

ISSN 2588-0454  
ISSNe 2588-0462

# URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL

Vol. 3, № 2  
**2019**

urj.urfu.ru

ISSN 2588-0454 (Print)

ISSN 2588-0462 (Online)



# Ural Radio Engineering Journal

**2019, Vol. 3, No. 2**

---

Scientific and Technical Journal

Established in **2017**

Published **quarterly**

The articles are published in Russian and English

Issued in Russia

Founded by Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
19, Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russia

urj.urfu.ru

ISSN 2588-0454 (Print)  
ISSN 2588-0462 (Online)



## **Уральский радиотехнический журнал**

**2019, Т. 3, № 2**

---

Научно-технический журнал

Журнал основан в 2017 г.  
Выходит четыре раза в год

Статьи публикуются на русском и английском языках

Издается в России

Учредитель — Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

## Ural Radio Engineering Journal

2019, Vol. 3, No. 2

### Editor in Chief

*Sergey T. Knyazev*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

### Editorial council

*Igor I. Abramov*, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

*Bakytzhan S. Akhmetov*, Abai Kazakh National Pedagogical University, Almaty, Republic of Kazakhstan

*Yuri P. Akulinichev*, Tomsk State University of Control Systems and Technology, Tomsk, Russia

*Stanislav N. Darovskikh*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

*Leonid G. Dorosinskiy*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*Yurij B. Gimpilevich*, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

*Vladlen I. Gusevskij*, National Research University MPEI, Moscow, Russia

*Nalik T. Isembergenov*, Kazakh National Research Technical University after K.I. Satbayev, Almaty, Republic of Kazakhstan

*Vyacheslav E. Ivanov*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*Reinhard Klette*, Auckland University of Technology, Auckland, New Zealand

*Victor G. Kobernichenko*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*Vladislav Ya. Noskov*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*Eugeny Ochinnikov*, Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland

*Boris A. Panchenko*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*Vladimir V. Sazonov*, Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Moscow, Russia

*Sergey N. Shabunin*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

*Nikolaj I. Vojtovich*, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

### Managing editor

*Nataliya V. Papulovskaya*, Ural Federal University, Ekaterinburg, Russia

## Уральский радиотехнический журнал

2019, Т. 3, № 2

### Главный редактор

*Князев Сергей Тихонович*, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Россия

### Редакционный совет

*Абрамов Игорь Иванович*, Белорусский государственный университет  
информатики и электроники, Минск, Беларусь

*Акулиничев Юрий Павлович*, Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

*Ахметов Бакытжан Сражатдинович*, Казахский национальный  
педагогический университет имени Абая, Алматы, Республика  
Казахстан

*Войтович Николай Иванович*, Южно-Уральский государственный  
университет, Челябинск, Россия

*Гимпилевич Юрий Борисович*, Севастопольский государственный  
университет, Севастополь, Россия

*Гусевский Владлен Ильич*, Национальный исследовательский  
университет «МЭИ», Москва, Россия

*Даровских Станислав Никифорович*, Южно-Уральский  
государственный университет, Челябинск, Россия

*Доросинский Леонид Григорьевич*, Уральский федеральный  
университет, Екатеринбург, Россия

*Иванов Вячеслав Элизбарович*, Уральский федеральный  
университет, Екатеринбург, Россия

*Исембергенов Налик Турегалиевич*, Казахский национальный  
технический университет им. К. И. Сатбаева, Алматы, Республика  
Казахстан

*Клетте Рейнхард*, Оклендский технологический университет,  
Окленд, Новая Зеландия

*Коберниченко Виктор Григорьевич*, Уральский федеральный  
университет, Екатеринбург, Россия

*Носков Владислав Яковлевич*, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Россия

*Очин Евгений*, Морской университет Щецина, Щецин, Польша

*Панченко Борис Алексеевич*, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Россия

*Сазонов Владимир Васильевич*, Московский физико-технический  
институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Россия

*Шабунин Сергей Николаевич*, Уральский федеральный университет,  
Екатеринбург, Россия

### Управляющий редактор

*Папуловская Наталья Владимировна*, Уральский федеральный  
университет, Екатеринбург, Россия

## Ural Radio Engineering Journal

2019, Vol. 3, No. 2

### CONTENTS

*Trenikhin V. A., Kobernichenko V. G.* Increasing the Information Content of Radar Images in Remote Sensing Systems based on Fractal Processing Methods ..... 111

