

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.2.001

УДК 621.396.96+528.914

Повышение информативности радиолокационных изображений в системах дистанционного зондирования Земли на основе методов фрактальной обработки

В. А. Тренихин, В. Г. Коберниченко✉

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

✉ v.g.kobernichenko@urfu.ru

Аннотация

Анализируется фрактальная размерность, которая количественно оценивает сложность и хаотический характер радиолокационного изображения природных текстур. Показано, что построение поля фрактальной размерности с последующей многопороговой обработкой позволяет выделить различные классы слабоконтрастных объектов. Проведено сравнение эффективности кластеризации методами ISODATA и K-ближайших соседей яркостного поля и поля фрактальной размерности на основе экспериментальной обработки фрагментов космических радиолокационных изображений.

Ключевые слова

дистанционное зондирование Земли, радиолокационное изображение, фрактальная размерность, кластеризация

Для цитирования

Тренихин В. А., Коберниченко В. Г. Повышение информативности радиолокационных изображений в системах дистанционного зондирования Земли на основе методов фрактальной обработки. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(2):111–131. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.001

Increasing the Information Content of Radar Images in Remote Sensing Systems based on Fractal Processing Methods

V. A. Trenikhin, V. G. Kobernichenko✉

Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

✉ v.g.kobernichenko@urfu.ru

Abstract

We analyze fractal dimension, which quantifies the complexity and chaotic nature of the radar image of natural textures. We establish that regardless of the method used for calculating the fractal dimension, the General

© В. А. Тренихин, В. Г. Коберниченко, 2019

appearance of the histograms is preserved, and the boundaries of the regions are characterized by the same values of fractal dimension, which makes it possible to identify the types of textures. We demonstrate that the construction of the field of fractal dimension of the radar image and the subsequent multi-threshold processing allow distinguishing different classes of natural textures (water surface, shallows, oil spills, land, etc.). The efficiency of clustering by ISODATA and K-nearest neighbors of the brightness field and the fractal dimension field is compared on the basis of experimental processing of fragments of space radar images.

Keywords

remote sensing, radar image, fractal dimension, clustering

For citation

Trenikhin V. A., Kobernichenko V. G. Increasing the Information Content of Radar Images in Remote Sensing Systems based on Fractal Processing Methods. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(2):111–131. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.001

1. Введение

Системы космического наблюдения на базе радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) позволяют решать широкий класс задач, таких как мониторинг океана и водных путей, ледовая разведка, контроль рыболовства, мониторинг чрезвычайных ситуаций, контроль сельскохозяйственных земель и планирование землепользования [1; 2].

Только в последнее десятилетие запущено свыше десятка космических аппаратов, оснащенных РСА: Lacrosse (США), TerraSAR-X и SARLupe (ФРГ), COSMOSkyMed (Италия), «Кондор-Э» (Россия), ALOS-2 (Япония), RADARSAT-2 (Канада) Huang Jang-1G и Yaogan-13 (Китай), KompSAT-5 (Южная Корея), RISAT-1c (Индия), Sentinel-1 (Франция). Достигнутое в этих системах высокое пространственное разрешение (порядка 1 м) с возможностью интерферометрической и полной поляризационной обработки сигналов, открыло новые возможности радиолокационного космического наблюдения. Создаваемая Канадой группировка из трех радарных спутников RADARSAT Constellation Mission (RCM) обеспечит мониторинг прибрежных зон, территорий северных, арктических водных путей и других областей стратегических и оборонных интересов США и Канады. Перед системой RCM поставлена амбициозная задача: в сочетании с оперативным получением данных с помощью комплекса автоматизированного дешифрирования снимков немедленно обнаруживать и идентифицировать морские суда по всему Мировому океану.

Вместе с тем задача обнаружения и определения границ малоконтрастных (слаборазличимых) протяженных объектов на

радиолокационных изображениях (РЛИ) далека от эффективного решения. При автоматизированной обработке космических изображений для ее решения в настоящее время чаще всего используются статистические, спектральные и контурно-текстурные методы.

Широко распространены методы выделения границ на основе радиояркостного контраста, полученные на основе методов Лапласа, Уоллеса и Кирша, а также алгоритм Кэнни [3]. Однако эти методы оказываются малоэффективными при работе со слабоконтрастными изображениями.

Исследования последнего десятилетия показали перспективность использования для решения задач выявления неоднородностей, малоконтрастных объектов на наблюдаемой поверхности теории фракталов [4–6]. В рамках этого подхода изображения рассматриваются не как совокупность отдельных элементов с определенными характеристиками, а как некоторая структура, обладающая внутренними топологическими связями между элементами и характеризующая сложный и протяженный объект в целом. Многочисленные исследования радиолокационных и оптических изображений природных поверхностей в различных диапазонах пространственных масштабов показали, что в большинстве случаев они обладают фрактальными свойствами. В частности, фрактальная размерность D (размерность Хаусторфа – Безиковича), которая количественно оценивает сложность и хаотический характер природных текстур, может быть использована в качестве эффективного признака сегментации РЛИ.

Цель настоящей работы – оценка возможности использования поля фрактальной размерности для выделения на космических РЛИ различных классов слабоконтрастных объектов. В работе также дана количественная оценка эффективности кластеризации по яркостному полю (методы ISODATA и К-ближайших соседей) и по полю фрактальной размерности на основе экспериментальной обработки фрагментов космических РЛИ.

2. Фрактальные свойства изображений

Фракталы относятся к множествам с крайне нерегулярной и разветвленной или изрезанной структурой. Очевидно, что одним из важнейших вопросов фрактальной геометрии является связь фракталов и текстуры. Вокруг обнаруживаемой цели всегда присутствуют участки фоновых отражений, объединенные общим понятием текстуры. В отличие от тона и цвета, которые относятся к отдельным фрагментам изображения, текст-

тура связана с более чем одним фрагментом. Понятие текстуры вводится, как матрицы пространственных свойств участков изображений с однородными статистическими характеристиками. Тектурные признаки основаны на статистических характеристиках *уровней интенсивности (яркости)* элементов изображения и относятся к вероятностным признакам, случайные значения которых распределены по всем классам природных объектов. Решение о принадлежности текстуры к тому или иному классу может приниматься только на основании конкретных значений признаков данной текстуры. При этом оказывается, что независимо от размеров и формы окна обработки при попадании в него однородных текстур, относящихся к одному классу, значения фрактальной размерности для этих объектов будут совпадать. Отсюда становится возможным, при сохранении условий изотропности, относить объект к тому или иному классу, руководствуясь лишь одним параметром – фрактальной размерностью.

