

УДК 621.3:681.34

С. К. АБРАМОВ, В. В. ЛУКИН

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

## ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ОБРАБОТКИ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

*Проанализированы особенности обработки изображений гиперспектрального дистанционного зондирования с аэрокосмических носителей. Указаны проблемы, возникающие при выполнении основных операций обработки (оценке характеристик помех, фильтрации, сжатии с потерями). Рассмотрены возможности автоматизации этих операций. Перечислены задачи, которые можно считать решенными, и направления, по которым необходимо проведение дополнительных исследований. Приведены примеры эффективного решения частных задач с использованием процедур прогнозирования параметров, характеризующих эффективность фильтрации и сжатия с потерями.*

**Ключевые слова:** обработка изображений, гиперспектральное дистанционное зондирование, автоматизация.

### Введение

Гиперспектральное дистанционное зондирование (ДЗ) с аэрокосмических носителей стало эффективным инструментом решения многих практически важных задач для разнообразных приложений [1, 2]. Особенностью таких средств ДЗ является формирование совмещенных изображений поверхности одновременно для более сотни спектральных каналов (зон) с неплохим пространственным разрешением. Такая методика зондирования имеет как достоинства, так и недостатки.

С одной стороны, высокое спектральное разрешение (порядка 10 нм) и одновременное использование видимого и инфракрасного диапазонов предоставляет возможность применения различных методов извлечения полезной информации из спектральных «портретов» (сигнатур). С другой стороны, объем данных, которые приходится обрабатывать (фильтровать, передавать по каналам связи, хранить, классифицировать), оказывается очень большим (порядка сотен Мегабайт и более на одно изображение). Это, в свою очередь, приводит к:

- ограниченным возможностям обработки данных гиперспектрального ДЗ на борту [3-5];
- сложностям обработки данных в наземных пунктах приема космической информации [6, 7].

Одним из способов решения возникающих проблем является автоматизация обработки гиперспектральных данных ДЗ [8, 9]. Безусловно, автоматизация необходима на борту летательного аппарата, являющегося носителем системы гиперспектрального ДЗ, особенно спутника. В этом случае, конечно, возможно дистанционное управление по командам с Земли (изменение последовательности

обработки либо параметров используемых методов), однако функциональные возможности такого управления весьма ограничены. В связи с этим вопросам полной автоматизации обработки данных на борту летательного аппарата должно быть уделено особое внимание.

Возможности привлечения квалифицированных экспертов (тренированного персонала) в наземных пунктах приема информации, естественно, шире. Но и в этом случае могут возникнуть проблемы вследствие большого числа принимаемых изображений, большого числа каналов, большого размера формируемых изображений и субъективных факторов (особенностей человеческого зрения, усталости людей). Поэтому и для наземных пунктов обработки данных гиперспектрального ДЗ автоматизация является актуальной.

Обработка данных гиперспектрального ДЗ включает несколько основных этапов (собственно регистрация, калибровка и коррекция, привязка к географическим координатам или карте, предварительный анализ и обработка, сжатие и передача, поиск объектов или зон интереса, классификация и распознавание, извлечение полезной информации). При этом обязательным является выполнение не всех этапов. На каждом из этапов возможны варианты обработки, ограничения на точность или надежность, а также сложность вычислений.

### Постановка задачи исследования

В данной статье основное внимание уделено автоматизации обработки на этапах предварительного анализа, фильтрации и сжатия данных. Целью статьи является рассмотрение современных подхо-

дов к автоматизации обработки гиперспектральных изображений, анализ достижений и выявление имеющихся трудностей, а также обоснование насущных задач современного этапа исследований и обсуждение возможных путей их решения.

### 1. Предварительный анализ гиперспектральных изображений

Предварительный анализ может преследовать несколько основных целей. Прежде всего, необходимо понять, насколько полученное изображение ценно (пригодно) для последующей обработки с целью извлечения полезной информации об объекте (территории) зондирования. В частности, территория может быть частично или полностью закрыта облаками [5, 10]. По мере увеличения процента территории, скрытой облаками, ценность изображения снижается. Аналогично снижается ценность изображения, на котором присутствуют помехи высокого уровня [11] или искажения других типов (например, смаз [5]). Поэтому предварительный анализ, проводимый на борту носителя, может позволить в автоматическом режиме принять решение, имеет ли смысл передавать данное изображение по каналу связи на Землю и тратить ресурсы на обработку этого изображения (например, сжатие) на борту, а также расходовать ресурсы канала связи.

Приведенный пример показывает, что именно может пониматься в виду под автоматической обработкой. На наш взгляд, для рассматриваемого приложения автоматическая обработка может включать следующее:

1) получение априорной информации, позволяющей принять то или иное решение на последующих этапах;

2) выбор последовательности операций обработки, в том числе принятие решения о выполнении или пропуске (невыполнении) какой-то операции;

3) выбор метода обработки в зависимости от имеющихся (полученных) априорных сведений: приоритета требований или критерия эффективности;

4) предсказание эффективности обработки и принятие решения о целесообразности ее выполнения;

5) выбор (установка) параметров метода обработки в зависимости от имеющихся (полученных) априорных сведений: приоритета требований или критерия эффективности.

6) обнаружение ситуаций, когда высок риск принятия неправильных решений или неправильной установки параметров методов обработки; принятие робастных решений.

Пункт 1 (получение априорной информации) может выполняться как на борту носителя, так и в наземном пункте. Принятие решения о том, где выполнение операции определения основных типов помех и искажений (оценки качества первичных данных ДЗ) более целесообразно, зависит от ряда факторов. В частности, имеют значение изменчивость свойств (параметров, характеристик) помех и искажений от одного сеанса формирования изображений (получения данных ДЗ) к другому, а также доступные вычислительные ресурсы на борту и сложность алгоритмов такого предварительного анализа [12-14]. По мере развития вычислительных мощностей наблюдается тенденция ко все более широкому использованию операций предварительного анализа на борту носителя средств ДЗ.

