

doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-182-189

УДК 535.2

## Моделирование и анализ фрактального преобразования искаженных снимков земной поверхности, получаемых оптико-электронными системами наблюдения

Артем Сергеевич Андрусенко<sup>1</sup>, Андрей Николаевич Григорьев<sup>2</sup>,  
Денис Сергеевич Коршунов<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup> Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

<sup>1</sup> [artyom.andrusenko@gmail.com](mailto:artyom.andrusenko@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0008-6697-1674>

<sup>2</sup> [Grig-AN@ya.ru](mailto:Grig-AN@ya.ru), <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>

<sup>3</sup> [korshunov.denis@rambler.ru](mailto:korshunov.denis@rambler.ru) ✉, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

### Аннотация

**Введение.** Представлены результаты исследования методов обработки оптико-электронных снимков земной поверхности. Показано применение фрактальных преобразований для решения задач автоматизированного и автоматического анализа изображений местности, обеспечивающих разделение природных и антропогенных объектов без использования машинного обучения. Анализ существующих работ показал отсутствие исследований, связывающих результат фрактального преобразования с качеством изображения, зарегистрированного в реальных условиях оптико-электронной съемки. Отсутствует обоснование выбора конкретного фрактального преобразования для прикладной обработки снимков, имеющих определенные типовые искажения. Целью данной работы явилось выявление зависимости отношения сигнал/шум фрактальной размерности от качества исходных изображений, определение типа фрактального преобразования, наиболее устойчивого к действию рассматриваемых негативных факторов. **Методы.** Определены методы фрактальных преобразований для тематической обработки изображений, к которым отнесены метод призм и дифференциальный метод подсчета кубов, представлено их описание. Для исследования выбранных методов использованы реальные снимки земной поверхности, моделирующие искаженные изображения местности. Рассмотрены искажения изображений, определяемые нестабильностью условий съемки и свойств оптико-электронного комплекса: расфокусировка, смаз и шум. В обобщенном виде представлены математические модели, используемые для их описания. **Основные результаты.** Изложена методика анализа отношения сигнал/шум фрактального преобразования, предполагающая обработку эталонного и искаженного изображений местности. Указаны аспекты моделирования искажений и показатели, характеризующие уровень искажения изображения. Для реализации эксперимента выбраны изображения местности, характеризующиеся различными сюжетами. Для каждого сюжета получены зависимости отношения сигнал/шум от показателей, характеризующих исследуемые искажения. **Обсуждение.** Путем оценивания отношения сигнал/шум выполнен анализ влияния искажающих факторов на формируемое поле фрактальной размерности. Результаты эксперимента подтвердили возможность использования фрактальных преобразований для тематической обработки искаженных оптико-электронных снимков. Показано, что зависимость отношения сигнал/шум от показателя искажения имеет выраженный нелинейный характер. Установлено, что для искажений типа расфокусировки и смаза более устойчивым является метод призм, а при наличии шумов — метод дифференциальных кубов. Для обработки снимков местности, представленной в основном изображениями лесной растительности, лучший результат показывает применение дифференциального метода подсчета кубов.

### Ключевые слова

дистанционное зондирование, оптико-электронная съемка, изображение, смаз, расфокусировка, шум, фрактальное преобразование, отношение сигнал/шум

**Ссылка для цитирования:** Андрусенко А.С., Григорьев А.Н., Коршунов Д.С. Моделирование и анализ фрактального преобразования искаженных снимков земной поверхности, получаемых оптико-электронными системами наблюдения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2024. Т. 24, № 2. С. 182–189. doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-182-189

© Андрусенко А.С., Григорьев А.Н., Коршунов Д.С., 2024

## Modeling and analysis of fractal transformation of distorted images of the Earth's surface obtained by optoelectronic surveillance systems

Artyom S. Andrusenko<sup>1</sup>, Andrey N. Grigor'ev<sup>2</sup>, Denis S. Korshunov<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup> Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation

<sup>1</sup> artyom.andrusenko@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0008-6697-1674>

<sup>2</sup> Grig-AN@ya.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>

<sup>3</sup> korshunov.denis@rambler.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>