Понятие фрактал не имеет строгого определения. При исследовании природных текстур вводится понятие физических фракталов, как геометрических объектов, имеющих сильно изрезанную структуру и обладающих свойствами самоподобия в ограниченном масштабе. Физические фракталы обладают следующими свойствами:

- дробная размерность Хаусдорфа – Безиковича $D \geq D_0$;
- конечный интервал масштабов самоподобия;
- кусочно-дифференцируемая функция.

Условие самоподобия подразумевает совпадение стохастических характеристик на различных масштабах.

3. Дробная размерность

Понятие дробной размерности опирается на анализ понятия топологической размерности D_0 . Фракталы можно рассматривать как множество точек, вложенных в пространство. В частности, точка имеет топологическую размерность $D_0 = 0$. Гладкие кривые – окружности, прямые – $D_0 = 1$. Размерность поверхности $D_0 = 2$, объемных тел $D_0 = 3$, гипертел $D_0 > 3$.

Определение меры Хаусдорфа – Безиковича опирается на математическую абстракцию практического способа измерения длин, площадей и объемов, когда исследуемый объект покрывается эталонами с определенными мерами. Для обычных объектов оценки мер сходятся при предельном переходе к асимптотике, являющейся истиной мерой объекта.

Точное определение размерности Хаусдорфа – Безиковича вводится следующим образом. Пусть $M = (M, \rho)$ – метрическое

пространство: $B(M)$ – булева алгебра подмножества M ; E – ограниченное множество, причем $E \subset B(M)$, $h(t)$ – непрерывная неубывающая функция, определенная на неотрицательной оси (хаусдорфова функция). Пусть $d(E)$ обозначает диаметр E по отношению к метрике ρ . Под покрытием множества E будем понимать набор шаров E_j , объединение которых содержит E . Значение $h(d(E_j))$ будем называть объемом шара E_j .

С учетом этого, функцию множества μ_ρ^h , определяемую равенством

$$\mu_\rho^h(E) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \inf_{d(E_j) \leq \varepsilon} \left\{ \sum_{j=1}^{\infty} h(d(E_j)) \mid E \subseteq \bigcup_{j=1}^{\infty} E_j, \forall j d(E_j) \leq \varepsilon \right\}, \quad (1)$$

называют h -мерой Хаусдорфа множества E в метрическом пространстве (M, ρ) . Мера μ_ρ^h определена для любого ограниченного множества $E \subset M$. Мера может быть равна положительному числу, нулю или бесконечности. Если хаусдорфова функция определяется как

$$h(t) = ct^m, \quad (2)$$

где c – некоторый масштабирующий коэффициент, выражение (1) определяет меру μ_ρ^h , как нижний предел суммы объемов m -мерных шаров, с помощью которых осуществляется покрытие множества E .

Неотрицательное число D , при котором хаусдорфова мера μ_ρ^h изменяет свое значение с нуля на бесконечность,

$$D = \sup \left\{ D \mid \mu_\rho^d(E) \neq 0 \right\} = \inf \left\{ D \mid \mu_\rho^d(E) = 0 \right\} \quad (3)$$

называется размерностью Хаусдорфа – Безиковича множества $E \subset M$.

Определение размерности Хаусдорфа – Безиковича требует предельного подхода к бесконечно малым объемам. При физических измерениях такое определение использовать невозможно, так как различные физические системы обладают минимальными характерными размерами. Поэтому фрактальную размерность D оценивают по наклону логарифмической зависимости $S = S(\varepsilon)$, где S – измеряемое значение (длина линии, периметр или площадь объекта); ε – шаг измерения (масштаб) или размер сканирующего окна:

$$S(\varepsilon) = C\varepsilon^{-D}, \quad (4)$$

где C – масштабирующий коэффициент, а дробный параметр D является размерностью Хаусдорфа – Безиковича или фрактальной размерностью.

Данный подход позволяет производить расчет фрактальной размерности для разномасштабных изображений, а фрактальную размерность оценивать следующим образом:

$$D = -\frac{\lg S(\varepsilon)}{\lg \varepsilon} + \frac{\lg C}{\lg \varepsilon}. \quad (5)$$

При обработке цифрового изображения $I(i, j)$ фрактальная размерность D различных объектов оценивается по изменениям некоторого параметра при различных масштабах (4). Для объектов, имеющих простой геометрический вид, эта размерность равна топологической, т. е. принимает целочисленные значения. Значения фрактальной размерности сложных объектов являются дробными и лежат в диапазоне от двух ($I(i, j) = 0, \forall i, j$) – топологическая размерность плоскости до трех ($I(i, j) = \text{const} \neq 0, \forall i, j$) – топологическая размерность объема.

Фрактальная размерность D большинства изображений реальных покровов и метеорологических образований больше топологической размерности D_0 и характеризует степень заполнения пространства, в котором существует фрактальная структура. Таким образом, размерность Хаусторфа – Безиковича количественно учитывает сложность и хаотический характер изменения интенсивности отражений от природных текстур.

Установление инвариантности фрактальной размерности изображений природных образований от их яркости явилось основной предпосылкой для перехода к фрактальной обработке сложных изображений [4].

4. Фрактальная обработка изображений

В рамках настоящей работы под процессом фрактальной обработки понимается последовательное выполнение следующих этапов:

1. Построение поля фрактальной размерности многоканального РЛИ.
2. Пороговая обработка поля фрактальной размерности.
3. Кластеризация РЛИ по полю фрактальной размерности.

В практических задачах обработки изображений, полученных в системах ДЗЗ, расчет фрактальной размерности чаще всего производится на основе определения показателя Херста, применения локально-дисперсионного метода, метода покрытия, метода призмы и ряда других методов, подробно описанных в [7; 8]. Однако даже при обработке одного изображения различными методами, результаты зачастую отличаются друг от друга. При расчете фрактальной размерности на практике следует выби-

рать соответствующий алгоритм из соображений вычислительной точности, скорости и системных ресурсов.