Естественно, что при обработке и предварительном анализе используется имеющаяся априорная информация. Например, установлено, что помехи в изображениях гиперспектрального ДЗ являются сигнально-зависимыми и практически пространственно-некоррелированными [12]. Существует небольшая межканальная корреляция помех, но ей можно пренебречь. Априорно известно также, что параметры помех в соседних каналах, как правило, близки, хотя общий диапазон варьирования значений этих параметров (и, соответственно, диапазон отношений сигнал-помеха) весьма широк [15, 16].

В общем случае компонентное изображение, искаженное сигнально-зависимым шумом, можно записать в виде

$$I_{qij}^n = I_{qij}^{true} + n_{qij}(I_{qij}^{true}), \quad (1)$$

где  $I_{qij}^{true}$  – истинное значение в  $ij$ -м пикселе для  $q$ -го канала,  $I_{qij}^n$  – зашумленное (наблюдаемое) значение изображения в  $ij$ -м пикселе,  $n_{qij}$  – шум в этом пикселе, статистические характеристики которого зависят от  $I_{qij}^{true}$ . Для изображений гиперспектрального ДЗ общепринятой в последнее время стала модель статистических характеристик

$$\sigma_{nqij}^2 = k_q I_{qij}^{true} + \sigma_{addq}^2, \quad (2)$$

где  $\sigma_{addq}^2$  – дисперсия аддитивной компоненты,  $k_q$  – постоянный множитель, который зависит от особенностей операции коррекции динамического диапазона, выполняемых при формировании изображения [15],  $q$  – индекс канала.

К настоящему времени сформулированы и обоснованы требования к точности оценки параметров помех  $\sigma_{addq}^2$  и  $k_q$  для модели (2) [17]. Разработаны достаточно точные, но одновременно сложные в вычислительном отношении методы автоматиче-

ского оценивания параметров сигнально-зависимых помех [12, 13]. Одновременно разработаны более простые, но менее точные методы [18]. В связи с этим достаточно актуальной задачей является усовершенствование методов обеих групп для того, чтобы обеспечить желаемую точность с приемлемым быстродействием.

Важный вопрос, который часто поднимается при анализе свойств помех в гиперспектральных изображениях, – а нельзя ли пренебречь влиянием одной из компонент для модели (2)? Чтобы ответить на него, сравним вклад обеих компонент – сигнально-независимой (СН), характеризуемой  $\sigma_{\text{add}q}^2$ , и сигнально-зависимой (СЗ), статистика которой зависит от  $k_q$ , – в общий уровень помех. Для сигнально-зависимой компоненты введем понятие эквивалентной дисперсии, определяемой как

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_{\text{eqSD}}^2(q) &= \sum_{i=1}^{I_{\text{Im}}} \sum_{j=1}^{J_{\text{Im}}} k_q I_{qij}^{\text{true}} / (I_{\text{Im}} J_{\text{Im}}) \approx \\ &\approx \sum_{i=1}^{I_{\text{Im}}} \sum_{j=1}^{J_{\text{Im}}} \hat{k}_q I_{qij}^n / (I_{\text{Im}} J_{\text{Im}}) = \hat{k}_q I_{\text{mean}}(q), \end{aligned} \quad (3)$$

где  $\hat{k}_q$  и  $I_{\text{mean}}(q)$  – оценка параметра  $k$  и среднее значение изображения в  $q$ -м канале.



Рис. 1. Фрагмент гиперспектрального изображения сенсора Гиперион (ЕО1Н2010262004157110КР), представленного в псевдоцветах

Анализ проведем для реальных данных сенсора Гиперион (фрагмент изображения ЕО1Н2010262004157110КР представлен на рис. 1). Полученные значения оценок параметров приведены на рис. 2. Здесь необходимо пояснить, что в ряде каналов качество изображений настолько низкое, что на практике эти данные не используют. Поэтому для зависимостей  $\sigma_{\text{add}}^2(q)$  и  $\hat{\sigma}_{\text{eqSD}}^2(q)$  соответствующие значения приняты равными единице (для возможности логарифмического представления).

Из анализа зависимостей на рис. 2 следует, что для всего диапазона, формируемого первым сенсором системы Гиперион ( $q$  от 13 до 62) вклад сигнально-зависимой составляющей превышает вклад сигнально-независимой составляющей. Для диапазона, формируемого вторым сенсором системы Гиперион ( $q$  от 82 до 229) вклады обеих составляющих сравнимы. На краях обоих диапазонов имеет место рост уровня помех. В целом, наблюдаются очень широкие диапазоны изменения как  $\hat{\sigma}_{\text{add}}^2(q)$ , так и  $\hat{\sigma}_{\text{eqSD}}^2(q)$ . С учетом широких пределов вариации динамических диапазонов значений изображений в каналах наблюдается также значительное изменение отношений сигнал-шум или пиковых отношений сигнал-шум (ПОСШ) в каналах. В результате, практически для всех гиперспектральных изображений есть каналные изображения, для которых качество данных кажется близким к идеальному, то есть шум на визуализированных изображениях не виден. Это связано с особенностями зрения человека, который при ПОСШ больших примерно 35 дБ перестает замечать шум. Таких компонентных изображений примерно 80-85% от общего числа спектральных каналов.

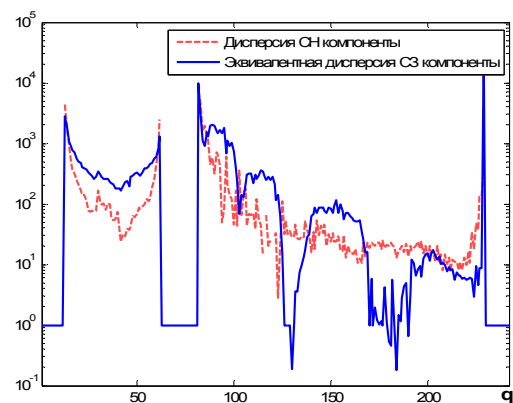


Рис. 2. Зависимости дисперсии и эквивалентной дисперсии от номера канала

Одновременно есть и каналы, для которых шум в визуализированных изображениях явно виден – в англоязычной литературе такие каналы получили

название “junk” [11], то есть мусор, утиль, хлам. В отношении данных в таких каналах мнения исследователей расходятся. Одни считают, что данные в таких каналах не позволяют извлечь дополнительную полезную информацию о зондируемой поверхности. Другие полагают, что предварительная обработка (фильтрация, если она эффективна) позволяет повысить информативность изображений в таких каналах и поэтому ими не следует пренебрегать.

