

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

УДК 528.8, 528.854 DOI 10.30894/issn2409-0239.2022.9.4.26.35

**Влияние импульсных помех на качество данных
и информационных продуктов ДЗЗ**

А. Н. Марков, *an@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. И. Васильев, *к. ф.-м. н., a.vasilyev@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. А. Евлашкин, *ma@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

А. К. Гончаров, *к. т. н., gontcharov@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

С. А. Ежов, *д. т. н., sa@ntsomz.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье рассматривается влияние импульсных помех на качество данных и формируемых на их основе информационных продуктов ДЗЗ. Для оценки влияния помех в зависимости от масштаба исследуемого объекта/явления выполнено их моделирование на изображении NDVI, сформированном по данным КМСС КА «Метеор-М», и проведен анализ его сопоставления с изображением без помех. По результатам анализа предложен функциональный показатель качества изображения в виде процентного распределения количества окрестностей импульсных помех в зависимости от величины кросс-корреляции. Демонстрируется существенное влияние импульсных помех при размерах анализируемых окрестностей менее 32×32 пикселей. С целью уменьшения такого влияния рассматриваются алгоритмы дополнительной обработки изображений спектральных каналов. Полученные результаты обработки демонстрируют существенное улучшение качества изображений: влияние импульсных помех наблюдается при размерах объектов менее 4×4 пикселя. В заключении отмечается, что дополнительная обработка позволяет в том числе компенсировать снижение требований к достоверности принимаемой информации.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, «Метеор-М», качество изображений, данные ДЗЗ, достоверность космической информации, импульсные помехи

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

Impact of Impulse Noise on the Quality of Remote Sensing Data and Information Products

A. N. Markov, *man@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. I. Vasilyev, *Cand. Sci. (Phys.-Math.)*, *a.vasilyev@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. A. Evlashkin, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

A. K. Goncharov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *gontcharov@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

S. A. Ezhov, *Dr. Sci. (Engineering)*, *nova@ntsomz.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The article considers the influence of impulse noise on the quality of data and information products of remote sensing formed on their basis. To assess the influence of interference depending on the scale of the object/phenomenon under study, their modeling was performed on the NDVI image formed according to the data of the ERS Meteor-M spacecraft, and an analysis was made of its comparison with the image without interference. Based on the results of the analysis, an image quality criterion is proposed in the form of a percentage distribution of the number of impulsive noise vicinities depending on the cross-correlation value. A significant influence of impulse noise is demonstrated, when the sizes of the analyzed vicinities are less than 32×32 pixels. In order to reduce this influence, algorithms for additional processing of images of spectral channels are considered. The obtained processing results demonstrate a significant improvement in image quality: the influence of impulse noise is observed when the object size is less than 4×4 pixels. In conclusion, it is noted that additional processing allows, among other things, to compensate for the reduction in requirements for the reliability of the received information.

Keywords: remote sensing of the Earth, Meteor-M, image quality, reliability of space information, impulse noise detector

Введение

В ходе приема космической информации дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на антенные комплексы отмечаются ее частичные потери вследствие ошибок наведения, сбоя радиолинии, поглощения в среде и др. Для устранения данных проблем за рубежом массово применяются различные помехоустойчивые алгоритмы кодирования данных, например коды Хэмминга, Рида-Соломона и другие. В свою очередь, отечественная отрасль ДЗЗ до настоящего времени (2022 г.) не для всех космических систем (КС) ДЗЗ применяет данные подходы, ограничиваясь лишь контролем потерь. Как следствие, для принимаемой космической информации является обязательным критерием ее достоверность, которая, в свою очередь, определяет повышенные требования к характеристикам антенных комплексов.

Под показателем достоверности понимается отношение количества потерянных/ошибочных данных в ходе приема космической информации к общему количеству принятых данных, и он же является верхней границей количества потерянных/ошибочных данных. Для космической информации, принимаемой с российских КС ДЗЗ на антенные комплексы, показатель достоверности задается, как правило, не более 10^{-6} . При этом если принять за единицу потери информации пиксель изображения спектрального канала данных ДЗЗ, то применительно к условным кадрам (сценам) маршрута съемки космических аппаратов (КА) типа «Метеор-М» (см. рис. 1) в табл. 1 приведены типовые количественные показатели потерь для показателей достоверности 10^{-5} и 10^{-6} .

В действительности единицей потери информации является бит. В таком случае количество потерянных данных будет увеличено на порядок (в 10 раз!) для оценок табл. 1, поскольку для КА типа «Метеор-М» значения цифровых отсчетов пикселя имеют динамический диапазон в 10–12 бит.