### Abstract

The results of a study of methods for processing optoelectronic images of the Earth's surface are presented. The application of fractal transformations to solve the problems of automated and automatic analysis of terrain images, ensuring the separation of natural and anthropogenic objects without the use of machine learning, is shown. The analysis of existing works has shown the absence of studies linking the result of fractal transformation with the image quality recorded in real conditions of optoelectronic photography. There is no justification for choosing a specific fractal transformation for the applied processing of images with certain typical distortions. The purpose of this work was to identify the dependence of the signal-to-noise ratio of fractal dimension on the quality of the source images, to determine the type of fractal transformation that is most resistant to the effects of the considered negative factors. Methods of fractal transformations for thematic image processing are defined, which include the prism method and the differential cube counting method, and their description is presented. To study the selected methods, real images of the Earth's surface were used, simulating distorted images of the terrain. Image distortions determined by the instability of shooting conditions and the properties of the optoelectronic complex are considered: defocusing, smudging and noise. The mathematical models used to describe them are summarized. A technique for analyzing the signal-to-noise ratio of fractal transformation is described, involving the processing of reference and distorted images of the terrain. The aspects of distortion modeling and indicators characterizing the level of image distortion are indicated. To implement the experiment, images of the area were selected characterized by various plots. For each plot, the dependences of the signal-to-noise ratio on the indicators characterizing the studied distortions are obtained. By estimating the signal-to-noise ratio, the analysis of the influence of distorting factors on the fractal dimension field being formed was performed. The results of the experiment confirmed the possibility of using fractal transformations for thematic processing of distorted optoelectronic images. It is shown that the dependence of the signal-to-noise ratio on the distortion index has a pronounced nonlinear character. It is established that for distortions of the defocusing and smearing type, the prism method is more stable, and in the presence of noise, the differential cube method is more stable. For processing images of an area represented mainly by images of forest vegetation, the best result is shown by using the differential cube counting method.

### Keywords

remote sensing, optoelectronic photography, image, blurring, defocusing, noise, fractal transformation, signal-to-noise ratio

**For citation:** Andrusenko A.S., Grigor'ev A.N., Korshunov D.S. Modeling and analysis of fractal transformation of distorted images of the Earth's surface obtained by optoelectronic surveillance systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2024, vol. 24, no. 2, pp. 182–189 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2024-24-2-182-189

### Введение

В настоящее время существенным социально-экономическим и научным значением характеризуется отрасль получения пространственных данных, значимая доля которой представлена технологиями оптико-электронной съемки Земли с орбитальных и воздушных носителей. Обработка получаемых таким путем изображений земной поверхности для решения прикладной задачи традиционно включает два ключевых этапа. Первый этап состоит из получения изображения, достаточно корректного в геометрическом и радиометрическом отношениях. Второй этап — тематическая интерпретация, выполняемая визуально-инструментальными, автоматизированными или автоматическими методами.

Методы автоматизированной и автоматической тематической обработки в основном базируются на определенном классе преобразований изображений или их сочетании. Среди известных классов преобразований в рамках области обработки изображений, полученных в результате оптико-электронной съемки Земли, практический интерес представляют фрактальные преобразо-

вания [1]. Применимость фрактальной геометрии для описания изображений природных объектов доказана в известной работе [2]. Существующие прикладные исследования показывают целесообразность использования фрактальных преобразований при решении конкретных задач анализа изображений местности [3–5]. При этом достижимость цели обработки демонстрируется на частных примерах без анализа зависимости отношения сигнал/шум результата преобразования, в качестве которого предлагается рассматривать фрактальную размерность, от исходных изображений [6]. В свою очередь оптико-электронная съемка выполняется в условиях, которые оказывают негативное влияние на качество регистрируемых изображений и не могут быть в достаточной степени устранены или компенсированы. В частности, такие условия определяются нестабильностью передаточной характеристики оптико-электронной системы, вибрацией ее конструкции, движением несущей платформы. Кроме того, съемка может выполняться в разные моменты светового дня, в течение которого существенно изменяется освещенность поверхности Земли. Негативное влияние прояв-

ляется путем возникновения искажений изображений: расфокусировки и смаза, которые наблюдаются в виде направленного размытия, возникающего в результате движения сцены относительно регистрирующей системы в процессе оптико-электронной съемки [7]. В настоящей работе рассматривается вариант равномерного поступательного движения изображения. Также уменьшение облученности поверхности при совместном или независимом действии факторов: малой угловой высоты Солнца и выраженного рельефа местности, вызывает усиление шума при регистрации изображения. Таким образом, при использовании методов тематической обработки, основанных на преобразовании изображения, необходимо располагать знаниями о чувствительности результата преобразования от исходного изображения, выраженном в отношении сигнал/шум [8].

В силу этого тематика настоящего исследования, посвященного анализу отношения сигнал/шум фрактальных преобразований от показателей, характеризующих действие негативных факторов регистрации исходного изображения, является актуальной. Цель исследования состоит в выявлении зависимости отношения сигнал/шум фрактальной размерности от качества исходных изображений, с определением типа фрактального преобразования, устойчивого к действию рассматриваемых негативных факторов. Для достижения указанной цели требуется решить следующие основные задачи: выбор фрактальных преобразований, применимых для тематической обработки изображений поверхности Земли; выбор моделей негативных факторов, вызывающих искажение изображений; разработка методики исследования и выполнение эксперимента с последующим анализом полученных данных.