К дополнительному обсуждению этого вопроса вернемся в следующих подразделах. Здесь же отметим следующее. Во-первых, очевидна необходимость учета сигнально-зависимого характера помех на последующих этапах обработки изображений. Во-вторых, даже наиболее точные методы автоматического оценивания параметров сложных (сигнально-зависимых) помех могут давать неудовлетворительные («странные») оценки. В частности, оценки как дисперсии сигнально-независимой составляющей, так и параметра  $k$  сигнально-зависимой компоненты могут оказываться отрицательными, что противоречит физическому смыслу этих величин. Такие ситуации соответствуют пункту 6 приведенного выше списка операций автоматической обработки - принятие робастных решений. Один вариант решения заключается в том, что в автоматический алгоритм получения оценок параметров помех для модели (2) вносят ограничения на неотрицательность обеих оценок [19]. Могут быть использованы и другие операции, например:

1) введение ограничений на оценки «сверху», то есть значения оценок не могут превышать некоторые максимальные значения;

2) обнаружение ситуаций, когда оценки для используемого метода могут быть неточными, например, завышенными вследствие высокой текстурности изображения и высокого отношения сигнал-шум [14].

На данный момент нам неизвестны работы, в которых бы анализировались эти возможности. Поэтому эти аспекты нуждаются в дополнительной проработке.

## 2. Особенности автоматизации при сжатии с потерями

Сразу же поясним, почему далее в данном разделе речь пойдет о сжатии с потерями. В принципе, возможно применение как сжатия без потерь, так и сжатия с потерями [3, 4]. Как промежуточный вариант часто также рассматривают сжатие «почти без потерь» (near lossy) [20, 21], при котором максимальное значение модуля разности между исходным и сжатым изображениями не превышает некоторый порог, выбираемый с учетом уровня помех.

Для сжатия без потерь разработаны достаточно эффективные методы [20, 21]. Более того, на данный момент фактически разработан стандарт сжатия моно-, мульти- и гиперспектральных изображений ДЗ без потерь [22, 23]. Однако даже для гиперспектральных изображений эти методы обеспечивают коэффициент сжатия (КС) порядка 4-5. Для методов сжатия без потерь это очень хороший результат, но для практики такие значения КС часто оказываются неудовлетворительными [3, 4]. Поэтому рассмотрим более подробно методы сжатия с потерями в применении именно к гиперспектральным изображениям.

Необходимо отметить, что к методам сжатия может предъявляться ряд требований, причем их приоритет может меняться в зависимости от приложения. Первый вариант – сжатие должно быть выполнено с КС не меньше заданного и с обеспечением максимально высокого качества в соответствии с заданным критерием. Второй вариант – сжатие следует осуществить с качеством не ниже заданного и при этом (как менее жесткое требование) обеспечить по возможности более высокий КС. Дополнительными требованиями могут быть простота программно-аппаратной реализации (что особенно важно при сжатии на борту), масштабируемость и возможность осуществить превью, соответствие стандартам [22, 23] и т.п.

Для обоих указанных выше вариантов приоритета требований необходимо говорить о двух аспектах. Первый – учитывается ли наличие помех при сжатии. Второй – какие критерии используются для того, чтобы охарактеризовать качество сжатых изображений ДЗ.

Если наличие помех не учитывается, то количественные критерии, характеризующие внесенные потери, рассчитываются по отношению к исходному (сжимаемому) изображению. Здесь для гиперспектральных изображений возможны варианты – расчеты могут производиться для всего многомерного массива данных или поканально (отдельно для каждой компоненты). В любом случае при увеличении КС для каждого конкретного изображения показатель (количественный критерий), характеризующий внесенные искажения, ухудшается. Например, среднеквадратическая ошибка (СКОш) искажений увеличивается, а отношение сигнал-шум (ОСШ) или пиковое отношение сигнал-шум уменьшаются.

Для разных групп методов сжатия возникают разные проблемы. Для методов, разработанных на основе стандарта JPEG2000 [24-27], как правило, не сложно обеспечить требуемый КС или параметры, с ним связанные – бит на пиксель или бит на пиксель на канал. Другое дело, что при этом весьма сложно контролировать внесенные искажения, которые, к тому же, могут существенно различаться в зависи-

мости от сложности (детальности, текстурности) сжимаемых изображений. Чем выше сложность, тем большие искажения вносятся при одной и той же степени сжатия. Для методов на основе дискретного косинусного преобразования (ДКП) обеспечить заданное качество проще [28-30], но при этом достаточно сложно предсказать, каким будет КС.

Напомним, что параметром, управляющим сжатием, для кодеров на основе ДКП является шаг квантования (ШК) [31, 32]. Для точного обеспечения качества сжатого изображения в соответствии с заданным критерием (например, ПОСШ или метрикой визуального качества [28-30, 33, 34]) необходимо использовать итеративные процедуры сжатия [30, 35], что может оказаться неприемлемым, особенно на борту. Поэтому можно воспользоваться практическими рекомендациями. В частности, для обеспечения визуально-незаметных искажений для кодера AGU [31, 32] целесообразно устанавливать ШК равным  $QS \approx (I_{\max} - I_{\min})/20$ , где  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальное и минимальное значение изображений в данном канале [28, 29]. При этом, как показали исследования, вносимая СКОш имеет порядок  $MSE \approx (I_{\max} - I_{\min})^2 / (2000 \dots 5000) = QS^2 / (5 \dots 12,5)$ . Значения ШК, превышающие  $QS \approx (I_{\max} - I_{\min})/20$ , приводят к заметному снижению вероятности правильной классификации  $P_{\text{прав}}$  при выполнении этой операции, используя сжатые изображения. При применении меньших ШК  $P_{\text{прав}}$  мало изменяется, но по мере уменьшения ШК снижаются значения КС.