Учитывая, что для устранения шумов и импульсных помех на изображениях исследователями разработаны специализированные методы, в частности [1–4], далее в рамках статьи выполняется анализ влияния импульсных помех на качество данных и создаваемых на их основе информацион-

Таблица 1. Пример оценки количества пиксельных потерь условных кадров (сцен) МСУ-МР и КМСС маршрута съемки КА типа «Метеор-М» для различных показателей достоверности

Сенсоры КА	Размер кадра, пикс.	Потери кадра, количество пикс.	
		10^{-6}	10^{-5}
МСУ-МР «Метеор-М»	3000×3000	9	90
КМСС «Метеор-М»	$12\,000 \times 8000$	96	960

ных продуктов ДЗЗ с целью определения границ применимости этой информации в зависимости от показателя достоверности. Кроме того, демонстрируются подходы к дополнительной обработке космической информации с целью повышения ее качества (в части устранения импульсных помех).

Влияние импульсных помех на качество информационных продуктов ДЗЗ

Применение данных и информационных продуктов ДЗЗ при решении прикладных тематических задач в том числе связано с оценкой количественных показателей уровня вегетации в виде средневзвешенных величин для исследуемых районов интереса. В качестве таких показателей традиционно используются вегетационные индексы [5, 6], подбираемые эмпирически (с использованием спектральных кривых отражения) для исследуемых явлений и вычисляемые на основе отношений линейных или нелинейных комбинаций величин коэффициентов спектральной яркости соответствующих спектральных каналов съемочных систем ДЗЗ. Соответственно наблюдаемые импульсные помехи для регистрируемой на антенные комплексы информации ДЗЗ в том числе будут оказывать влияние на показатели уровня вегетации для районов интереса.

Далее влияние импульсных помех на качество информационных продуктов ДЗЗ рассмотрим



Рис. 1. Пример маршрута съемки и условных кадров

на примере нормализованного разностного вегетационного индекса:

$$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_{RED}) / (\rho_{NIR} + \rho_{RED}),$$

где ρ_{NIR} — коэффициент спектральной яркости для ближнего инфракрасного диапазона,

ρ_{RED} — коэффициент спектральной яркости для красного диапазона.

Данный индекс получил наибольшее распространение и является основой для ряда других вегетационных индексов. В табл. 2 приведены соот-

ношения различных вегетационных индексов, демонстрирующих соответствие формуле NDVI с точностью до отдельных функциональных преобразований (степенных, мультипликативных или аддитивных поправок) и/или выбора спектральных каналов.

Пример информационного продукта NDVI, сформированного на основе данных КМСС КА «Метеор-М» № 2-2 с использованием технологий «Банка базовых продуктов» [7], приведен на рис. 2. Для данного информационного продукта характерен допустимый диапазон значений $[-1 \dots 1]$. При этом растительности соответствует интервал $[0,3 \dots 0,8]$, почве $[0,1 \dots 0,2]$, воде около нуля либо отрицательные значения. Учитывая, что точность вычисления NDVI по данным российских КС ДЗЗ [8,9], относительно продуктов зарубежных КС ДЗЗ составляет около 0,07, то дополнительная оценка влияния импульсных помех на размер рассматриваемых районов интереса позволит определить границы применимости данных и информационных продуктов российских КС ДЗЗ при решении тематических задач с заданной достоверностью.

Результаты моделирования импульсных помех для различных показателей достоверности приведены на рис. 3. При этом в качестве исходных данных спектральных каналов использовались геопривязанные данные КМСС (см. рис. 2). Алгоритм моделирования помех включал следующие основные этапы: 1) случайный выбор пиксельных координат на изображении спектрального канала с последующей инверсией случайного бита для значения цифрового отсчета в спектральном канале; 2) формирование информационного продукта осуществляется на основе изображений спектральных каналов с учетом импульсных помех. В данном случае вероятность ошибки в битовом потоке определяет

Таблица 2. Примеры вегетационных индексов

Вегетационный индекс	Формула
Инфракрасный вегетационный индекс	$IPVI = (NDVI + 1)/2$
Трансформированный вегетационный индекс	$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$
Перенормированный разностный вегетационный индекс	$RDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\sqrt{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}}$
Нормализованная разность для RedEdge диапазона	$NDRE = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED\,EDGE}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED\,EDGE}}$
Нормализованный разностный вегетационный индекс для Green диапазона	$GNDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{GREEN}}{\rho_{NIR} + \rho_{GREEN}}$
Вегетационный индекс широкого динамического диапазона	$WDRVI = \frac{\alpha \cdot \rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\alpha \cdot \rho_{NIR} + \rho_{RED}}$
Простое отношение	$SR = \rho_{NIR} / \rho_{RED}$
Вегетационный индекс хлорофилла	$CI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED\,EDGE}}{\rho_{RED\,EDGE}}$