### Фрактальные преобразования для тематической обработки изображений

Существует перечень преобразований для получения фрактальной размерности по оптико-электронным изображениям с различной пространственной структурой. Для фрактального анализа изображений, полученных в результате оптико-электронной съемки Земли с орбитальных и воздушных носителей, применимы преобразования, обеспечивающие расчет фрактальной размерности  $D$  на основе значения яркостей цифрового растрового изображения, которая количественно учитывает характер природных пространственных структур («шероховатости», «пустоты» и т. п.). Как показал анализ существующих работ по соответствующей тематике, такие преобразования выполняются, в частности, с использованием метода призм [9] и дифференциального метода подсчета кубов [10]. Описание и оценка методов представлены в работах [1, 11, 12].

В работе [9] метод призм предложен для вычисления фрактальной размерности по изображениям местности. Согласно методу, по изображению перемещается окно размерностью  $[\varepsilon \times \varepsilon]$ , где  $\varepsilon$  — линейный размер окна в пикселах с шагом в один пиксел. Скользящее окно разбивается на четыре треугольника и для расчета этих треугольников определяются значения яркости угловых и центрального пикселов. По формуле Герона

[13] вычислены площади данных треугольников, сформированных соответствующими отсчетами яркости. Суммарная площадь всех четырех пространственных треугольников  $S_\varepsilon$ , формирующих фрактальную поверхность, будет больше или равна евклидовой площади скользящего окна. Окно размерностью  $[\varepsilon \times \varepsilon]$  разбито на  $n$ -ое количество субокон  $[\varepsilon_m \times \varepsilon_m]$  и для каждого из них найдено значение  $S_{\varepsilon_m}^i$ , а затем общее —  $S_{\varepsilon_m} = \sum_{i=1}^n S_{\varepsilon_m}^i$ .

Методом наименьших квадратов вычислен угловой коэффициент  $k$  зависимости  $\lg S_\varepsilon$  от  $\lg \varepsilon$ .

Фрактальная размерность  $D$  в методе призм найдена на основании следующего соотношения:

$$S_\varepsilon \propto \varepsilon^{2-D}, D = 2 - k.$$

Проходя скользящим окном по всему исследуемому оптико-электронному снимку получим поле фрактальной размерности (ПФР), процесс формирования которого представлен в работе [14].

Дифференциальный метод кубов [9, 15] реализован следующим образом [1]. В скользящем окне — в виде куба размером  $\varepsilon \times \varepsilon \times I$ , где  $I$  — максимальное значение яркости пиксела. Основание скользящего окна разбито на равномерную сетку с выбранным размером ребра  $\delta$ , при этом выполнено соотношение  $\varepsilon/2 \geq \delta > 1$ . На основании каждого такого квадрата построим столбец ячеек, имеющих форму параллелепипеда размером  $\delta \times \delta \times \delta'$ . Общее число ячеек, содержащих не менее одного пиксела изображения поверхности, обозначим  $N(\delta)$ .  $\delta'$  можно вычислить из уравнения  $I/\delta' = \varepsilon/\delta$ . Пусть минимальные и максимальные значения яркости в  $(i, j)$ -ом узле сетки равны  $g_{\min}$  и  $g_{\max}$  соответственно. Тогда для каждой ячейки определим параметр  $n_\delta(i, j) = \frac{g_{\max}}{I} - \frac{g_{\min}}{I} + 1$ , обозначающий ее долю в общем объеме  $N(\delta)$ . Суммируя параметры по всем узлам сетки в скользящем окне, найдем одно значение на регрессионной кривой при заданном значении размера ячейки:

$$N(\delta) = \sum_{i,j} n_\delta(i, j).$$

Используя численный алгоритм вычисления, построим зависимость измеренных значений числа кубов  $N(\delta)$  от значений ребра  $\delta$  в двойном логарифмическом масштабе. Методом наименьших квадратов вычислим угловой коэффициент  $k$  зависимости  $\lg(N(\delta))$  от  $\lg \delta$ .


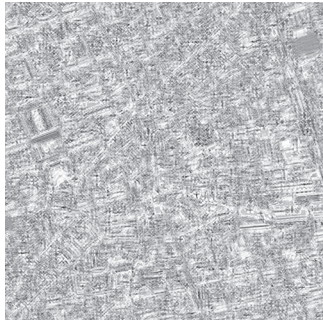
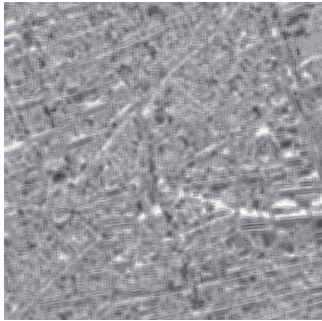