Первые шаги по предсказанию значения КС для кодеров на основе ДКП предприняты в нашей работе [36], где показано, что при определенных условиях можно достаточно точно прогнозировать КС для заданного ШК. Дополнительные сведения для решения задачи даны в работах [37, 38], где авторы показывают, что для кодеров на основе ДКП можно относительно просто обеспечивать КС без использования итеративных процедур. Однако подобные исследования для случая сжатия гиперспектральных данных не проведены.

Рассмотрим теперь особенности сжатия изображений ДЗ с учетом наличия помех. В этом случае необходимо определить понятие оптимальной рабочей точки (ОРТ), впервые введенное в работах [39, 40]. В этих работах показано, что при определенных условиях можно сжать изображение с шумом таким образом (в ОРТ), чтобы декодированное изображение было «максимально похожим» на истинное в соответствии с выбранным критерием (метрикой). Отметим, что ОРТ может существовать для разных типов помех и для разных методов сжатия [39-44]. ОРТ может существовать для традиционных критериев (СКОш и ПОСШ) [39-42]:

$$MSE_{nf}(q) = \sum_{i=1}^{I_{Im}} \sum_{j=1}^{J_{Im}} (I_{qij}^{true} - I_{qij}^{dec})^2 / I_{Im} J_{Im}, \quad (4)$$

$$PSNR_{nf}(q) = 10 \lg [255^2 / MSE_{nf}(q)], \quad (5)$$

а также и для метрик, учитывающих визуальное качество [43]. ОРТ можно характеризовать коэффициентом сжатия  $КС_{OOP}$ ,  $bpp_{OOP}$  или шагом квантования  $QS_{OOP}$ . Эти параметры обычно взаимосвязаны.

Проблема заключается в том, каким образом обеспечить сжатие в окрестности ОРТ на практике, когда истинное изображение отсутствует. Сначала эта проблема была успешно решена для случая аддитивных помех и стандартных критериев [41, 42], причем если метод [41] предусматривает применение итеративной процедуры, то метод [42] обеспечивает неитеративное сжатие (за один шаг). Основой подхода служит установка ШК пропорциональным среднеквадратическому отклонению аддитивных помех, которое полагается известным заранее или оцененным с приемлемой точностью.

Покажем это на конкретных примерах. На рис. 3 показаны зависимости ПОСШ (5), дБ, от ШК (QS) для кодера AGU, примененного к сжатию трех тестовых изображений (Aerial, Airfield, Frisco), искаженных аддитивным гауссовым белым шумом с двумя значениями дисперсии – 100 и 200 (СКО  $\sigma$  соответственно равны 10 и 14,1). Анализ показывает, что для всех кривых есть максимумы, глобальные (если  $PSNR(QS \approx 4\sigma) > PSNR(QS=1)$ ) и локальные (если  $PSNR(QS \approx 4\sigma) < PSNR(QS=1)$ ). Во втором случае формально ОРТ не наблюдается, ситуация имеет место для более сложных по структуре тестовых изображений Aerial и Airfield при дисперсии помех, равной 100. Для всех остальных случаев (зависимостей) ОРТ имеют место, причем они наблюдаются при  $QS \approx 4\sigma$  (40 и 56 для рассматриваемых СКО).

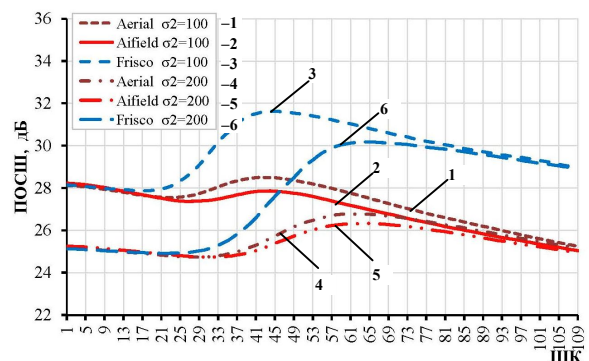


Рис. 3. Зависимости ПОСШ (5) от ШК для трех тестовых изображений и двух значений дисперсии аддитивных помех



Приведенный пример показывает, что наличие или отсутствие ОПТ существенно зависит от степени сложности сигнальной компоненты изображения и уровня помех. Недавно нами была предложена методика, позволяющая еще до начала сжатия оценить значение  $\Delta\text{PSNR} = \text{PSNR}(QS \approx 4\sigma) - \text{PSNR}(QS=1)$  [45]. Такое предсказание основывается на предварительном получении аппроксимирующей (предсказывающей) кривой путем ее вписывания в скаттерограмму (см. пример на рис. 4). В качестве входного параметра в данном случае служит  $P_{2\sigma}$  – вероятность того, что модульные значения ДКП-коэффициентов в блоках  $8 \times 8$  пикселей не превышают  $2\sigma$ . В качестве аппроксимирующей функции использован полином пятой степени, который вписан в скаттерограмму с высоким качеством. Как видно, вероятность наличия ОПТ ( $\Delta\text{PSNR} > 0$ ) велика при  $P_{2\sigma} > 0,82$ . Если это условие не выполняется, то для обеспечения более высокого качества сжатого изображения можно использовать  $QS < 4\sigma$ , например  $QS \approx 2\sigma$  [45].

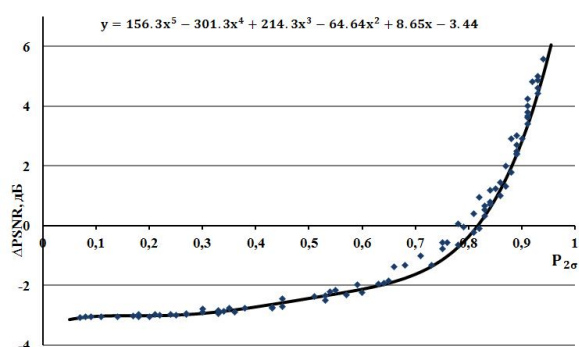


Рис. 4. Скаттерограмма зависимости  $\Delta\text{PSNR}$  от  $P_{2\sigma}$  и аппроксимирующий полином

