* / F. Murtagh, J. L. Starck // *Signal Processing Magazine, IEEE*. – 2001. – Vol. 18 (2). – P. 30-40.

5. Кожемякин, Р. А. *Анализ эффективности дисперсионно-стабилизирующих преобразований в случае присутствия на изображениях сложных по-*

*мех [Текст]* / Р. А. Кожемякин, С. К. Абрамов // *15-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в 21 веке», матер. конф., Харьков, ХНУРЭ*. – 2011. – Т. 3. – С. 119-120.

6. Yuntao, Q. *Hyperspectral imagery restoration using nonlocal spectral-spatial structured sparse representation with noise estimation [Text]* / Q. Yuntao, M. Ye // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 6 (2). – P. 499-515.

7. Skauli, T. *Sensor noise informed representation of Hyperspectral data, with benefits for image storage and processing [Text]* / T. Skauli // *Optics Express*. – 2011. – Vol. 19, №. 14. – P. 13031-13046.

*Поступила в редакцию 3.11.2014, рассмотрена на редколлегии 18.11.2014*

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Приема, передачи и обработки сигналов» В. В. Лукин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков.

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВАРІАЦІЙНО-СТАБІЛІЗУЮЧИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ДЛЯ ЗОБРАЖЕНЬ У ВИПАДКУ ПРИСУТНОСТІ СКЛАДНИХ ЗАВАД**

*Р. О. Кожемякін*

Розглянуто особливості застосування варіаційно-стабілізуючих перетворень (ВСП) різних типів для зображень, сформованих оптичними сенсорами. Показано, що для оптичних зображень найбільш ефективним в плані стабілізації дисперсії складного шуму є ВСП на основі узагальненого перетворення Енскомба (УПЕ). Так як УПЕ відноситься до ВСП параметричного типу, було проведено дослідження впливу точності використання в УПЕ оцінок параметрів компонент складного шуму на ефективність стабілізації дисперсії завад після перетворення. Було визначено межі допустимої неточності оцінок характеристик завад для ефективного застосування УПЕ в задачах фільтрації оптичних зображень.

**Ключові слова:** варіаційно-стабілізуючі перетворення, оптичні зображення, складні завади, узагальнене перетворення Енскомба.

## **EFFICIENCY OF USE OF VARIANCE-STABILIZING TRANSFORMS FOR IMAGES CORRUPTED BY COMPLEX NOISE**

*R. A. Kozhemiakin*

The peculiarities of the application of variance-stabilizing transforms of different types for images formed by optical sensors are analyzed. It is shown that the generalized Anscombe transform has the highest efficiency among the considered variance-stabilizing transforms in the case of a mixture of signal-dependent (Poisson) and an additive signal-independent (Gaussian) noise components. Since the generalized Anscombe transform relates to the parametric VST an analysis of the influence of accuracy of parameters estimation used in the generalized Anscombe transform is carried out. The boundaries of the acceptable noise parameters estimation accuracy for using in generalized Anscombe transform are defined.

**Keywords:** variance-stabilizing transform, optical images, complex noise, generalized Anscombe transform.

**Кожемякин Руслан Александрович** – аспирант каф. «Приема, передачи и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: KozhemiakinR@gmail.com.