*Dorosinskiy L. G., Vinogradova N. S.* The investigation of change detection algorithms for radar images using the multi-position space monitoring system ..... 132

*Polenov V. S., Nitsak D. A.* Issues of the integrated processing of gradient measurements in high sensitive magnetometry ..... 157

*Kudinov S. I., Ivanov V. E.* Research of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of superregenerative transceivers..... 170

Publication Requirements for Articles Submitted to *Ural Radio Engineering Journal*..... 195

Publication Ethics ..... 201

Article Submission Guidelines ..... 209

**Уральский радиотехнический журнал****2019, Т. 3, № 2****СОДЕРЖАНИЕ**

<i>Тренихин В. А., Коберниченко В. Г.</i> Повышение информативности радиолокационных изображений в системах дистанционного зондирования Земли на основе методов фрактальной обработки.....	111
<i>Доросинский Л. Г., Виноградова Н. С.</i> Анализ эффективности алгоритмов обнаружения изменений радиолокационных изображений поверхности в многопозиционной системе космического мониторинга ..	132
<i>Поленов В. С., Ницак Д. А.</i> Вопросы совместной обработки градиентных измерений в высокочувствительной магнитометрии .....	157
<i>Кудинов С. И., Иванов В. Э.</i> Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративных приемопередающих устройств .....	170
Требования к статьям, публикуемым в журнале <i>Ural Radio Engineering Journal</i> .....	198
Публикационная этика .....	205
Правила оформления статьи .....	209

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 К-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, тек-

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  $\rho$ . 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  $\mu_\rho^h$ , 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  $(M, \rho)$ . Мера  $\mu_\rho^h$  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  $\mu_\rho^h$ , как нижний предел суммы объемов  $m$ -мерных шаров, с помощью которых осуществляется покрытие множества  $E$ .

Неотрицательное число  $D$ , при котором хаусдорфова мера  $\mu_\rho^h$  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);  $\varepsilon$  – 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 ( $I(i, j) = const \neq 0, \forall i, j$ ) – 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.

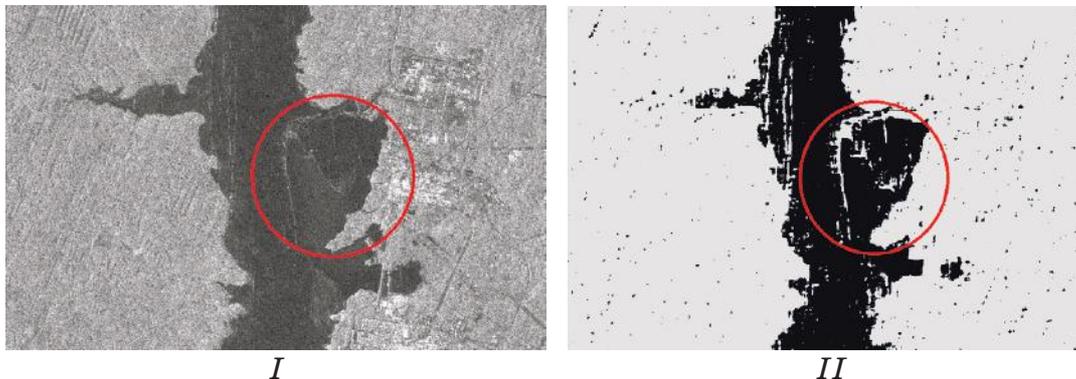
## 5. Экспериментальная обработка радиолокационных изображений