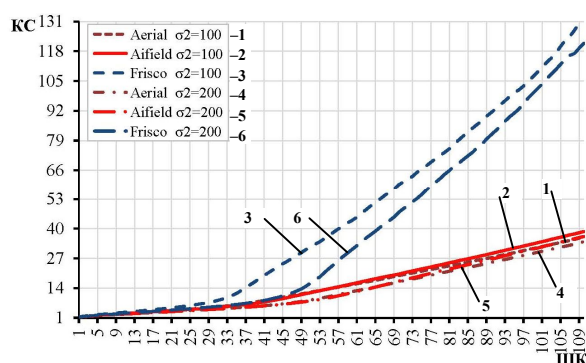


Рис. 5. Зависимости КС от ШК для трех тестовых изображений и двух значений дисперсии аддитивных помех

При сжатии в окрестности ОПТ важно также проанализировать достигаемые значения КС. Зависимости КС от ШК приведены на рис. 5. При дисперсии, равной 100, значения КС для ШК=40 лежат в пределах от 7 для изображений с достаточно

сложной структурой до 20 для сравнительно простого тестового изображения Frisco. При дисперсии помех, равной 200, значения КС для ШК=56 изменяются от 11 для более сложных тестовых изображений до 25 для более простого. Таким образом, достигаемый КС зависит от степени сложности изображения и уровня помех. Тогда при сжатии данного изображения с заданным КС (как это делается в JPEG2000) практически гарантированно окажется, что этот КС отличается от  $КС_{\text{ОПТ}}$ . В связи с этим актуальной является задача обеспечения сжатия зашумленных изображений в окрестности ОПТ стандартом JPEG2000 и аналогичными методами сжатия. Решить ее можно, используя итеративные процедуры [41], но хотелось бы обойтись без них.

Ситуация дополнительно усложняется для сигнално-зависимых помех. Положительным моментом является то, что для изображений, искаженных этими типами помех, как правило, существуют вариационно-стабилизирующие преобразования, которые позволяют после соответствующего прямого преобразования получить изображения, искаженные аддитивными помехами [44–47]. Применение таких преобразований позволяет выполнять автоматическое сжатие с обеспечением компрессии в окрестности ОПТ, причем как поканально, так и с объединением каналов в группы. Такое объединение позволяет заметно (до двух и более раз) повысить КС по сравнению с отдельной обработкой компонент [47] и достигать более высокого качества сжатых изображений [48]. К сожалению, не ясно, как наилучшим образом объединять изображения в группы и как обеспечивать желаемый КС при таком трехмерном сжатии изображений методами на основе ДКП. Кроме того, насколько нам известно, трехмерные модификации JPEG2000 не применялись к сжатию гиперспектральных изображений совместно с предварительной обработкой на основе вариационно-стабилизирующих преобразований. В этих направлениях автоматизации предстоит большая работа.

### 3. Особенности автоматизации при фильтрации многоканальных изображений

Фильтрация является еще одной операцией обработки многоканальных изображений ДЗ [11, 49]. С одной стороны, литература по фильтрации изображений очень обширна. С другой стороны, число публикаций по фильтрации гиперспектральных изображений ограничено вследствие ряда причин. Назовем основные из них. Прежде всего, для многих каналов качество первичных изображений настолько высоко, что их фильтрация представляется нецелесообразной [11]. Во-вторых, помехи, как отмечено

в разделе 1, имеют весьма специфические свойства, которые редко рассматриваются в литературе, посвященной фильтрации. В-третьих, не совсем ясно, где лучше выполнять фильтрацию (если ее вообще нужно выполнять) – на борту носителя до сжатия и сброса данных ДЗ на Землю или уже в наземных пунктах обработки.

Возражения против обработки на борту таковы: фильтрация должна выполняться в полностью автоматическом режиме, что сложно [50]; выполнение фильтрации требует дополнительных вычислительных ресурсов; после выполнения фильтрации на борту сложно что-то «поправить» в данных при их дополнительной обработке на Земле. Возражения против обработки на Земле следующие: фильтрация оказывается менее эффективной, если предварительно изображения подвергнуты сжатию с потерями [50]. В этом плане нужна определенная согласованность между параметрами сжатия с потерями и фильтрацией, что не всегда возможно. Имеются лишь первичные результаты по данному направлению [51], в соответствии с которыми фильтрация на Земле может быть эффективной только если сжатие выполнено с КС примерно вдвое меньшим, чем сжатие в окрестности ОПТ.

Поэтому ниже рассмотрим особенности фильтрации в предположении, что она выполняется на борту или применяется на Земле к изображениям, которые не искажены сжатием с потерями. Прежде всего, отметим, что последние исследования показали, что фильтрация необходима не всегда [52-54]. Есть такие ситуации (текстурные изображения и невысокий уровень помех), для которых даже самые совершенные из существующих методов фильтрации не способны обеспечить достаточно большое значение  $\Delta\text{PSNR}$  (разность между значениями ПОСШ после фильтрации и до обработки). Поэтому задача может быть сформулирована следующим образом. Для конкретного компонентного изображения необходимо быстро и надежно решить, имеет ли смысл его фильтровать. Смысл есть, если прогнозируемое значение  $\Delta\text{PSNR}$  достаточно велико, например больше 1 дБ. В противном случае изображение можно не фильтровать, что экономит ресурсы и время.

Аспекты предложенного подхода к прогнозированию достаточно подробно рассмотрены в работах [52, 54]. Поэтому кратко остановимся на методике и полученных результатах. По аналогии с прогнозированием для сжатия с потерями, сначала (в off-line режиме) получают аппроксимирующую кривую. Пример показан на рис. 6. В качестве аргумента снова использована вероятность  $P_{2\sigma}$ , хотя возможны и другие варианты [52]. При расчете этой вероятности должны быть учтены тип и параметры

шума [52, 54]. По аналогии с аппроксимацией для сжатия (рис. 4),  $\Delta\text{PSNR}$  возрастает при увеличении  $P_{2\sigma}$ , становясь достаточно большим при  $P_{2\sigma} > 0,5$ . Анализ показал, что для примерно 15% спектральных каналов гиперспектральных изображений применение предварительной фильтрации является целесообразным. Вместе с тем, практически не исследовано влияние неточности оценивания параметров сигнально-зависимых помех на точность прогнозирования. Более обоснованным должен быть и выбор параметров, используемых при прогнозировании.