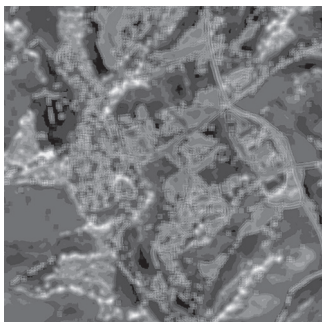
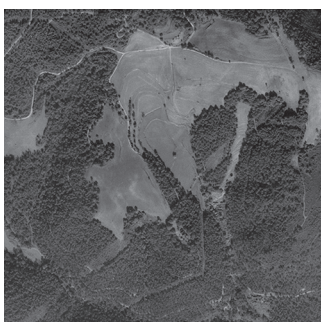
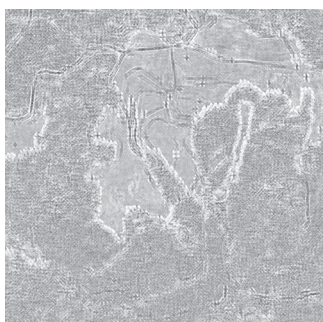
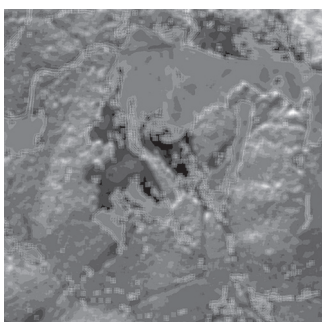
Фрактальная размерность  $D$  в дифференциальном методе кубов определяется на основе полученного коэффициента наклона как:

$$N(\delta) \propto \delta^{-D}, D = -k.$$

Независимо от используемого метода значение  $D$  вычисляется в скользящем окне, и полученное значение ставится в соответствие одному пикселу изображения. В силу этого при обработке исходного изображения в окрестности его границ необходим учет краевых эффектов [14]. Получаемые значения  $D$  зависят от выбранного размера скользящего окна и шага сканирования. Для определения указанных параметров сканирования изображения используются результаты работы [11].



Таблица 1. Исходные изображения и результаты фрактального преобразования  
 Table 1. Source images and fractal transformation

Тип сюжета	Обзорное панхроматическое изображение	Поле фрактальной размерности	
		по методу призм	по дифференциальному методу подсчета кубов
Городская застройка			
Сельская местность			
Лесная местность			

Примечание. Сопоставление диапазона яркости со значениями полей фрактальной размерности:

Значение ПФР	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	---

В настоящей работе для отработки реализации методов фрактальных преобразований и проведения экспериментов использован набор из 50 тестовых изображений — фрагменты реальных снимков высокого пространственного разрешения. Данные получены U.S. Geological Survey (USGS) от компании GeoEye с использованием космического аппарата OrbView-3 и ограничены периодом с сентября 2003 по март 2007 года<sup>1</sup>.

Фрагменты имеют размер 1024 × 1024 пикселей, содержат изображения разных природно-техногенных комплексов и приведены по степени проявления антропогенных объектов. Результат построения ПФР с использованием метода призм и дифференциального

метода подсчета кубов представлен в табл. 1. При реализации метода призм использован размер сканирующего окна 15 × 15 пикселей, дифференциального метода подсчета кубов — 16 × 16 пикселей, выбор размера сканирующего окна основан на работе [16]. Значения фрактальной размерности соответствуют диапазону яркостей.

#### Модели искажений изображений при оптико-электронной съемке поверхности Земли

В рамках исследования рассмотрены следующие виды искажений, которые характерны для оптико-электронной съемки, выполняемой средствами дистанционного зондирования Земли: расфокусировка, смаз и воздействие на изображение шума. Принято допущение, что оптико-электронная система форми-

<sup>1</sup> Архив космических снимков космического аппарата OrbView-3, полученные USGS от компании GeoEye, ограниченные периодом сентябрь 2003 — март 2007.

рования изображения является линейной трансляционно-инвариантной искажающей системой. В силу этого искажающее воздействие может быть описано в пространственной области как свертка искажающей функции  $h(s, t)$  с изображением

$$f(x, y), x \in [0, (N - 1)], y \in [0, (M - 1)],$$

где  $s$  — координата характеристики в горизонтальном направлении вдоль оси  $x$ ;  $s \in [-n/2, n/2]$ ;  $t$  — координата характеристики в вертикальном направлении вдоль оси  $y$ ,  $t \in [-m/2, m/2]$ :

$$g(x, y) = h(x, y) * f(x, y) + n(x, y),$$

где  $g(x, y)$  — результат моделирования искаженного изображения;  $n(x, y)$  — вносимый системой случайный аддитивный шум;  $*$  — обозначение операции свертки в пространственной области.