### 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).

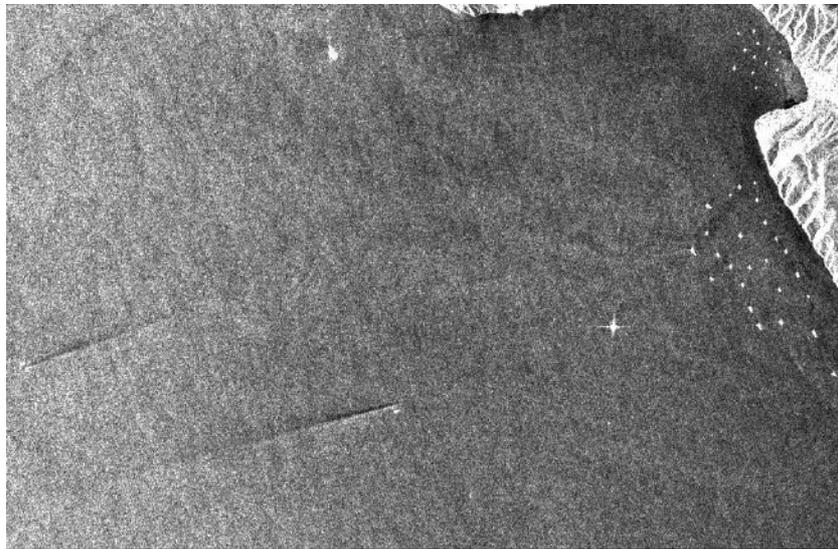
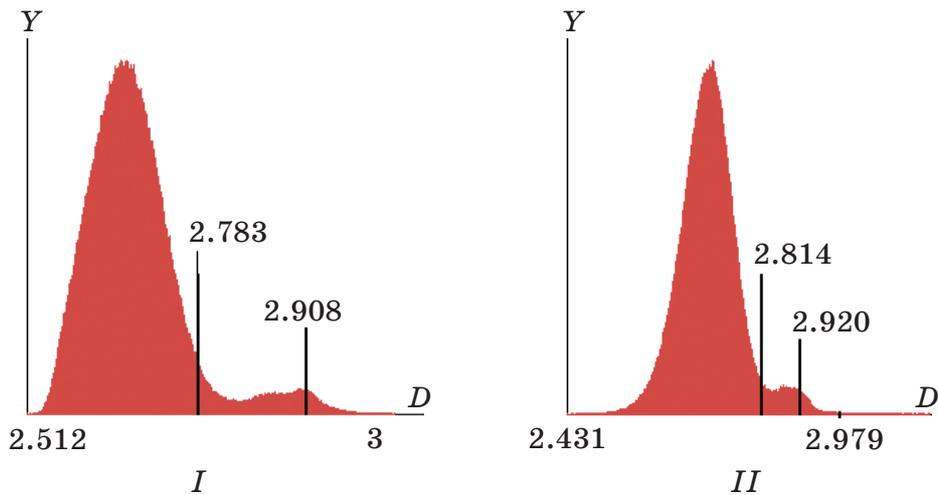


Рис. 2. Исследуемое РЛИ

Fig. 2. The investigated radar image

Гистограммы распределения фрактальных размерностей этого РЛИ, построенные при использовании окна  $9 \times 9$  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.

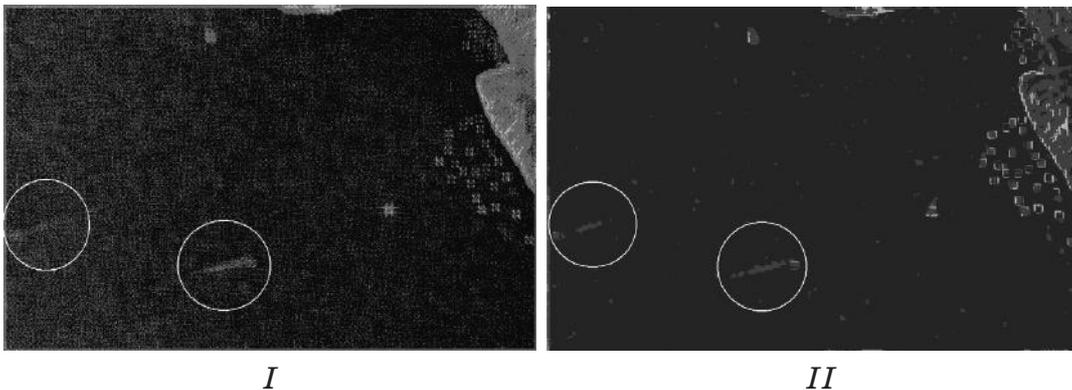


**Рис. 3.** Гистограммы распределения значений фрактальной размерности: метод призмы (*I*); модифицированный локально-дисперсионный метод (*II*)