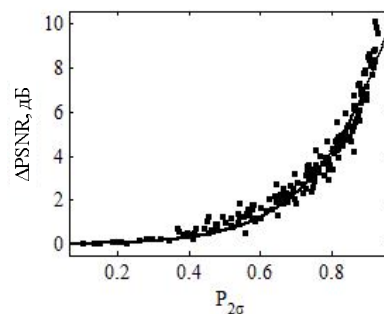


Рис. 6. Скаттерограмма зависимости  $\Delta\text{PSNR}$  от  $P_{2\sigma}$  и аппроксимирующая функция

Результаты исследований в работе [52] показали, что существенного положительного эффекта можно достичь, используя совместную фильтрацию изображений в нескольких каналах. Эффективность такой фильтрации можно предсказывать, используя описанные выше принцип и параметры. При сигнально-зависимом характере помех эффективную фильтрацию можно выполнять, применяя предварительные вариационно-стабилизирующие преобразования с индивидуальными параметрами в обрабатываемых спектральных каналах [49]. При достаточно высоком уровне помех в исходных изображениях применение фильтрации способно привести к заметному росту  $P_{\text{прав}}$ .

Однако в области фильтрации гиперспектральных изображений есть ряд актуальных задач, требующих решения в ближайшей перспективе. Например, для достижения эффективной фильтрации в одном или нескольких каналах с высоким уровнем помех можно использовать изображения в каналах с высоким ОСШ. Однако неясно, сколько таких каналов желательно использовать и как их выбирать. Вторая актуальная задача – как организовать сжатие с потерями отфильтрованных изображений? С одной стороны, отфильтрованные изображения обычно сжимаются лучше, чем неотфильтрованные. С другой – желательно не допустить существенного ухудшения качества отфильтрованных изображений при применении сжатия с потерями. Возникает вопрос – какие параметры сжатия с потерями при этом использовать, чтобы достичь поставленной цели.

## Заключение

В статье обоснованы и сформулированы проблемы и частные задачи, которые возникают при стремлении автоматизировать обработку гиперспектральных изображений и перенести часть операций на борт носителя системы ДЗ. Основное внимание уделено автоматической оценке параметров сложных помех, сжатую с потерями и фильтрации изображений. Показано, что круг задач, требующих решения, широк и разнообразен, хотя по ряду направлений имеются первичные предложения и идеи.

## Литература

1. Chang, C. I. *Hyperspectral Data Exploitation: Theory and Applications [Text]* / C. I. Chang. – Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2007. – 456 p.
2. Райкунов, Г. Г. *Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании [Текст]* / Г. Г. Райкунов, В. Л. Щербаков. – М.: ООО «Физматлит», 2014. – 136 с.
3. Christophe, E. *Hyperspectral Data Compression Tradeoff [Text]* / E. Christophe // *Optical Remote Sensing in Advances, Signal Processing and Exploitation Techniques* / Eds.: S. Prasad, L. M. Bruce, J. Channusot. – Springer, 2011. – P. 9-29.
4. Yu, G. *Image Compression Systems on Board Satellites [Text]* / G. Yu, T. Vladimirova, M. N. Sweeting // *Acta Astronautica*. – 2009. – Vol. 64, No. 9-10. – P. 988-1005.
5. Van Zyl Marais, I. *On-Board Image Quality Assessment for a Small Low Earth Orbit Satellite [Text]* / I. Van Zyl Marais, W. H. Steyn, J. A. du Preez // *Proc. of the 7th IAA Symp. on Small Satellites for Earth Observation*. – Berlin, Germany, 2009. – 7 p.
6. Schowengerdt, R. *Remote Sensing [Text]* / R. Schowengerdt // *Models and Methods for Image Processing*. – Orlando, FL: Academic Press, 2006. – 560 p.
7. Lukin, V. *Challenges in Pre-processing Multichannel Remote Sensing Terrain Images [Text]* / V. Lukin, E. Bataeva // *Importance of GEO initiatives and Montenegrin capacities in this area*. – Montenegro, 2012. – P. 63-76.
8. *Methods and automatic procedures for processing images based on blind evaluation of noise type and characteristics [Text]* / V. Lukin, S. Abramov, N. Ponomarenko, M. Uss, M. Zriakhov, B. Vozel, K. Chehdi, J. Astola // *SPIE Journal on Advances in Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 5, No. 1. – 27 p. – Doi: 10.1117/1.3539768.
9. *Approaches to Automatic Data Processing in Hyperspectral Remote Sensing [Text]* / V. Lukin, S. Abramov, N. Ponomarenko, S. Krivenko, M. Uss, B. Vozel, K. Chehdi, K. Egiazarian, J. Astola // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2014. – Vol. 73, No. 13. – P. 1125-1139.
10. Öktem, R. *Observing atmospheric clouds through stereo reconstruction [Text]* / R. Öktem, D. M. Roms // *Proc. of Three-Dimensional Image Processing, Measurement and Applications*. – USA, San Francisco, 2015. – Vol. SPIE 9393. – 10 p.
11. Zhong, P. *Multiple-Spectral-Band CRFs for Denoising Junk Bands of Hyperspectral Imagery [Text]* / P. Zhong, R. Wang // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 51(4). – P. 2269-2275.
12. *Maximum likelihood estimation of spatially correlated signal-dependent noise in hyperspectral images [Text]* / M. Uss, B. Vozel, V. Lukin, K. Chehdi // *Optical Engineering*. – 2012. – Vol. 51, No. 11. – 12 p. – Doi: 10.1117/1.OE.51.11.111712.
13. *Methods for Blind Estimation of the Variance of Mixed Noise and Their Performance Analysis [Text]* / S. Abramov, V. Zabrodina, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi, J. Astola // *Numerical Analysis – Theory and Applications* / Ed.: J. Awrejcewicz. – Austria: In-Tech, 2011. – P. 49-70. – ISBN 978-953-307-389-7.
14. *Modeling and estimation of signal-dependent noise in hyperspectral imagery [Text]* / J. Meola, M. T. Eismann, R. L. Moses, J. N. Ash // *Applied Optics*. – 2011. – Vol. 50, No. 21. – P. 3829-3846.
15. Kerekes, J. P. *Hyperspectral Imaging System Modeling [Text]* / J. P. Kerekes, J. E. Baum // *Lincoln Laboratory Journal*. – 2003. – Vol. 14, No. 1. – P. 117-130.
16. *On Noise Properties in Hyperspectral Images [Text]* / S. Abramov, M. Uss, V. Abramova, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proc. of IGARSS*. – Milan, Italy, 2015. – P. 3501-3504.
17. *On required accuracy of mixed noise parameter estimation for image enhancement via denoising [Text]* / V. V. Abramova, S. K. Abramov, V. V. Lukin, K. O. Egiazarian, J. T. Astola // *EURASIP Journal on Image and Video Processing*. – 2014. – Vol. 2014:3. – P. 1-16. – Doi: 10.1186/1687-5281-2014-3.
18. Abramova, V. V. *Multistage Iterative Method for Blind Evaluation of Mixed Noise Characteristics on Images [Text]* / V. V. Abramova, S. K. Abramov, V. V. Lukin // *ITS*. – 2015. – Vol. 6, No. 1. – P. 8-14.
19. *Scatter-plot Based Estimation of Mixed Noise Parameters for Remote Sensing Image Processing [Text]* / V. V. Abramova, S. K. Abramov, V. V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proc. of the 5-th World Congress "Aviation in the XXI-st Century"*, Kiev, Ukraine, 2012. – Vol. 2. – P. 3.7.56-3.7.60.
20. Magli, E. *Optimized onboard lossless and near-lossless compression of hyperspectral data using CALIC [Text]* / E. Magli, G. Olmo, E. Quacchio // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2004. – Vol. 1, No. 1. – P. 21-25.