Ядро искажающей функции для расфокусировки изображения смоделировано гауссовой функцией рассеяния точки:

$$h(s, t) = k \begin{bmatrix} h_{11} & \dots & h_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{t1} & \dots & h_{ts} \end{bmatrix}, h_{ts} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{s^2 + t^2}{\sigma^2}\right),$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение;  $k = 1 / \left( \sum_{t=-m/2}^{m/2} \sum_{s=-n/2}^{n/2} h(s, t) \right)$  — нормирующий коэффициент;  $m = n$  — размер искажающего фильтра в заданных пределах.

Моделирование смазанного изображения основано на описании равномерного поступательного движения изображения сцены относительно регистрирующей системы в процессе оптико-электронной съемки [7]. Ядро искажающего фильтра при одномерном смазе опишем выражением:

$$h(s) = \frac{1}{\sum_n h_s} [h_1, \dots, h_s],$$

где  $h_s = 1$ ,  $n$  — размер искажающего фильтра в пикселах.

Факторы возникновения шума в оптико-электронных системах регистрации изображений имеют различную природу [17]. В настоящей работе использована модель гауссового шума, который характеризуется двумя параметрами — математическим ожиданием  $\mu$  и дисперсией  $\sigma$ . В качестве допущения примем, что такой шум является аддитивным, не коррелирует с изображением и не зависит от координат пиксела.

Функция плотности распределения вероятностей гауссовой случайной величины  $z$  зададим выражением:

$$p(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(z - \mu)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где  $z$  — случайная величина с функцией распределения вероятностей по Гауссу:

$$z = \mu + \sqrt{\sigma \ln(1 - \omega)},$$

где  $\omega$  — генератор случайных чисел с равномерным распределением в интервале  $(0, 1)$ .

Искаженные изображения, смоделированные с использованием описанного математического аппарата, представлены на рис. 1.

### Анализ фрактального преобразования искаженных снимков земной поверхности

В обобщенном виде содержание методики, в соответствии с которой проведен эксперимент, представлено на рис. 2. В качестве исходных изображений местности использованы фрагменты снимков, описанных в табл. 1.

Для получения трех наборов искаженных изображений к исходным снимкам по отдельности применены функции, описывающие расфокусировку, смаз и шум. Для создания наборов изображений с расфокусировкой и смазом изменен размер ядра искажающего фильтра: от 3 до 29 пикселей  $p$  с шагом в 2 пиксела. Набор изображений, искаженных аддитивным шумом, сформирован путем изменения значения дисперсии  $\sigma$  в модели шума от 0,1 до 1,0 с шагом 0,1 при значении математического ожидания  $\mu = 0$ . По исходным и искаженным изображениям с использованием рассмотренных фрак-

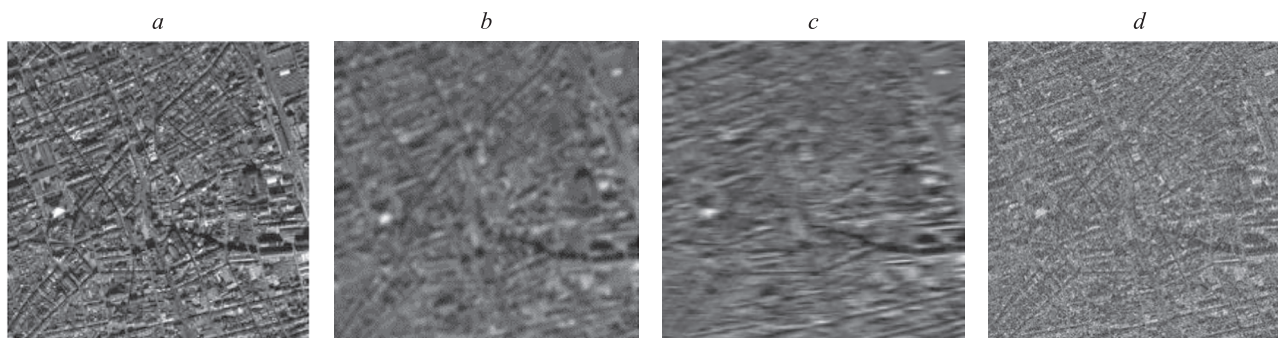


Рис. 1. Примеры изображений для городской застройки: исходное (a); расфокусированное (b); смазанное (c); искаженное шумом (d).  
Размер изображений 1024 × 1024 пикселей

Fig. 1. Examples of images: the original image (a); defocused image (b); motion-blurred image (c); image distorted by noise (d).  
The size of the images is 1024 × 1024 pixels