В настоящей работе построение поля фрактальной размерности производилось с использованием метода призмы и предложенной авторами модификации локально-дисперсионного метода, отличающейся от известного использованием набора разномасштабных изображений, полученных на основе вейвлет-преобразования исходного снимка [8]. Обработке подвергались фрагменты космических РЛИ, содержащих границы суши и водоемов, нефтяных пятен на водной поверхности, сельскохозяйственные угодья с растительностью различной степени вегетации.

При проведении фрактального анализа необходимо учитывать тот факт, что исследуемое изображение состоит из фрагментов, имеющих различные значения фрактальной размерности. Поэтому при фрактальном анализе изображений, содержащих различные природные текстуры, требуется проведение оконной обработки изображения с вычислением в предлагаемом окне локальной фрактальной размерности. В этом случае результатом обработки изображения является построение поля фрактальной размерности, при котором каждому пикселю изображения ставится в соответствие значение D . Расчет фрактальной размерности производится в скользящем или прыгающем окне K размером $k \times k$ с шагом $s = 1$ для скользящего и $s > 1$ для прыгающего, при помощи которого производится сканирование исходного изображения, а затем одному из пикселей изображения, принадлежащему сканирующему окну, ставится в соответствие полученное значение фрактальной размерности.

В процессе построения поля фрактальной размерности возникает вопрос выбора размера сканирующего окна. Если размер окна равен размеру исследуемого элемента, то возникает ситуация, при которой в окне обработки в один момент времени оказывается только часть исследуемого элемента. Это приводит к искажению оценки фрактальной размерности, так как, кроме необходимой фрактальной структуры, в область анализа попадает и фон, размерность которого другая. Это приводит к появлению на изображении поля фрактальной размерности характерной границы разнородных фрактальных областей, ширина которой равна размеру окна обработки. Поэтому приходится выбирать размеры окон заведомо малыми, близкими к размерам минимальных элементов ожидаемого фрактального рисунка. В тоже время, в силу ограниченности масштабов самоподобия физических фракталов, чрезмерное уменьшение окна обработки может привести к отличиям в оценке фрактальной размерности в выбранном окне и действительной размерности фрак-

тальной текстуры. На практике это приводит к необходимости проведения множества экспериментов и подбора опытным путем необходимого размера окна для решения конкретных задач.

5. Экспериментальная обработка радиолокационных изображений

5.1. Фрактальный анализ изображений границ суши и водоемов

Анализировался фрагмент РЛИ участков водоема со слабо различимыми отмелями и прибрежных зон, полученное со спутника ALOS с разрешением 10 м (интервал дискретизации 5 м). РЛИ было предоставлено АО «Уралгеоинформ» в рамках совместной НИР. Подробно процедура фрактального анализа описана нами в [9].

Анализ построенной гистограммы полей фрактальных размерностей этого РЛИ показывает, что диапазон изменения D всего изображения варьируется от 2.734 до 2.989 для поля, построенного по методу призмы, и от 2.712 до 2.997 при использовании локально-дисперсионного метода. При этом диапазон фрактальных размерностей ($D = 2.734 \div 2.783$ для первого метода и $D = 2.712 \div 2.778$ для второго) соответствует водной поверхности; второй диапазон ($D = 2.783 \div 2.832$ и $D = 2.778 \div 2.827$) выделяет области песчаных отмелей; третий диапазон ($D = 2.832 \div 2.989$ и $D = 2.827 \div 2.997$) отражает территорию суши.

На рис. 1 представлено РЛИ прибрежной зоны до и после проведения пороговой обработки с использованием поля фрактальной размерности, построенного по модифицированному локально-дисперсионному методу. Размер окна $k = 19$. Разделение на классы происходило по значению фрактальной размерности $D = 2.819$.

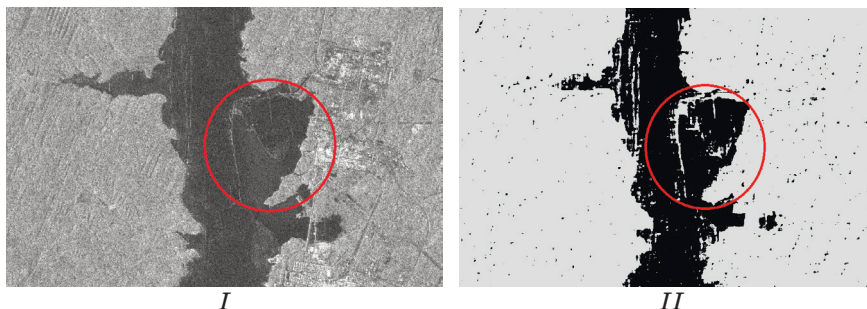


Рис. 1. Фрактальный анализ фрагмента РЛИ: исходное изображение (*I*); результат пороговой обработки поля фрактальной размерности (*II*)

Fig. 1. Fractal analysis of the radar image fragment: the original image (*I*); the result of threshold processing of the fractal dimension field (*II*)

Сравнение исходного изображения и изображения поля фрактальных размерностей позволяет сделать вывод о возможности выделения слабоконтрастных областей (на рисунке отмечены кругом) при использовании фрактальной обработки.

5.2. Фрактальный анализ изображений неоднородностей на морских поверхностях

Для анализа изображений морской поверхности с использованием поля фрактальной размерности использовались фрагменты РЛИ, выставленные в свободном доступе в Internet.

На рис. 2 представлен фрагмент РЛИ акватории Новороссийской бухты (данные спутника Radarsat-1 с разрешением 12,5 м).