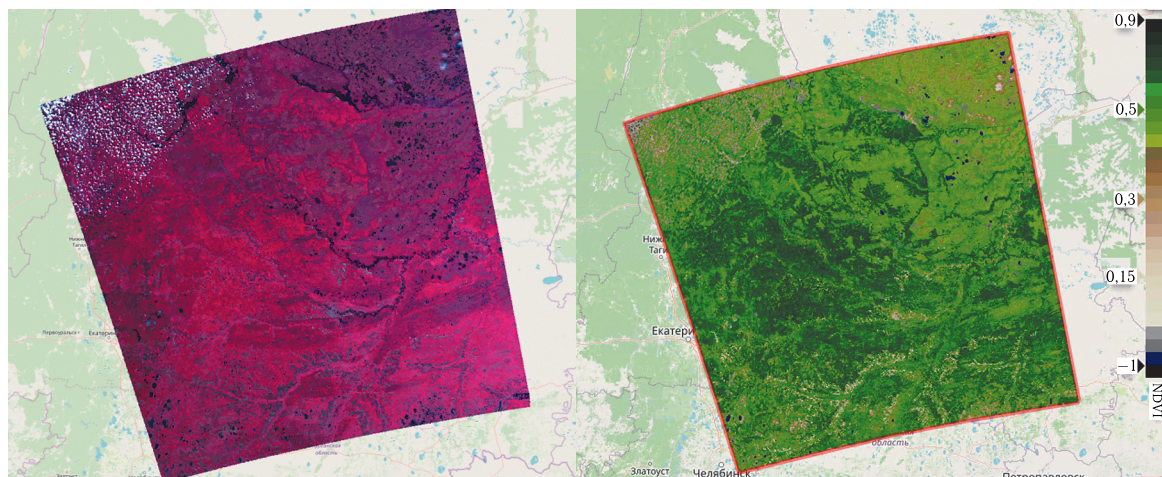


Рис. 2. Данные КМСС КА «Метеор-М» № 2-2 (слева, порядок каналов — псевдоцвета), используемые для моделирования, и NDVI (справа), сформированный на основе этих данных