**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.



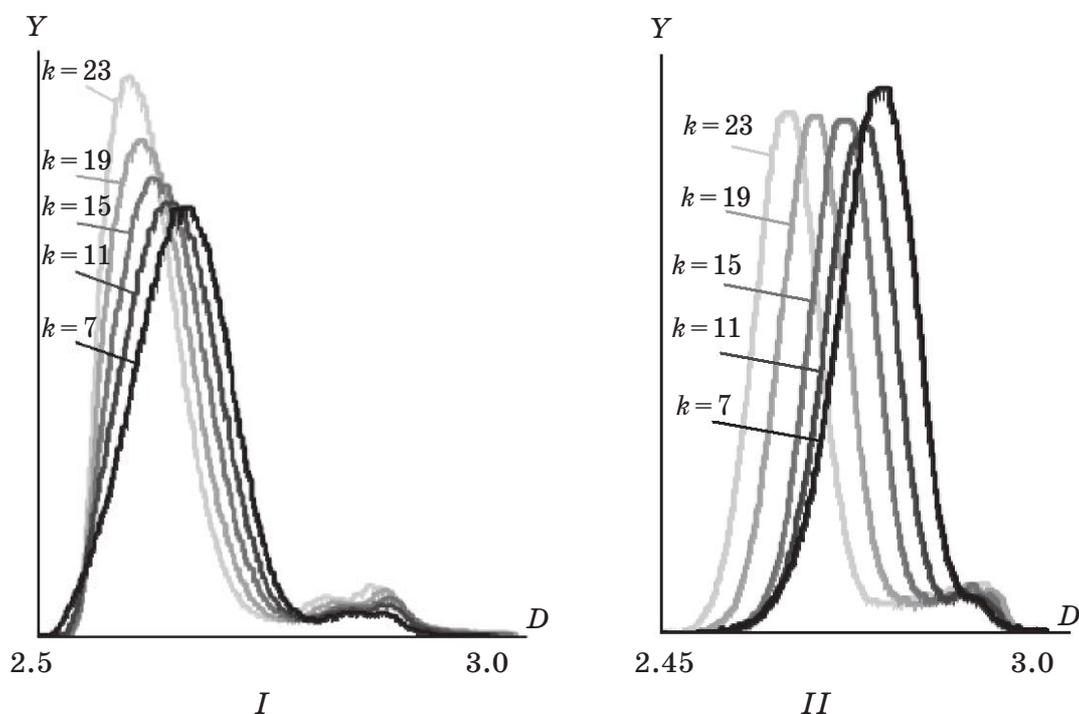
**Рис. 4.** Результат двухпороговой обработки поля фрактальных размерностей: метод призмы (*I*); модифицированный локально-дисперсионный метод (*II*)