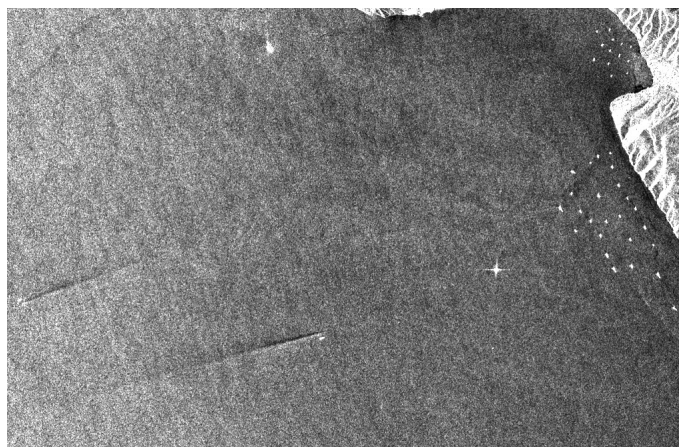


Рис. 2. Исследуемое РЛИ

Fig. 2. The investigated radar image

Гистограммы распределения фрактальных размерностей этого РЛИ, построенные при использовании окна 9×9 представлены на рис. 3(I) (метод призмы) и 3(II) (модифицированный локально-дисперсионный метод). Диапазон D фрактальных размерностей данного изображения изменяется от 2.512 до 3 для поля, построенного по методу призмы, и от 2.43 до 2.98 при использовании локально-дисперсионного метода. Левая часть гистограммы резко возрастает до значений близких к 2.7 для обоих используемых методов. После этого наблюдается резкий спад числа пикселей до значения фрактальной размерности около 2.8. На гистограммах, построенных обоими методами, выделяется участок сравнительно небольшого числа пикселей со значением фрактальной размерности от 2.8 до 2.95, после этого число пикселей со значением фрактальной размерности более 2.95 спадает до нуля.

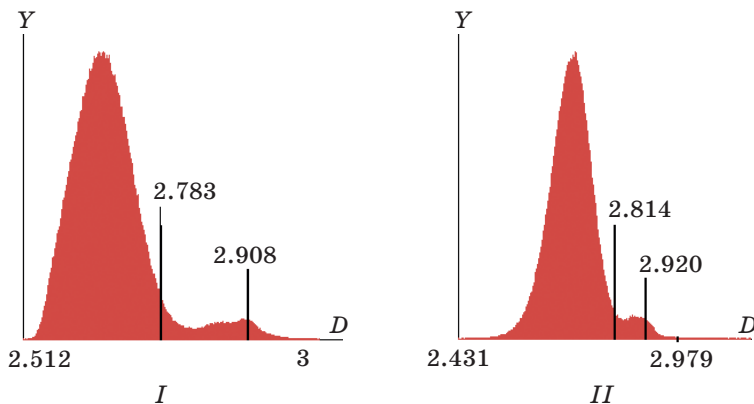


Рис. 3. Гистограммы распределения значений фрактальной размерности: метод призмы (I); модифицированный локально-дисперсионный метод (II)

Fig. 3. Histograms of distribution of values of the fractal dimension: a method of prism (I); the modified local dispersion method (II)

Далее проводилась оценка полученных значений фрактальных размерностей для выделения кильватерных следов и неоднородностей на морской поверхности.

На рис. 4 представлены результаты двухпороговой обработки полей фрактальных размерностей, построенных различными методами. В качестве пороговых выбраны значения фрактальных размерностей, обозначенные на рис. 3.

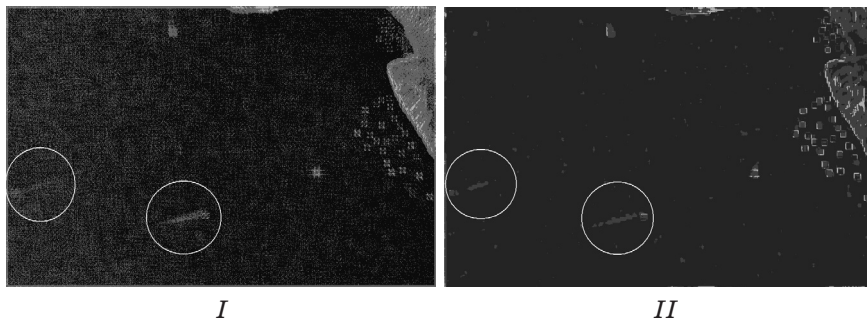


Рис. 4. Результат двухпороговой обработки поля фрактальных размерностей: метод призмы (I); модифицированный локально-дисперсионный метод (II)

Fig. 4. The result of two-threshold processing of fractal dimension field: prism method (I); modified local dispersion method (II)

Из сопоставления рис. 3(I) и рис. 4(I) первый диапазон фрактальных размерностей ($D = 2.512 \div 2.783$) соответствует изображению морской поверхности; второй диапазон ($D = 2.783 \div 2.908$) выделяет слабоконтрастные неоднородно-

сти на морской поверхности (кильватерные следы морских судов); третий диапазон ($D = 2.908 \div 3$) определяет неоднородную структуру береговой поверхности. Для рис. 4(II) диапазоны значений фрактальных размерностей соответствуют тем же типам текстур. Полученные результаты демонстрируют возможность обнаружения неоднородностей на морской поверхности обоими представленными методами. Однако модифицированный локально-дисперсионный метод демонстрирует лучшие возможности для детектирования неоднородных объектов: для обоих представленных на изображении судов четко выделяются траектории их движения на фоне спокойной морской поверхности (на рисунке отмечены кругами). В тоже время для метода призмы при тех же условиях обработки левое судно оказывается менее заметно, чем правое, на фоне морской поверхности. При обработке изображений различными методами проявляется независимость результатов от метода расчета, значения фрактальной размерности для границы разнотипных областей оказываются близкими.

В ходе эксперимента проводился также анализ зависимости значений фрактальной размерности от окна обработки. На рис. 5 показаны гистограммы D анализируемого изображения при окнах обработки k равных 7, 11, 15, 19 и 23 пикселям.