21. Aiazzi, B. Near lossless compression of 3-D optical data [Text] / B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2001. – Vol. 39, No. 11. – P. 2547–2557.
22. Blanes, I. A tutorial on Image Compression on Optical Space Imaging Systems [Text] / I. Blanes, E. Magli, J. Serra-Sagrisat // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2014. – Vol. 2, No. 3. – P. 8-26.
23. Performance impact of parameter tuning on the CCSDS-123 lossless multi- and hyperspectral image compression standard [Text] / E. Auge, J. E. S'anchez, A. Kiehy, I. Blanes, J. Serra-Sagrista // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 7, No. 1. – 16 p.
24. Said, A. A new fast and efficient image codec based on the partitioning in hierarchical trees [Text] / A. Said, W. Pearlman // *IEEE Trans. on Circuits Syst. Video Technology*. – 1996. – Vol. 6. – P. 243-250.
25. Taubman, D. JPEG2000: Image Compression Fundamentals, Standards, and Practice [Text] / D. Taubman, M. Marcellin. – USA: Kluwer, 2001. – 777 p.
26. Dragotti, P. Compression of multispectral images by three-dimensional SPIHT algorithm [Text] / P. Dragotti, G. Poggi, A. Ragozini // *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2000. – Vol. 38, No. 1. – P. 416-428.
27. Progressive 3D coding of hyperspectral images based on JPEG 2000 [Text] / B. Penna, T. Tillo, E. Magli, G. Olmo // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. – 2006. – Vol. 3, No. 1. – P. 125-129.
28. Lossy compression of images without visible distortions and its applications [Text] / V. Lukin, M. Zriakhov, S. Krivenko, N. Ponomarenko, Z. Miao // *Proc. of ICSP, Beijing, 2010*. – P. 694-697.
29. Сжатие гиперспектральных изображений с потерями и их классификация [Текст] / В. В. Лукин, М. С. Зряхов, С. С. Кривенко, С. А. Станкевич, М. А. Попов, Л. П. Лиценко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – X: ХАИ, 2011. – № 1/79. – С. 92-100.
30. Still Image/Video Frame Lossy Compression Providing a Desired Visual Quality [Text] / A. Zemliachenko, N. Ponomarenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Multidimensional Systems and Signal Processing*. – 2015. – 22 p. – DOI10.1007/s11045-015-0333-8.
31. DCT Based High Quality Image Compression [Text] / N. N. Ponomarenko, V. V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Proc. of 14th Scandinavian Conference on Image Analysis*. – Finland, June 2005. – P. 1177-1185.
32. AGU - DCT Based High Quality Image Compression [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.ponomarenko.info/agu.htm> (2.05.2008).
33. On between-coefficient contrast masking of DCT basis functions [Text] / N. Ponomarenko, F. Silvestri, K. Egiazarian, M. Carli etc. // *CD-ROM Proc. of the Third Int. Workshop on Video Processing and Quality Metrics*. – USA, 2007. – 4 p.
34. Wang, Z. Multi-scale Structural Similarity for Visual Quality Assessment [Text] / Z. Wang, E. P. Simoncelli, A. C. Bovik // *Proc. of the 37th IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*. – Monterey, 2003. – Vol 2. – P. 1398-1402.
35. Automated Software Tool for Compressing Optical Images with required Output Quality [Text] / S. Krivenko, A. Zemliachenko, V. Lukin, A. Zelensky // *Proc. of XIIth Intentional Conference on CADSM*. – Polyana-Svalyava, Ukraine, 2013. – P. 184-187.
36. Compression Ratio Prediction in Lossy Compression of Noisy Images [Text] / A. Zemliachenko, S. Abramov, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proc. of IGARSS*. – Milan, Italy, 2015. – P. 3497-3500.
37. He, Z. A Linear Source Model and a Unified Rate Control Algorithm for DCT Video Coding [Text] / Z. He, S.K. Mitra // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. – 2002. – Vol. 12, No 11. – P. 970-982.
38. Осокин, А. Н. Модифицированный кодер стандарта JPEG с контролем битрейта [Text] / А. Н. Осокин, Д. В. Сидоров // *Интернет-журнал «Науковедение»*. – 2013. – № 5. – 9 с.
39. Al-Chaykh, O. K. Lossy compression of noisy images [Text] / O. K. Al-Chaykh, R. M. Mersereau // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 1998. – Vol. 7, No. 12. – P. 1641-1652.
40. Chang, S. G. Adaptive wavelet thresholding for image denoising and compression [Text] / S. G. Chang, B. Yu, M. Vetterli // *IEEE Trans. on Image Processing*. – 2000. – Vol. 9, No 9. – P. 1532-1546.
41. Lossy compression of images with additive noise [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian etc. // *Proc. of International Conference on Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*. – Antwerpen, Belgium, 2005. – P. 381-386.
42. Estimation of accessible quality in noisy image compression [Text] / N. Ponomarenko, V. Lukin, M. Zriakhov, K. Egiazarian, J. Astola // *CD-ROM Proc. EUSIPCO*. – Italy, 2006. – 4 p.
43. Lossy Compression of Noisy Images Based on Visual Quality: a Comprehensive Study [Text] / N. Ponomarenko, S. Krivenko, V. Lukin, K. Egiazarian, J. Astola // *Open access paper in: EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*. – 2010. – ID 976436. – 13 p.
44. An Automatic Approach to Lossy Compression of Images Corrupted by Poisson Noise [Text] / V. V. Lukin, M. S. Zriakhov, N. N. Ponomarenko, A. Kaarna // *Proc. Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium MRRS-2008*. – Kiev, Sept 2008. – P. 139-142.
45. Lossy compression of noisy remote sensing images with prediction of optimal operation point existence and parameters [Text] / A. Zemliachenko, S. Abramov, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *SPIE Journal on Applied Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 9, No. 1. – P. 095066-1-095066-26.