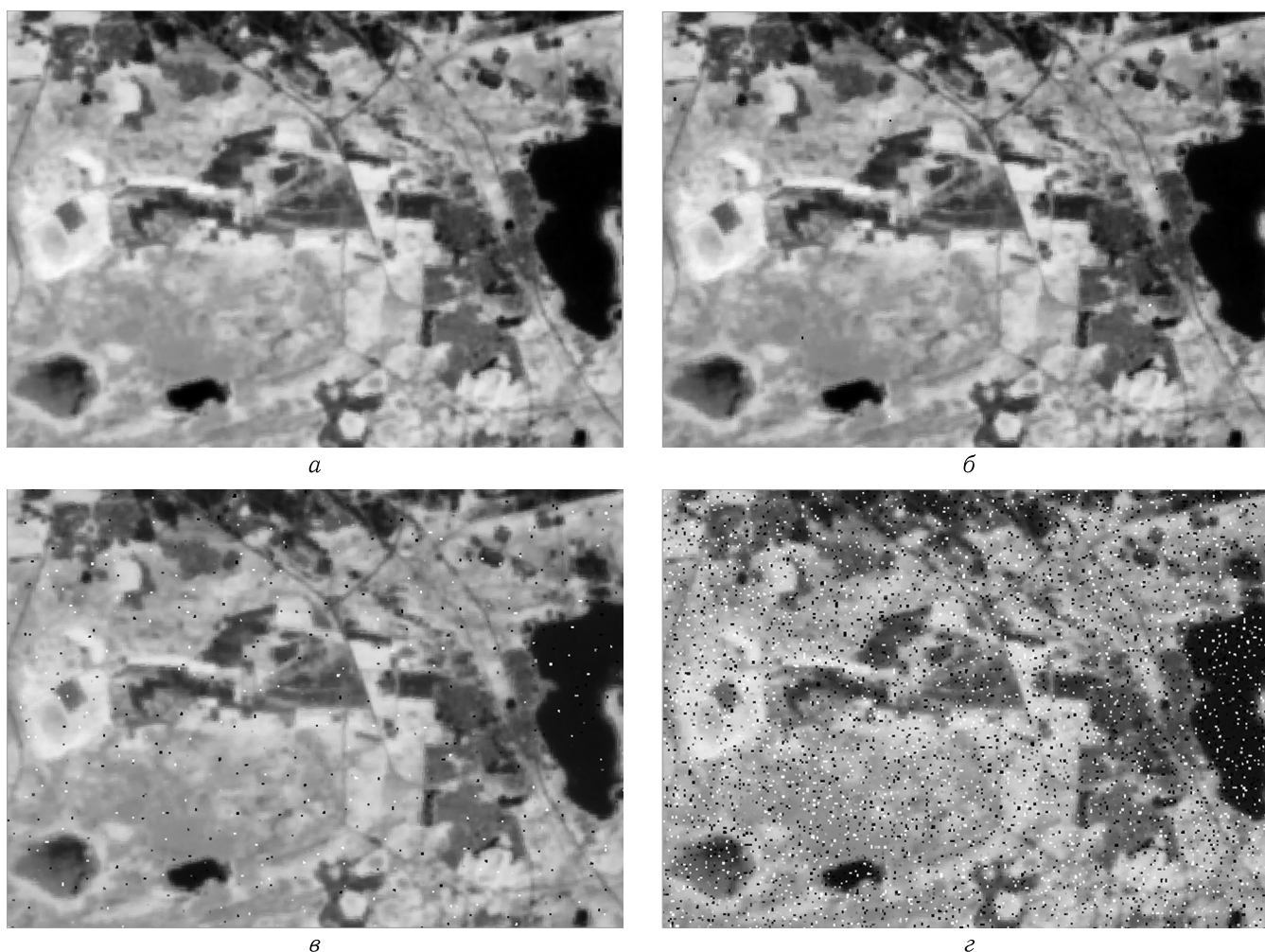


Рис. 3. Пример продукта NDVI (280×200 пикс.), представленного в градациях серого и сформированного по данным КМСС КА «Метеор-М» № 2-2, при моделировании помех для различных показателей достоверности (a — без помех, $б$ — 10^{-6} , $в$ — 10^{-4} , $г$ — 10^{-2})

Таблица 3. Метрики сопоставления, используемые для оценки влияния импульсных помех на качество информационного продукта ДЗЗ (DN — значение цифрового отсчета (для пикселя), $*$ — определяет пиксели искаженного изображения, N^2 — количество пикселей окрестности, $\langle \blacksquare \rangle$ — среднее значение для окрестности, MAX — максимальное значение динамического диапазона)

Метрика	Формула
Среднеквадратическое отклонение	$MSE = \sqrt{\frac{\sum (DN - DN^*)^2}{N^2}}$
Отношение сигнал–шум	$PSNR = 20 \cdot \lg \left(\frac{MAX}{MSE} \right)$
Нормированное скалярное произведение	$NPROD = \frac{\sum DN \cdot DN^*}{\sqrt{\sum (DN)^2 \cdot \sum (DN^*)^2}}$
Кросс-корреляция	$CCORR = \frac{\sum (DN - \langle DN \rangle) \cdot (DN^* - \langle DN^* \rangle)}{\sqrt{\sum (DN - \langle DN \rangle)^2 \cdot \sum (DN^* - \langle DN^* \rangle)^2}}$

размеры пиксельной окрестности и количество искажаемых значений пикселей для этой окрестности. Например, для достоверности 10^{-6} характерно 10 помех на окрестность 1000×1000 пикселей при условии, что каждый пиксель спектрального канала содержит 10-битовое число. Соответственно в рамках моделирования все рассматриваемое изображение КМСС разбивалось на блоки для каждого спектрального канала и для блока выполнялось моделирование помех на основе вышеприведенного алгоритма.

Для оценки влияния импульсных помех на качество формируемого информационного продукта NDVI проанализируем метрики сопоставления (см. табл. 3) различных по размеру фрагментов исходного (эталонного) изображения NDVI с изображениями NDVI с импульсными помехами, смоделированными для различных показателей достоверности. При этом в качестве метрик оценим следующие.

На рис. 4 приведены результаты эксперимента, в ходе которого скользящим окном выполнялся поиск наибольшего отклонения от эталона для различных размеров фрагментов (или окрестностей). Данные графики показывают, что наибольшие отклонения наблюдаются при размерах окрестностей менее 16×16 пикселей вне зависимости от показателя достоверности и выбора метрики. При этом для мет-

рики кросс-корреляции значимые отклонения достигаются для больших окрестностей, в частности 64×64 пикселей. Кроме того, график зависимости сигнал–шум демонстрирует влияние большего количества помех, попадающих в окно поиска, при его увеличении.

В таком случае для оценки качества данных и информационных продуктов ДЗЗ целесообразно использовать метрику кросс-корреляции как наиболее чувствительную к импульсным помехам, при этом максимальный размер окрестности для оценки влияния сбойных пикселей — 64×64 .

Далее рассмотрим распределение процентного количества сбоев в зависимости от величины кросс-корреляции для различных размеров окна сопоставления, учитывая, что нормированный диапазон допустимых значений метрики кросс-корреляции находится в диапазоне $-1 \dots +1$. На рис. 5 приведена гистограмма для достоверности 10^{-6} , демонстрирующая корректность (коэффициент корреляции более 0,9) более 90% рассматриваемых окрестностей импульсных помех при размерах сопоставляемых окрестностей более 32×32 пикселей. В свою очередь, интегральная гистограмма (см. рис. 6) относительно всего рассматриваемого множества окрестностей демонстрирует условно константный характер распределений для достоверностей 10^{-4} – 10^{-6} .