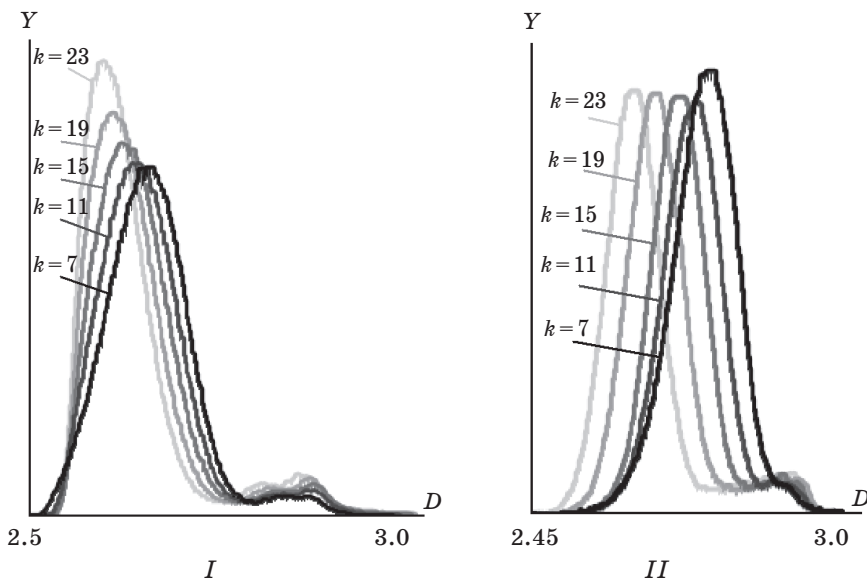


Рис. 5. Гистограмма фрактальных размерностей при различных размерах окна: метод призмы (I); модифицированный локально-дисперсионный метод (II)

Fig. 5. Histogram of fractal dimensions at different window sizes: prism method (I); modified local dispersion method (II)

Как видно из хода кривых на рис. 5, с увеличением размера окна характер гистограмм изменяется. Форма графика вытягивается вдоль оси ординат и сужается вдоль оси абсцисс. В то же время для модифицированного локально-дисперсионного метода наблюдается эффект вытягивания хвоста гистограммы, соответствующего пикселям неоднородностей на морской поверхности, что приводит к лучшему выделению таких неоднородностей при увеличении окна обработки, в то время как, для метода призмы такое поведение обнаружено не было.

На рис. 6 приведены результаты фрактального анализа РЛИ акватории морского порта (РСА спутника TerraSAR-X, район города Барселоны, разрешение 3 м). Полученная гистограмма позволяет выделить такие же классы исследуемых текстур, как и при анализе изображения, представленного на рис. 2, что свидетельствует об общих чертах поведения гистограмм полей фрактальных размерностей при наблюдении морской поверхности в сочетании с береговой линией. Однако при обработке данного изображения обнаруживается существенное отличие от предыдущего примера. При анализе гистограммы удается обнаружить участок фрактальных размерностей ($D = 2.644 \div 2.723$), соответствующий неоднородностям на морской поверхности, но

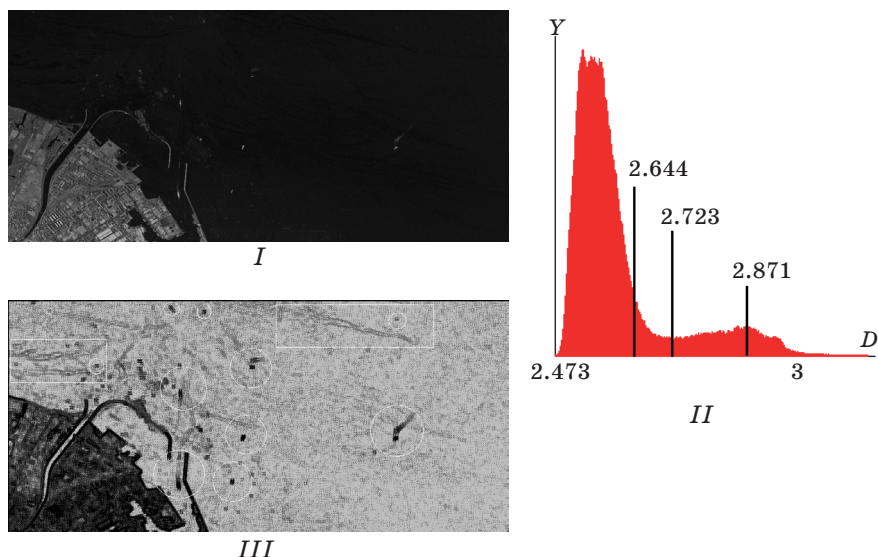


Рис. 6. Фрактальный анализ изображения акватории морского порта: исходное РЛИ (I); гистограмма поля фрактальных размерностей (II), результат кластерного анализа (III)

Fig. 6. Fractal analysis of the radar image of the seaport water area: initial image (I); field histogram of fractal dimensions (II), the result of cluster analysis (III)

при этом не являющихся результатом возмущения от проходящих судов. К таким неоднородностям можно отнести морские течения, участки загрязнений, водоразделы зон с различным химическим составом вод. Таким образом, в результате фрактального анализа удастся разделить кильватерные следы и другие неоднородности на морской поверхности по различным классам выделяемых текстур. Результаты кластерного анализа по полю фрактальной размерности (метод призмы, $k = 5$) приведены на рис. 6(III). На представленных изображениях кругами обозначены суда и кильватерные следы, прямоугольниками – морские течения и участки загрязнений.

В ходе анализа РЛИ судов, береговых застроек, портовой инфраструктуры было обнаружено, что при использовании методов фрактальной обработки не удастся разделять на классы объекты, обладающие слабыми стохастическими свойствами. Представленный на рис. 6(I) фрагмент порта содержит на изображении улицы, границы районов и домов. На гистограмме поля фрактальных размерностей эти объекты попадают в интервал $D = 2,871 \div 3$, при этом фрактальная размерность судов (в отличие от кильватерных следов) также оказывается в этом диапазоне. Это приводит к тому, что при проведении процедуры автоматической кластеризации по полю фрактальных размерностей эти объекты попадают в один класс. Такая картина наблюдается при любом значении размера окна обработки. Таким образом, с использованием теории фракталов могут быть исследованы области изображений, относящиеся к различным классам природных образований, которые сохраняют свои стохастические характеристики, независимо от масштаба изображения [4; 6]. Объекты неприродного происхождения в силу своей слабой стохастической зависимости, при обработке практически не удается разделить на подклассы.