46. *VST-based Lossy Compression of Hyperspectral Data for New Generation Sensors [Text]* / A. N. Zemliachenko, R. A. Kozhemiakin, M. L. Uss, S. K. Abramov, V. V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proc. of SPIE Symposium on Remote Sensing. – Dresden, Germany, 2013. – SPIE Vol. 8892. – 12 p. – Doi:10.1117/12.2028415.*

47. *Lossy Compression of Hyperspectral Images Based on Noise Parameters Estimation and Variance Stabilizing Transform [Text]* / A. N. Zemliachenko, R. A. Kozhemiakin, M. L. Uss, S. K. Abramov, N. N. Ponomarenko, V. V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Applied Remote Sensing. – 2014. – Vol. 8, No. 1. – 25 p. – Doi: 10.1117/1.JRS.8.083571.*

48. *Peculiarities of 3D Compression of Noisy Multichannel Images [Text]* / R. Kozhemiakin, S. Abramov, V. Lukin, I. Djurović, B. Vozel // *Proc. of MECO. – Budva, Montenegro, 2015. – P. 331-334.*

49. *Analysis of classification accuracy for pre-filtered multichannel remote sensing data [Text]* / V. Lukin, S. Abramov, S. Krivenko, A. Kurekin, O. Pogrebnyak // *Expert Systems with Applications. – 2013. – Vol. 40. – P. 6400-6411.*

50. *Nonparametric Multiscale Blind Estimation of Intensity-Frequency-Dependent Noise [Text]* / M. Colom, M. Lebrun, A. Buades, J. M. Morel // *IEEE Transactions on Image Processing. – 2015. – Vol. 24, No. 10. – P. 3162-3175. – Doi: 10.1109/TIP.2015.2438537.*

51. *Lukin, V. Processing of Multichannel RS data for Environment Monitoring [Text]* / V. Lukin // *Proc. of NATO Advanced Research Workshop on Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security. – Trento, Italy, July 2009. – P. 129-138.*

52. *Performance Prediction for 3D Filtering of Multichannel Images [Text]* / O. Rubel, R. Kozhemiakin, S. Abramov, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Image and Signal Processing for Remote Sensing XXI. – Toulouse, France, 2015. – P. 96430D-96430D-11. – Doi:10.1117/12.2193976.*

53. *Chatterjee, P. Is denoising dead? [Text]* / P. Chatterjee, P. Milanfar // *IEEE Transactions on Image Processing. – 2010. – Vol. 19, No. 4. – P. 895-911.*

54. *Prediction of DCT-based Denoising Efficiency for Images Corrupted by Signal-Dependent Noise [Text]* / S. Krivenko, V. Lukin, B. Vozel, K. Chehdi // *Proc. of IEEE 34th International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology. – Kiev, Ukraine, 2014. – P. 254-258.*

*Поступила в редакцію 5.10.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015*

## ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ОБРОБКИ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

**С. К. Абрамов, В. В. Лукін**

Проаналізовано особливості обробки зображень гіперспектрального дистанційного зондування з аерокосмічних носіїв. Вказано проблеми, що виникають при виконанні основних операцій обробки (оцінюванні характеристик завад, фільтрації, стисненні з втратами). Розглянуто можливості автоматизації цих операцій. Позначено задачі, які можна вважати вирішеними, й напрямки, за якими необхідно проводити додаткові дослідження. Наведено приклади ефективного вирішення окремих задач з використанням процедур прогнозування параметрів, що характеризують ефективність фільтрації та стиснення з втратами.

**Ключові слова:** обробка зображень, гіперспектральне дистанційне зондування, автоматизація.

## CHALLENGES OF REMOTE SENSING HYPERSPECTRAL IMAGE PROCESSING AUTOMATIZATION

**S. K. Abramov, V. V. Lukin**

The peculiarities of processing of air- and spaceborne remote sensing hyperspectral images are analyzed. The main problems inherited to stages of image processing chain (blind noise characteristics evaluation, filtering, lossy compression) are mentioned. The main approaches to automation of these stages are discussed. The tasks that can be marked as solved and main approaches for additional future research are specified. The examples of effective solving the particular tasks using procedures for filtering and lossy compression effectiveness prediction are given.

**Keywords:** image processing, hyperspectral remote sensing, automation.

**Абрамов Сергей Клавдиевич** – канд. техн. наук, доцент, докторант каф. «Приема, передачі и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: ask379@mail.ru.

**Лукін Владимир Васильевич** – д-р техн. наук, проф., проф. каф. «Приема, передачі и обработки сигналов», Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина, e-mail: lukin@xai.kharkov.ua.