**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.

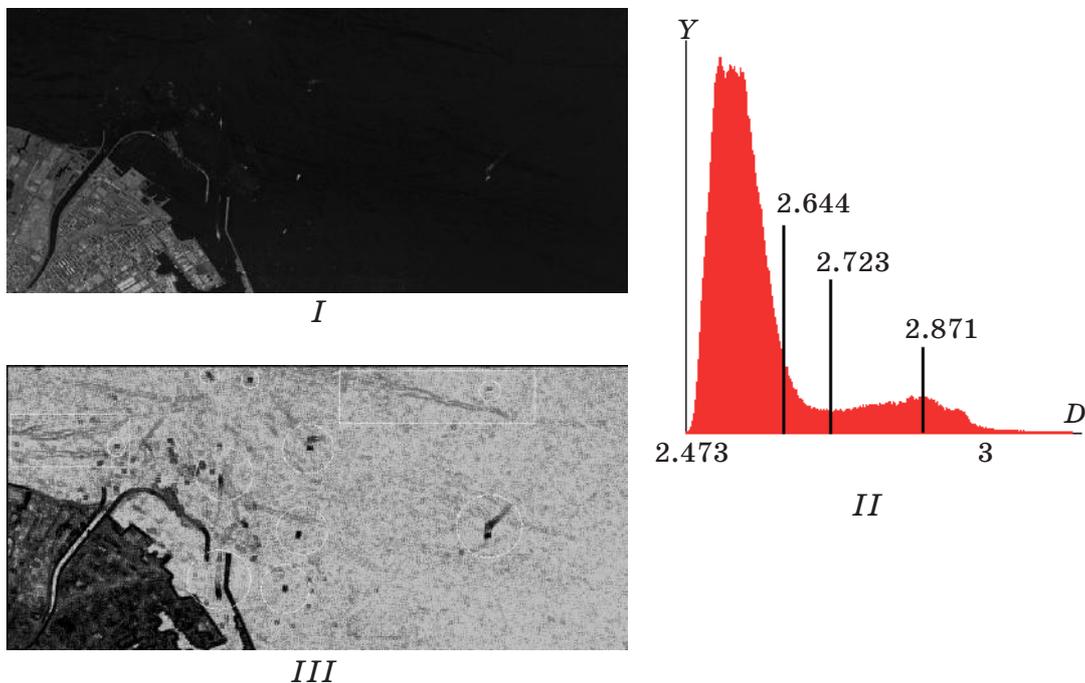


**Рис. 5.** Гистограмма фрактальных размерностей при различных размерах окна: метод призмы (I); модифицированный локально-дисперсионный метод (II)

**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 тоже 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 удастся разделить на подклассы.

### 5.3. Фрактальный анализ изображений нефтяных разливов

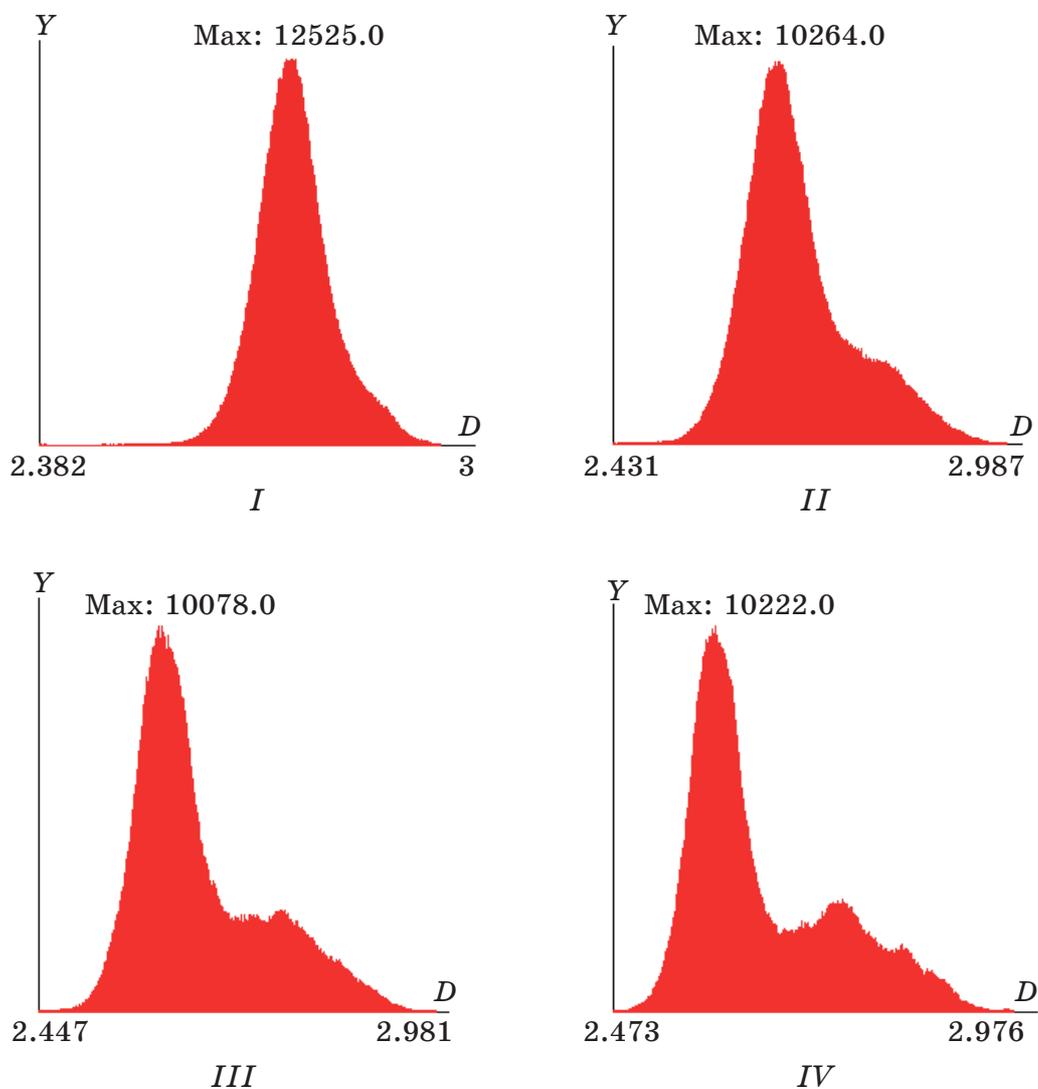
РЛИ, содержащее изображение нефтяных разливов, представлено на рис. 7. Фрагмент содержит береговую линию и морскую акваторию залива с присутствующими на морской поверхности протяженными нефтяными пятнами.