5.3. Фрактальный анализ изображений нефтяных разливов

РЛИ, содержащее изображение нефтяных разливов, представлено на рис. 7. Фрагмент содержит береговую линию и морскую акваторию залива с присутствующими на морской поверхности протяженными нефтяными пятнами.

Поля фрактальных размерностей строились для скользящих окон размером 7×7 , 9×9 , 11×11 , 13×13 , 15×15 , 17×17 , 19×19 , 21×21 , 23×23 , 25×25 , 27×27 , 29×29 пикселей. Гистограммы поля фрактальных размерностей анализируемого фрагмента РЛИ, построенные с использованием модифицированного локально-дисперсионного метода для значений $k = 11$, $k = 17$, $k = 23$ и $k = 29$, приведены соответственно на рис. 8(I–IV).

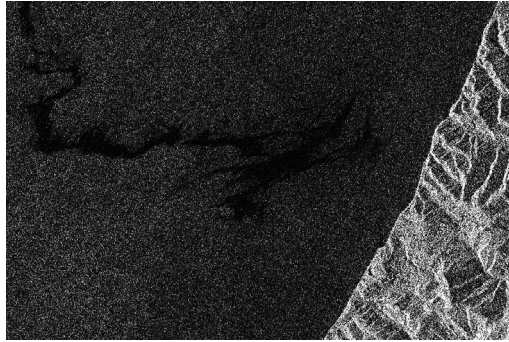


Рис. 7. РЛИ морской поверхности с нефтяными пятнами
Fig. 7. Radar images of the sea surface from oil stains

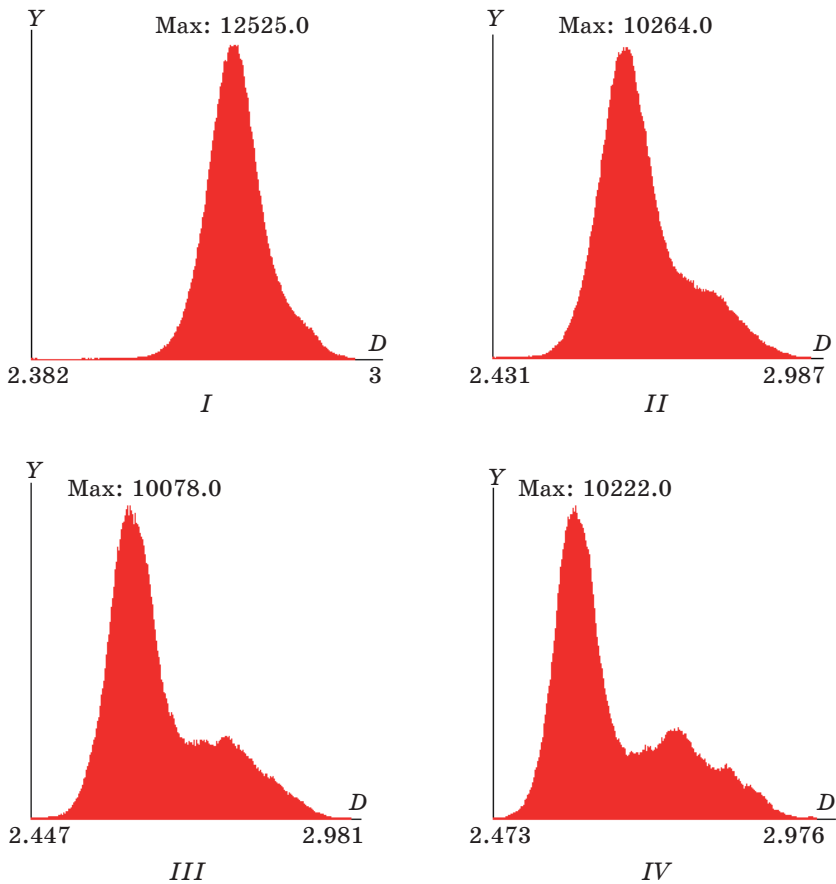


Рис. 8. Гистограммы полей фрактальных размерностей при различных размерах окна обработки

Fig. 8. The histogram of the fields of fractal dimensions for various sizes of a processing window

Как следует из анализа гистограмм, приведенных на рис. 8, диапазон изменения фрактальных размерностей с увеличением размера скользящего окна уменьшается. При выборе окна размером 11×11 пикселей фрактальная размерность изменяется в диапазоне $D = 2.382 \div 2.987$, при размере окна 17×17 диапазон изменения фрактальных размерностей становится $D = 2.431 \div 2.987$, при размере окна 23×23 $D = 2.435 \div 2.981$, а для размера окна 29×29 $D = 2.507 \div 2.976$. Сужение диапазона изменения фрактальных размерностей приводит в тоже время к увеличению количества пикселей, соответствующего значению фрактальной размерности. Таким образом, увеличение окна обработки приводит к сужению гистограммы поля фрактальной размерности вдоль оси X и вытягиванию ее вдоль оси Y .

В табл. 1 приведены значения фрактальной размерности D , соответствующей максимальному значению гистограммы, в зависимости от размера окна обработки k . Значения фрактальной размерности вычислялись двумя методами: методом призмы и модифицированным локально-дисперсионным методом.

Таблица 1. Зависимость максимального значения фрактальной размерности от размеров окна обработки

Table 1. Dependence of the maximum value of fractal dimension on the size of the processing window

Размер окна k	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	29
D метод призмы	2.782	2.759	2.732	2.720	2.695	2.678	2.671	2.645	2.623	2.609	2.614	2.608
D модифицированный локально-дисперсионный метод	2.784	2.772	2.767	2.746	2.700	2.659	2.632	2.621	2.613	2.614	2.601	2.594

При увеличении размера окна обработки значения фрактальных размерностей для одних и тех же участков местности уменьшаются. При этом значения фрактальных размерностей, полученные различными методами для окон одинакового размера, остаются близкими.