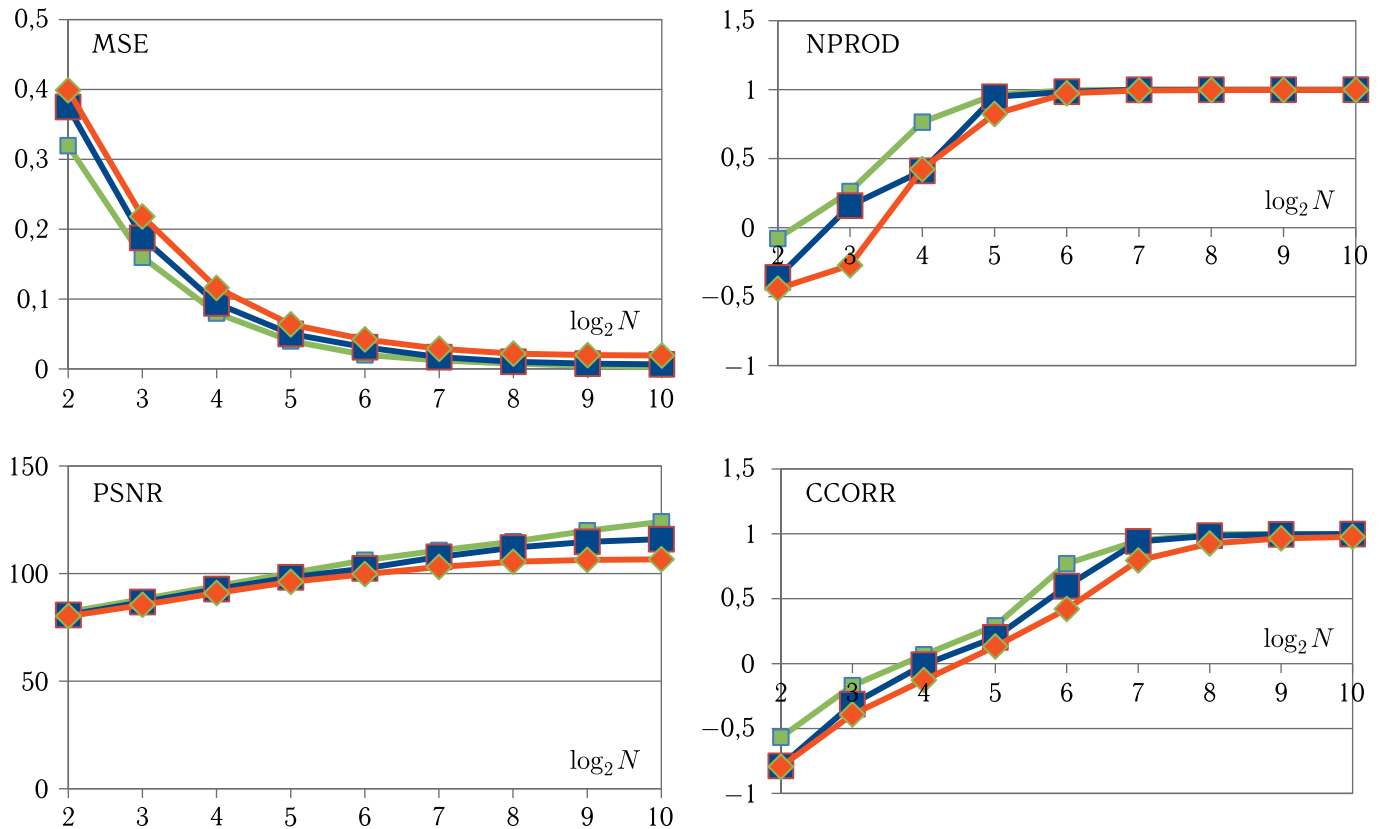


Рис. 4. График результатов сопоставления сбойных и эталонных окрестностей (размером $N \times N$ пикселей) для сцены КМСС КА «Метеор-М» № 2-2 для различных метрик относительно диапазона размеров окрестностей

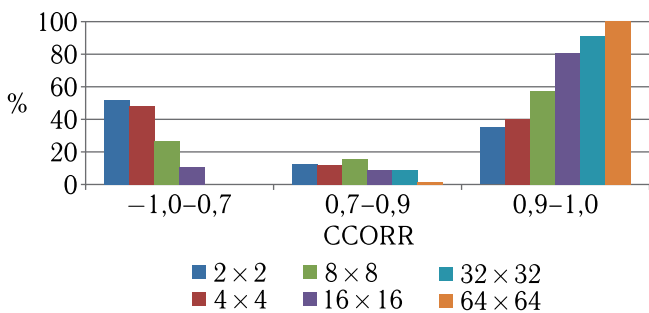


Рис. 5. Гистограмма распределения процентного количества соответствий в зависимости от коэффициента кросс-корреляции для различных размеров окрестностей (показаны цветом) для достоверности 10^{-6}

Таким образом, при условии анализа информационных продуктов ДЗЗ, характеризующих состояние наблюдаемых объектов и/или явлений размером окрестности более 32×32 пикселей, снижение на порядок требований к достоверности принимаемой информации (в частности, использования показателя