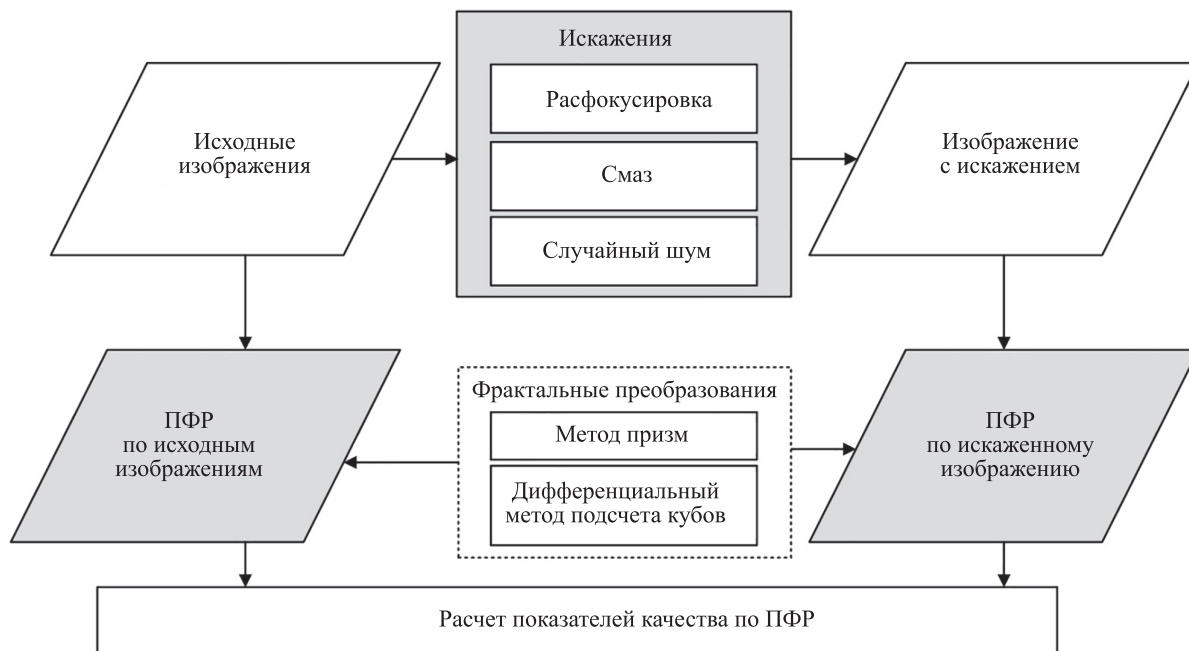


Рис. 2. Схема методики исследования влияния искажающих факторов на поле фрактальной размерности  
 Fig. 2. Scheme of the methodology for studying the influence of distorting factors on the fractal dimension field

тальных преобразований получены соответствующие ПФР. Для количественного оценивания величины искажения ПФР, сформированных по обработанным изображениям, использован показатель отношения сигнал/шум (SNR), рассчитываемый по следующей формуле:

$$SNR = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_0^{N-1} \sum_0^{M-1} [f(x, y)]^2}{\sum_0^{N-1} \sum_0^{M-1} [f(x, y) - g(x, y)]^2} \right]$$

Таблица 2. Результаты эксперимента по анализу качества полей фрактальной размерности  
 Table 2. Results of an experiment to analyze the quality of a fractal dimension field

Тип искажения	Исходные изображения сюжетов	ПФР, сформированное методом призм	ПФР, сформированное дифференциальным методом подсчета кубов
Смаз			
Расфокусировка			
Шум			

Примечание. Изображения сюжетов: - - - - - городская застройка; — сельская местность; ..... лесная местность.

Результаты расчета сигнал/шум в виде графиков зависимостей от параметра искажения представлены в табл. 2.

Ухудшение качества результата ПФР соответствует уменьшению значения сигнал/шум. Вид полученных зависимостей показывает, что сигнал/шум результата ПФР, выполненного с использованием дифференциального метода подсчета кубов, в общем, менее чувствителен к искажению исходного изображения лесной местности. Кроме того, существует связь качества результата преобразования с особенностями изображенного сюжета (табл. 1). В основном наблюдается монотонное ухудшение качества результата ПФР при увеличении уровня искажения. Такая тенденция в полной мере проявляется при использовании метода призм для изображений со всеми типами рассматриваемых сюжетов. При этом отдельные особенности для разных сюжетов проявляются при использовании дифференциального метода подсчета кубов:

- в результате обработки изображений с сюжетом «Городская застройка» имеет место монотонное ухудшение значения сигнал/шум при увеличении уровня всех типов искажений;
- по результатам обработки изображений с сюжетом «Лесная местность», искаженных смазом, с увеличением уровня искажения от минимального до определенного значения наблюдается ухудшение значения сигнал/шум, однако ПФР, сформированное

дифференциальным методом подсчета кубов, показывает лучшую устойчивость к смазу по отношению к ПФР, сформированному методом призм;

- вид зависимостей, полученных после обработки изображений со случайным шумом со всеми сюжетами, показывает, что с увеличением уровня искажения сигнал/шум убывает на небольшом диапазоне значений.