На рис. 9 представлены результаты фрактальной обработки РЛИ, приведенного на рис. 7. Фрактальная размерность вычислялась с использованием модифицированного локально-дисперсионного метода в окне 29×29 пикселей. Видно, что изображение поля фрактальных размерностей (рис. 9(I)) имеет более низкое пространственное разрешение, чем исходное РЛИ. Это объясняется использованием оконной обработки при проведении фрактального анализа. В тоже время полученное изображение демонстрирует отчетливое выделение границ нефтяных пятен на

морской поверхности даже без дополнительной кластеризации. На рис. 9(II) приведен результат двухпороговой кластеризации изображения рис. 9(I) при определении трех классов природных текстур: морская поверхность, нефтяное загрязнение, суша.

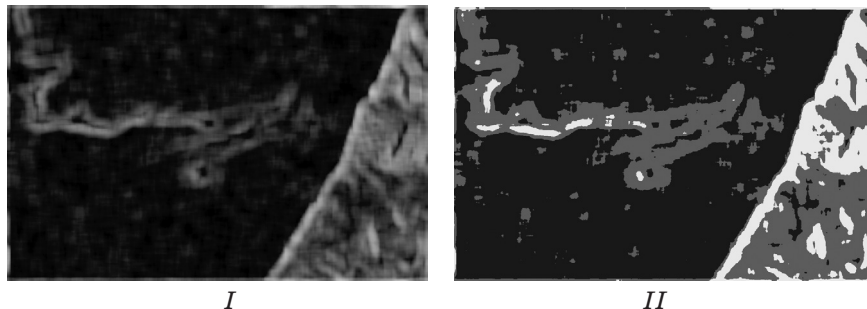


Рис. 9. Результат фрактальной обработки РЛИ нефтяных разливов на морской поверхности

Fig. 9. The result of fractal treatment of oil spills on the sea surface

5.4. Анализ эффективности проведения процедуры кластеризации по полю фрактальных размерности

Оценка эффективности проведения кластеризации по полю фрактальных размерностей проводилась путем сравнения результатов проведения процедуры автоматической кластеризации по яркостному полю (амплитудное РЛИ) и полю фрактальных размерностей с использованием двух алгоритмов: ISODATA и К-ближайших соседей с последующим подсчетом количества неправильно интерпретированных пикселей. В качестве исследуемого было выбрано РЛИ сельскохозяйственных земель с различной растительностью (классы 1, 2 и 4), пересекаемых рекой (класс 3), полученное РСА спутника TerraSAR-X с разрешением 1 м (рис. 10).

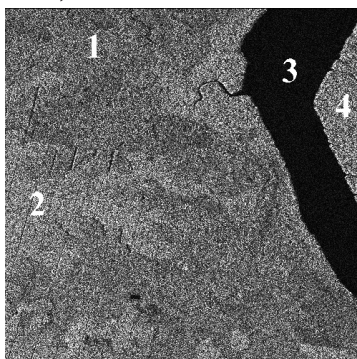


Рис. 10. Радиолокационное изображение сельскохозяйственных земель, пересекаемых рекой

Fig. 10. Radar image of agricultural land crossed by the river

В результате эксперимента было установлено, что при обработке яркостного поля (амплитудное РЛИ) исходного фрагмента методами ISODATA и K -ближайших соседей наблюдается множественный переход пикселей из класса в класс в пределах одной области. Применение фрактальной обработки (модифицированный локально-дисперсионный метод – МЛДМ, окно 7×7) позволяет снизить вероятность неправильной классификации и перехода пикселей из класса в класс. Определение областей становится однозначным.

Для оценки качества кластеризации изображений, полученных в результате обработки исходного изображения фрагмента и полей фрактальной размерности, проведен подсчет количества неправильно интерпретированных пикселей там, где по априорным данным перехода из класса в класс происходить не должно (табл. 2).

Таблица 2. Количество неправильно интерпретированных пикселей

Table 2. The number of misinterpreted pixels

Исследуемая область	Амплитудное РЛИ		Поле фрактальной размерности, МЛДМ, $k = 7$	
	ISODATA	K -ближайших соседей	ISODATA	K -ближайших соседей
1	136	125	43	62
2	38	28	5	3
3	72	96	2	4
4	112	98	51	47

Сравнение эффективности кластеризации по амплитудному РЛИ и по полю фрактальной размерности на основе обработки космического РЛИ, приведенного на рис. 10, показало, что применение фрактальной обработки при сегментации на 4 класса методами ISODATA и k -ближайших соседей приводит к снижению количества неправильно интерпретируемых пикселей в 3–5 раз.

Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что кластеризация с применением фрактальной обработки позволяет добиться большей точности разделения различных типов природных объектов на классы, уменьшает вероятность ошибочного попадания пикселей в тот или иной класс.

Оценку улучшения дифференциации различных областей на радиолокационных изображениях природных текстур при использовании фрактальной обработки можно также сделать на основе вычисления попарных расстояний Бхаттачарья и Джеффриса – Матусита [10]:

$$B = \frac{(m_1 - m_2)^2}{4 \cdot (\sigma_1^2 + \sigma_2^2)} + \ln \left(\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2\sigma_1\sigma_2} \right) / 2, \quad (6)$$

$$J = 2(1 - e^{-B}), \quad (7)$$

где m_i и σ_i^2 – математическое ожидание и дисперсия распределения интенсивности i -й текстуры на амплитудном РЛИ или на фрактальном изображении. Предельное значение J , судя по формуле (7), ограничено числом 2.

Значения вычисленных попарных расстояний для фрагментов исследуемых областей размером 30 на 30 пикселей приведены в таблице 3. Оценка попарных расстояний Бхаттачарья (B) и Джеффриса – Матусита (J) проводилась в условиях сравнения первой области с тремя остальными.

Таблица 3. Значения попарных расстояний для исследуемых областей

Table 3. Values of pairwise distances for the studied areas

Разделяемые области	B		J	
	Амплитудное РЛИ	Поле фрактальной размерности, МП, 3×3	Амплитудное РЛИ	Поле фрактальной размерности, МП, 3×3
1 и 3	0.048	0.128	0.093	0.240
1 и 2	0.023	0.046	0.046	0.090
1 и 4	0.023	0.045	0.046	0.087

Применение фрактальной обработки изображений разнородных областей увеличило расстояние Джеффриса – Матусита между объектами этих областями в 2–2,5 раза, по сравнению с кластеризацией по амплитудному РЛИ.