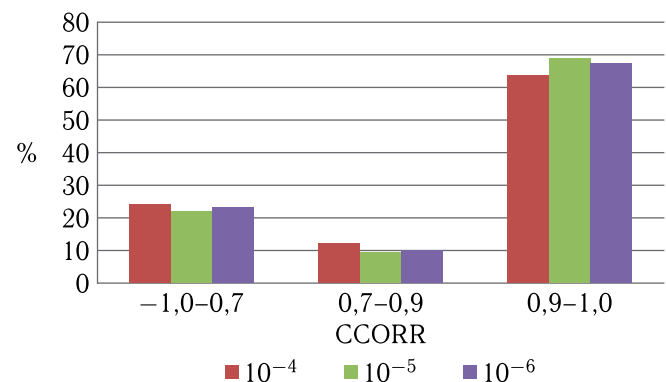


Рис. 6. Гистограмма интегрального (по всем рассматриваемым размерам окрестностей) распределения процентного количества соответствий в зависимости от коэффициента кросс-корреляции для различных показателей достоверности (показан цветом)

для достоверности 10^{-5}) обеспечит допустимое в абсолютном количестве число импульсных помех, оказывающих влияние на анализируемые объекты.

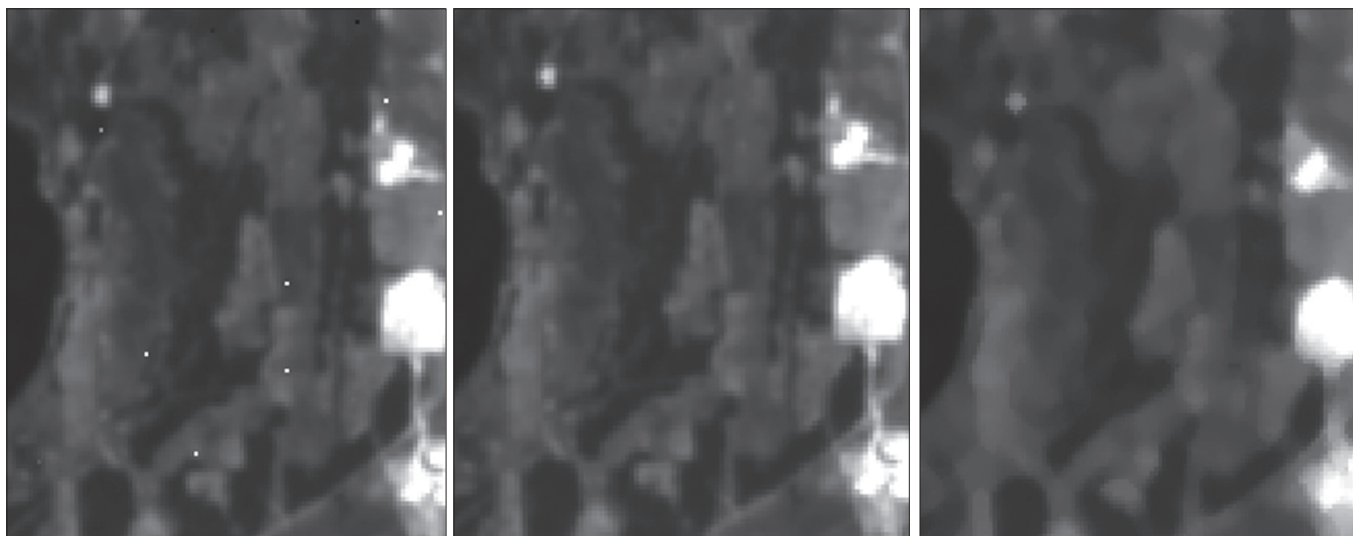


Рис. 7. Фрагмент изображения NIR-канала КМСС КА «Метеор-М»: исходных с импульсными помехами — слева, обработанных медианным фильтром с размером окна 3×3 — в центре, 5×5 — справа

Подходы к устранению влияния импульсных помех на качество данных ДЗЗ

С целью определения минимально допустимых для анализа размеров объектов при пониженной достоверности приема космической информации рассмотрим подходы к дополнительной обработке данных ДЗЗ по устранению импульсных помех на изображении.

В частности, наиболее широкое распространение получил медианный фильтр [2], обеспечивающий фильтрацию шума типа «соль и перец». При применении данного фильтра к изображениям спектральных каналов достигается фильтрация ошибочных пикселей наряду с некоторым искажением изображений (см. рис. 7). Результаты оценки качества информационного продукта ДЗЗ, сформированного по данным, обработанным медианным фильтром для окна 3×3 , на основе интегрального показателя (по всем рассматриваемым окрестностям), приведены на рис. 8. В данном случае интегральная доля окрестностей, «корректно» соответствующих эталону, возрастает более чем на 20%. При этом минимально допустимый размер окрестности, для которой наблюдается процент брака менее 10 %, соответствует объектам 8×8 пикселей.