### Заключение

Таким образом, результаты выполненного исследования показывают, что фрактальные преобразования, которые применимы для обработки изображений местности, обеспечивают разный по качеству результат при обработке искаженных изображений. Получение более качественного поля фрактальной размерности обеспечивает метод призм при работе с набором изображений сюжетов: «Городская застройка» и «Сельская местность». Для обработки поверхности, близкой к «Лесной местности», лучший результат показывает дифференциальный метод подсчета кубов.

Анализ экспериментальных данных, полученных путем обработки реальных изображений и смоделированных на их основе искаженных изображений, позволил выявить метод, устойчивый к возникающим искажениям на оптико-электронных снимках, и выявить особенности при обработке различной подстилающей поверхности.

### Литература

1. Sun W., Xu G., Gong P., Liang S. Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications // *International Journal of Remote Sensing*. 2006. V. 27. N 22. P. 4963–4990. <https://doi.org/10.1080/01431160600676695>
2. Mandelbrot B.B. *Fractals: Form, Chance and Dimension*. San Francisco: W.H. Freeman, 1982. 625 p.
3. Марков Е.П., Андрусенко А.С., Шабиков Е.И. Фрактальный метод обнаружения групповых объектов транспортной инфраструктуры на изображениях // *Интеллектуальные технологии на транспорте*. 2016. № 4(8). С. 10–15.
4. Андрусенко А.С., Шабиков Е.И., Марков Е.П. Анализ метода фрактальной селекции объектов на цифровых изображениях // *Актуальные проблемы подготовки военных специалистов в области сбора и обработки информации техническими средствами*. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. С. 23–30.
5. Катулев А.Н., Храмычев А.А., Ягольников С.В. Цифровая обработка 2D слабоконтрастных изображений, формируемых оптико-электронным прибором в сложных фоновых условиях: обнаружение, распознавание, сопровождение динамических объектов: монография. М.: Радиотехника, 2018. 407 с.
6. Слободян С.М. Оценка фрактальности отношения сигнал-шум // *Метрология*. 2008. № 1. С. 3–12.
7. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. *Цифровая обработка изображений: пер. с англ.* М.: Техносфера, 2012. 1103 с.
8. Маркушин Г.Н., Коротаев В.В., Кошелев А.В., Самохина И.А., Васильев А.С., Тимофеев А.Н., Васильева А.В., Ярышев С.Н. Двухдиапазонные оптико-электронные системы обнаружения субъектов браконьерского промысла // *Оптический журнал*. 2022. Т. 89. № 9. С. 36–48. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-09-36-48>
9. Goodchild M.F. Fractals and the accuracy of geographical measures // *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. 1980. V. 12. N 2. P. 85–98. <https://doi.org/10.1007/bf01035241>
10. Sarkar N., Chaudhuri B.B. An efficient approach to estimate fractal dimension of textural images // *Pattern Recognition*. 1992. V. 25. N 9. P. 1035–1041. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(92\)90066-R](https://doi.org/10.1016/0031-3203(92)90066-R)

### References

1. Sun W., Xu G., Gong P., Liang S. Fractal analysis of remotely sensed images: A review of methods and applications. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, vol. 27, no. 22, pp. 4963–4990. <https://doi.org/10.1080/01431160600676695>
2. Mandelbrot B.B. *Fractals: Form, Chance and Dimension*. San Francisco, W.H. Freeman, 1982, 625 p.
3. Markov E.P., Andrusenko A.S., Shabakov E.I. Fractal method for detecting a group of objects of transport infrastructure on the images. *Intellectual Technologies on Transport*, 2016, no. 4(8), pp. 10–15. (in Russian)
4. Andrusenko A.S., Shabakov E.I., Markov E.P. Analysis of the fractal selection method of objects in digital images. *Current problems in the military specialists training in the field of collecting and processing information by technical means*. St. Petersburg, A.F. Mozhaysky's Military-Space Academy, 2018, pp. 23–30. (in Russian)
5. Katulev A.N., Khramichev A.A., Iagolnikov S.V. *Digital Processing of 2D Low-Contrast Images Formed by an Optical-Electronic Device in Complex Background Conditions: Detection, Recognition, Tracking of Dynamic Objects. Monograph*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2018, 407 p. (in Russian)
6. Slobodyan S.M. Estimation of fractality of signal-noise relation. *Metrologiya*, 2008, no. 1, pp. 3–12. (in Russian)
7. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall, 2008, 954 p.
8. Markushin G.N., Korotaev V.V., Koshelev A.V., Samokhina I.A., Vasilev A.S., Timofeev A.N., Vasileva A.V., Yaryshev S.N. Dual-band optoelectronic poaching detection systems. *Journal of Optical Technology*, 2022, vol. 89, no. 9, pp. 528–536. <https://doi.org/10.1364/jot.89.000528>
9. Goodchild M.F. Fractals and the accuracy of geographical measures. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 1980, vol. 12, no. 2, pp. 85–98. <https://doi.org/10.1007/bf01035241>
10. Sarkar N., Chaudhuri B.B. An efficient approach to estimate fractal dimension of textural images. *Pattern Recognition*, 1992, vol. 25, no. 9, pp. 1035–1041. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(92\)90066-R](https://doi.org/10.1016/0031-3203(92)90066-R)