Увеличение расстояний B и J свидетельствует о лучшей дифференциации различных объектов и областей. Полученный результат позволяет сделать вывод о том, что кластеризация с применением фрактальной обработки позволяет добиться большей точности разделения различных типов природных текстур.

6. Заключение

Определена целесообразность использования фрактальных методов обработки космических РЛИ при решении задач автоматизированной кластеризации и распознавания протяженных слабоконтрастных объектов. Показано, что построение поля фрактальной размерности РЛИ и последующая многопороговая обработка позволяют определять принадлежность исследуемых объектов к различным классам природных текстур (водная по-

верхность, отмели, кильватерные следы, нефтяные пятна, суша и др.) с использованием единственного параметра – фрактальной размерности D .

Установлено, что независимо от используемого метода расчета фрактальной размерности общий вид гистограмм сохраняется, при этом границы областей характеризуются одинаковыми значениями фрактальной размерности, что дает возможность идентифицировать различные типы исследуемых текстур.

При кластеризации по полю фрактальной размерности появляется возможность обнаружить области, слабо различимые на исходных РЛИ, а также в ряде случаев определить различные типы неоднородностей на морской поверхности. Вместе с тем объекты, РЛИ которых обладают слабыми стохастическими свойствами (корабли, портовые сооружения и т.п.), не удается разделить на подклассы.

Применение фрактальной обработки изображений разнородных областей позволяет увеличить расстояние Джеффриса – Матусита между этими областями в 2–2,5 раза, что увеличивает дифференциацию различных типов природных объектов при проведении процедуры кластеризации. Сравнение эффективности кластеризации по амплитудному РЛИ и по полю фрактальной размерности показало, что применение фрактальной обработки при сегментации на 4 класса методами ISODATA и k -ближайших соседей приводит к снижению количества неправильно интерпретируемых пикселей в 3–5 раз.

Список литературы

1. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. *Радиолокационные системы землеобзора космического базирования*. М.: Радиотехника; 2010.
2. Верба В. С., Неронский Л. Б., Поливанов С. С. Тенденции развития систем радиолокационного наблюдения космического базирования. *Наукоемкие технологии*. 2009;10(8):3–9.
3. Gonzales R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall; 2002.
4. Потапов А. А. *Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки*. М.: Университетская книга; 2005.
5. Герман В. А., Кузнецов Е. В., Потапов А. А., Чесноков Ю. С. Проектирование фрактальных радиосистем. Избранные вопросы фрактальной обработки реальной радиолокационной информации. *Нелинейный мир*. 2006;(4-5):208–213.
6. Иванов В. К., Пащенко Р. Э., Стадник А. М., Яцевич С. Е., Васильев А. С. Использование теории фракталов для анализа радиолокационных изображений поверхности Земли. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2006;(5):17–45.

7. Потапов А. А., Герман В. А. О методах измерения фрактальной размерности и фрактальных сигнатур многомерных стохастических сигналов. *Радиотехника и электроника*. 2004;49(12):1468–1491.

8. Тренихин В. А., Коберниченко В. Г. Оценка фрактальной размерности космических снимков на основе модификации локально-дисперсионного метода. *Нелинейный мир*. 2009(2):146–153.

9. Тренихин В. А., Коберниченко В. Г. Фрактальная кластеризация радиолокационных и многозональных изображений в системах дистанционного зондирования Земли. *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2012;(Специальный выпуск):77–83.

10. Nussbaum S., Menz G. (eds). *Object-Based Image Analysis and Treaty Verification: New Approaches in Remote Sensing – Applied to Nuclear Facilities in Iran*. Netherlands: Springer Science+Business Media B.V.; 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-6961-1

References

1. Verba V. S., Neronskiy L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Spaceborne Earth Surveillance Radar Systems*. Moscow: Radiotekhnika; 2010. (In Russ.).

2. Verba V. S., Neronskiy L. B., Polivanov S. S. Development trends of space borne radar systems. *Journal Science Intensive Technologies*. 2009;10(8):3–9. (In Russ.).

3. Gonzales R. C., Woods R. E. *Digital Image Processing*. Prentice Hall; 2002.

4. Potapov A. A. *Fractals in Radiophysics and radiolocation: Topology of sample*. Moscow: Univercitetskaiya kniga; 2005. (In Russ.).

5. German V. A., Kuznetsov E. V., Potapov A. A., Thesnokov U. S. Design of fractal radio systems. Selected questions of fractal processing of real radar information. *Journal Nonlinear World*. 2006;(4-5):208–213. (In Russ.).

6. Ivanov V. K. Paschenko R. E., Stadnik A. M., Jacevich S. E., Vasilev A. S. Using fractal theory to analyze radar images of the earth's surface. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2006;(5):17–45. (In Russ.).

7. Potapov A. A., German V. A. Methods of measuring the fractal dimension and fractal signatures of a multidimensional stochastic signal. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2004;49(12):1370–1391.

8. Trenikhin V. A., Kobernichenko V. G. Estimation of the fractal dimension of satellite images on the basis of modification of the local dispersion method. *Journal Nonlinear World*. 2009 (2):146–153. (In Russ.).

9. Trenikhin V. A., Kobernichenko V. G. Fractal clustering of radar and multispectral images in earth remote sensing systems. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics*. 2012;(Specialny vipusk):77–83. (In Russ.).

10. Nussbaum S., Menz G. (eds). *Object-Based Image Analysis and Treaty Verification: New Approaches in Remote Sensing – Applied to*

Nuclear Facilities in Iran. Netherlands: Springer Science+Business Media B.V.; 2008. DOI: 10.1007/978-1-4020-6961-1

Информация об авторах

Тренихин Владимир Александрович – кандидат технических наук, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи, Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Коберниченко Виктор Григорьевич – кандидат технических наук, профессор департамента радиоэлектроники и связи, Институт радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Information about the authors

Vladimir A. Trenikhin – Candidate of Technical Sciences, senior lecturer, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF. Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Victor G. Kobernichenko – Candidate of Technical Sciences, Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF. Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Поступила / Received: 02.04.2019

Принята в печать / Accepted: 10.05.2019