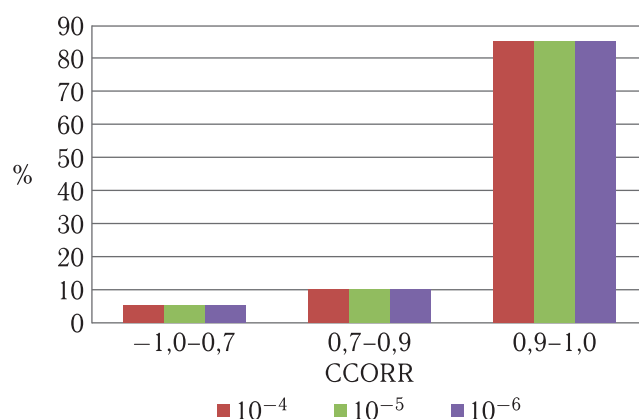


Рис. 8. Гистограмма интегрального распределения процентного количества соответствий в зависимости от коэффициента кросс-корреляции для различных показателей достоверности (показан цветом) после медианной фильтрации данных ДЗЗ

С целью преодоления последствий применения медианного фильтра, связанных с искажением данных, используются различные методы детектирования импульсных помех, например [4]. При этом особенности регистрации импульсных помех для космической информации ДЗЗ с заданным показателем достоверности 10^{-4} – 10^{-6} обуславливают следующие характерные критерии описания сбоев: 1) импульсная помеха является точечным артефактом, и значение цифрового отсчета существенно отли-

чается от значений смежных пикселей; 2) импульсные помехи равномерно распределены на изображении; 3) количество импульсных помех определяется показателем достоверности.

На основе критериев 1 и 2 допустимо считать, что две смежные импульсные помехи на растровом изображении маловероятны. В таком случае для обнаружения импульсных помех, существенно отличающихся от окрестности, будем применять алгоритм [4] в следующем виде

$$R(i, j) = \theta(F(i, j) - n \cdot \sigma(U^*(i, j))),$$

$$F(i, j) = \min_{J \in U^*(i, j)} |I_{i,j} - J|,$$

где $R(i, j)$ — решающее правило, обеспечивающее определение помехи для заданного пикселя с координатами (i, j) ;

$F(i, j)$ — метрика оценки разности величин цифровых отсчетов для заданного пикселя с координатами (i, j) и пикселей его окрестности U^* ;

$I_{i,j}$ — значение цифрового отсчета для заданного пикселя с координатами (i, j) ;

$U(i, j) = \{I_{i+p,j+q} | p \in \{-1 \dots +1\}, q \in \{-1 \dots +1\}\}$ — множество значений цифровых отсчетов окрестности рассматриваемого пикселя;

$U^*(i, j) = U(i, j) \setminus I_{i,j}$ — подмножество множества $U(i, j)$, для которого исключено значение цифрового отсчета центрального пикселя;

J — элемент множества U^* ;

$\theta(\blacksquare)$ — функция Хевисайда (кусочно-постоянная функция, равная нулю для отрицательных значений аргумента и единице — для положительных);

$\sigma(\blacksquare)$ — оператор вычисления среднеквадратического отклонения для множества;

n — параметр алгоритма (в экспериментах использовались значения в интервале 2...8).

На основе критерия 3 допустимо оценивать предельное количество детектируемых помех с применением показателя достоверности

$$N = \xi \cdot W \cdot H,$$

где W, H — пиксельные размеры растрового изображения спектрального канала данных ДЗЗ,

ξ — показатель достоверности.

Качество работы предлагаемого эвристического детектора импульсных помех приведено на рис. 9. Соответственно данный классификатор обеспечивает обнаружение более 70 % импульсных помех

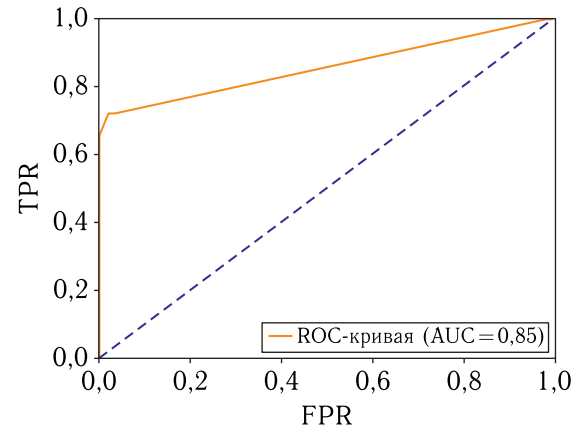


Рис. 9. ROC-кривая качества обнаружения импульсных помех, где TPR — вероятность корректной классификации, FPR — ошибка второго рода, AUC — площадь под кривой (графиком)

при ошибках II рода не более 2,5 %. При этом для 2/3 ненайденных помех характерна корреляция более 0,9 либо отличие от фона не более 5 % средней яркости окрестности.

Применительно к изображениям спектральных каналов выполнено обнаружение импульсных помех и восстановлены значения цифровых отсчетов на основе билинейной интерполяции. Для результирующего информационного продукта ДЗЗ проведена оценка качества в виде интегрального распределения процентного количества соответствий в зависимости от коэффициента кросс-корреляции для различных показателей достоверности (показан цветом) после детектирования импульсных помех и восстановления значений на основе интерполяции (см. рис. 10), демонстрирующая повышение качества по отношению к результатам обработки медианным фильтром (см. рис. 8). Кроме того, минимально допустимый размер окрестности, для которой наблюдается процент брака менее 10 %, соответствует объектам 4×4 пикселей.