Поля фрактальных размерностей строились для скользящих окон размером  $7 \times 7$ ,  $9 \times 9$ ,  $11 \times 11$ ,  $13 \times 13$ ,  $15 \times 15$ ,  $17 \times 17$ ,  $19 \times 19$ ,  $21 \times 21$ ,  $23 \times 23$ ,  $25 \times 25$ ,  $27 \times 27$ ,  $29 \times 29$  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  $11 \times 11$  пикселей фрактальная размерность изменяется в диапазоне  $D = 2.382 \div 3$ , при размере окна  $17 \times 17$  диапазон изменения фрактальных размерностей становится  $D = 2.431 \div 2.987$ , при размере окна  $23 \times 23$   $D = 2.435 \div 2.981$ , а для размера окна  $29 \times 29$   $D = 2.507 \div 2.976$ . 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

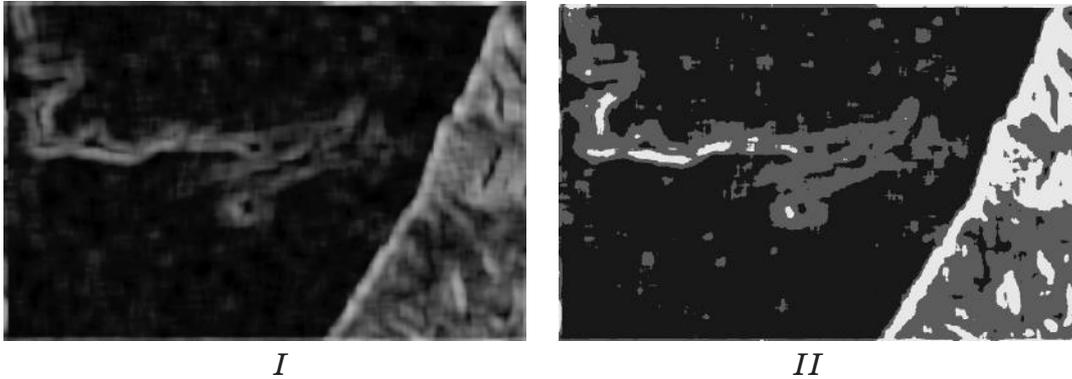
**Table 1.** Dependence of the maximum value of fractal dimension on the size of the processing window

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  $29$  на  $29$  пикселей. Видно, что изображение поля фрактальных размерностей (рис. 9(Г)) имеет более низкое пространственное разрешение, чем исходное РЛИ. Это объясняется использованием оконной обработки при проведение 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.

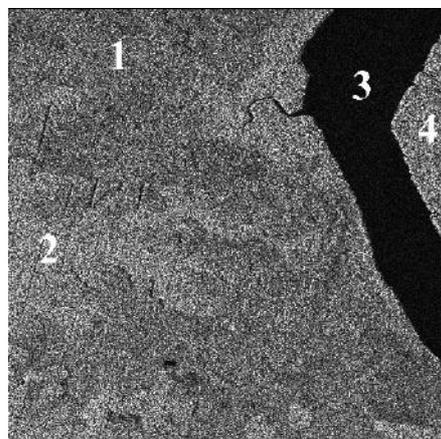


**Рис. 9.** Результат фрактальной обработки РЛИ нефтяных разливов на морской поверхности

**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  $7 \times 7$ ) 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  $\sigma_i^2$  – 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 удастся 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. *Научно-технические вестники ИВ РАН*. 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

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.2.002

УДК 528.852

## Анализ эффективности алгоритмов обнаружения изменений радиолокационных изображений поверхности в многопозиционной системе космического мониторинга