11. Плешанов В.С., Напрышкин А.А., Кибиткин В.В. Особенности применения теории фракталов в задачах анализа изображений // Автометрия. 2010. Т. 46. № 1. Р. 86–97.
12. Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки: 2-е изд., перераб. и доп. М.: Университетская книга, 2005. 847 с.
13. Clarke K.C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method // Computers & Geosciences. 1986. V. 12. N 5. P. 713–722. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90047-6)
14. Тренихин В.А. Методы фрактальной обработки и комплексирования радиолокационных и спектрозональных данных в системах космического наблюдения: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». Екатеринбург, 2017. 123 с.
15. Voss R. Fractals in nature: From characterization to simulation // The Science of Fractal Images. Springer, 1988. P. 21–70. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3784-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3784-6_1)
16. Сосулин Ю.Г., Рускин А.Б. Фрактальное обнаружение протяженных малоcontrastных объектов на изображениях // Радиотехника. 2009. № 12. С. 48–57.
17. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений: пер. с англ. М.: Техносфера, 2013. 589 с.
11. Pleshanov V.S., Napryushkin A.A., Kibitkin V.V. Use of the theory of fractals in image analysis tasks. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 1, pp. 70–78. <https://doi.org/10.3103/S8756699010010097>
12. Potapov A.A. *Fractals in Radiophysics and Radar: Sampling Topology*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Universitetskaja Kniga Publ., 2005, 847 p. (in Russian)
13. Clarke K.C. Computation of the fractal dimension of topographic surfaces using the triangular prism surface area method. *Computers & Geosciences*, 1986, vol. 12, no. 5, pp. 713–722. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(86\)90047-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(86)90047-6)
14. Trenikhin V.A. *Methods of fractal processing and integration of radar and spectrozonal data in space observation systems. Dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Yekaterinburg, Ural Federal University, named after the first President of Russia, B.N. Yeltsin, 2017, 123 p. (in Russian)
15. Voss R. Fractals in nature: From characterization to simulation. *The Science of Fractal Images*. Springer, 1988, pp. 21–70. [https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3784-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3784-6_1)
16. Sosulin Yu.G., Russkin A.B. Fractal detection of extensive low-contrast targets in images. *Journal Radioengineering*, 2009, no. 12, pp. 48–57. (in Russian)
17. Schowengerdt R.A. *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. Elsevier Science, 1997, 522 p.

#### Авторы

**Андрусенко Артем Сергеевич** — адъюнкт, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, <https://orcid.org/0009-0008-6697-1674>, [artyom.andrusenko@gmail.com](mailto:artyom.andrusenko@gmail.com)

**Григорьев Андрей Николаевич** — доктор технических наук, доцент, начальник кафедры, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57200211777](https://orcid.org/0000-0001-6941-6475), <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>, [Grig-AN@ya.ru](mailto:Grig-AN@ya.ru)

**Коршунов Денис Сергеевич** — кандидат технических наук, доцент, Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация, [sc 57195312804](https://orcid.org/0000-0001-6344-2533), <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>, [korshunov.denis@rambler.ru](mailto:korshunov.denis@rambler.ru)

#### Authors

**Artyom S. Andrusenko** — PhD Student, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, <https://orcid.org/0009-0008-6697-1674>, [artyom.andrusenko@gmail.com](mailto:artyom.andrusenko@gmail.com)

**Andrey N. Grigor'ev** — D.Sc., Associate Professor, Head of Department, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57200211777](https://orcid.org/0000-0001-6941-6475), <https://orcid.org/0000-0001-6941-6475>, [Grig-AN@ya.ru](mailto:Grig-AN@ya.ru)

**Denis S. Korshunov** — PhD, Associate Professor, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation, [sc 57195312804](https://orcid.org/0000-0001-6344-2533), <https://orcid.org/0000-0001-6344-2533>, [korshunov.denis@rambler.ru](mailto:korshunov.denis@rambler.ru)

Статья поступила в редакцию 15.01.2024  
Одобрена после рецензирования 21.02.2024  
Принята к печати 17.03.2024

Received 15.01.2024  
Approved after reviewing 21.02.2024  
Accepted 17.03.2024



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»