Заключение

В статье рассматриваются вопросы приема космической информации на антенные комплексы в условиях отсутствия помехозащищающего кодирования радиолиний. Данное обстоятельство обуславливает высокие требования к достоверности при-

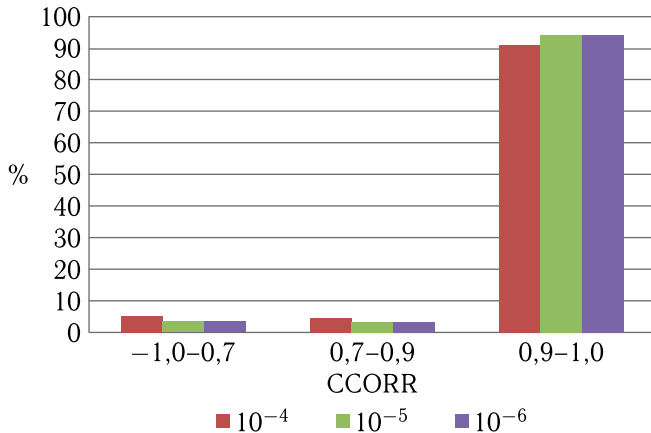


Рис. 10. Гистограмма интегрального распределения процентного количества соответствий в зависимости от коэффициента кросс-корреляции

нимаемой информации с целью уменьшения доли импульсных помех на данных и формируемых на их основе информационных продуктах ДЗЗ.

Для оценки влияния импульсных помех на качество данных и формируемых на их основе информационных продуктов ДЗЗ в зависимости от масштаба исследуемого объекта/явления выполнено сопоставление изображений с учетом моделируемых помех для различных показателей достоверности и изображения без помех. По результатам сопоставления предлагается функциональный показатель качества изображения в виде процентного распределения количества окрестностей импульсных помех в зависимости от величины кросс-корреляции.

С целью сокращения доли окрестностей, чувствительных к импульсным помехам, рассматриваются две типовых стратегии устранения сбоев: фильтр и детектор. Демонстрируется существенное улучшение качества изображений после дополнительной обработки. Кроме того, достигается уменьшение размеров окрестностей, чувствительных к импульсным помехам.

Таким образом, влияние импульсных помех, наблюдаемых на изображениях спектральных каналов, допустимо нивелировать путем дополнительной обработки. В результате возможно снижение требований к достоверности принимаемой космической информации.

Дальнейшее развитие тематики данной работы планируется вести в двух направлениях: 1) апробация предлагаемых решений на реальных данных,

в том числе с учетом снижения требований к достоверности принимаемой информации; 2) разработка более совершенных алгоритмов детектирования (например, с использованием аппарата нейронных сетей), обеспечивающих обнаружение более 99 % импульсных помех, оказывающих влияние на качество данных и формируемых на их основе информационных продуктов ДЗЗ.

Список литературы

1. Pratt W.K. Median filtering, in Semiannual Report, Image Processing Institute, Univ. of Southern California. P. 116–123, Sept. 1975.
2. Buades A., Coll B. and Morel J.M. A review of image denoising algorithms, with a new one // SIAM Multiscale Modeling and Simulation, 2005, vol. 4. P. 490.530.
3. Katkovnik V., Egiazarian K. and Astola J. Adaptive window size image denoising based on intersection of confidence intervals (ICI) rule // J. of Math. Imaging and Vision, 2002, vol. 16. P. 223–235.
4. Garnett R., Huegerich T., Chui C. and He W.-J. A universal noise removal algorithm with an impulse detector // IEEE Transactions on Image Processing, 2005, vol. 14. P. 1747–1754.
5. Черепанов А.С. Вегетационные индексы // Геома-тика, 2011, 2, С. 98–102. https://sovzond.ru/upload/iblock/f46/2011_02_017.pdf (2022)
6. Sishodia Rajendra P., Ray Ram L., Singh Sudhir K. Applications of Remote Sensing in Precision Agriculture // A Review. Remote Sensing, 2020, 12(19).
7. Селин В.А., Марков А.Н., Васильев А.И., Коршунов А.П. Геоинформационный сервис «Банк базовых продуктов» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2019, т. 6, вып. 1. С. 40–48.
8. Васильев А.И., Стремов А.С., Коваленко В.П. Исследование данных комплекса широкозахватной мультиспектральной аппаратуры КА «Ресурс-П» для решения спектрометрических задач // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2017, т. 14, № 4. С. 36–51.
9. Васильев А.И., Стремов А.С., Коваленко В.П., Михеев А.А. Методика сопоставления базовых продуктов МСС КА «Канопус-В» и Landsat ETM+ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2018, т. 15, № 4. С. 36–48.