Л. Г. Доросинский, Н. С. Виноградова✉

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

✉ n.s.vinogradova@urfu.ru

### Аннотация

При решении многих задач космического мониторинга возникает задача определения наличия/отсутствия малых изменений на отражающей поверхности в очередном сеансе наблюдения. Примерами могут служить задачи прогноза ледовой обстановки, прогноза и обнаружения чрезвычайных ситуаций: пожары, наводнения, оползни, сели и т.п., обнаружение несанкционированных вырубок лесных участков, прогнозы урожайности сельскохозяйственных продуктов, анализ состояния морской поверхности и многие другие. Для надежного обнаружения названной ситуации рекомендуется использовать группу малых спутников, формирующих статистически независимые радиолокационные изображения (РЛИ). В работе исследован алгоритм классификации сигналов, отраженных от двух поверхностей с разными ЭПР по совокупности РЛИ аналитическим методом и методом статистического моделирования, а также одной и той же поверхности при наличии/отсутствии на ней изменений. Приведены конкретные рекомендации по выбору числа спутников при различных характеристиках отражающих поверхностей.

### Ключевые слова

радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли; эффективная поверхность рассеяния; статистическое моделирование; обнаружение изменений

### Для цитирования

Доросинский Л. Г., Виноградова Н. С. Анализ эффективности алгоритмов обнаружения изменений радиолокационных изображений поверхности в многопозиционной системе космического мониторинга. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(2):132–156. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.002

# The investigation of change detection algorithms for radar images using the multi-position space monitoring system

L. G. Dorosinskiy, N. S. Vinogradova✉

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

✉ n.s.vinogradova@urfu.ru

## Abstract

The problem of determination of presence / absence of small changes on the reflecting surface during the observation session often occurs solving different tasks of space monitoring. The examples of such tasks are the ice situation forecast, emergency forecast and detection (i.e., fires, floods, landslides, mudflows, etc.), detection of forest areas with unauthorized logging, forecasts of agricultural yields, analysis of the sea surface, and many others. The group of small satellites which form statistically independent radar images is recommend to be used for the reliable detection of the reviewed situations. We consider the algorithm of the reflected signals classification for two surfaces with different radar cross-section in conjunction with radar images using the analytical method and the method of statistical modeling in this paper. The algorithm is also reviewed for one and the same surface with presence/absence of its changes. We give specific recommendations on the number of satellites in accordance to different characteristics of reflecting surfaces.

## Keywords

radar remote sensing, scattering cross section, statistical simulation, change detection

## For citation

Dorosinskiy L. G., Vinogradova N. S. The investigation of change detection algorithms for radar images using the multi-position space monitoring system. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(2):132–156. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.002

## 1. Введение

Проблема обнаружения, оценки параметров и классификации сигналов от пространственно-распределенных целей, эффективная поверхность рассеяния (ЭПР) которых мало отличается от ЭПР подстилающей поверхности, была и остается одной из основных при разработке и создании современных радиолокационных систем мониторинга наземной и надводной обстановки современными и перспективными радиолокационными средствами [1; 2].

Задача обнаружения и классификации слабых сигналов на фоне мощных помех с помощью традиционных средств наблюдения зачастую не может быть решена с требуемой эффективностью. Дело

в том, что большие спутники позволяют получить радиолокационное изображение (РЛИ) одного и того же участка поверхности с разнесением по времени как минимум в несколько часов, а реально – в несколько суток. Такое временное различие не позволяет получить достаточное количество РЛИ для принятия статистически достоверных решений о наличии/отсутствии изменений радиолокационных изображений. Обнаружение названных отличий является основанием для принятия важных производственных, экологических, социальных и тому подобных решений в интересах самых разных отраслей народного хозяйства. Примерами могут служить задачи прогноза ледовой обстановки, прогноза и обнаружения чрезвычайных ситуаций: пожары, наводнения, оползни, сели и т.п., обнаружение несанкционированных вырубок лесных участков, прогнозы урожайности сельскохозяйственных продуктов, анализ состояния морской поверхности и др.

Рассмотрим ситуацию, когда необходимо принимать решение о принадлежности наблюдаемого РЛИ участка поверхности к одному из двух классов:

- РЛИ наблюдаемого участка земной/водной поверхности не отличается от РЛИ при прежних наблюдениях – изменений нет – гипотеза  $H_1$ ;

- РЛИ того же участка содержит изменения, вызванные новыми физическими условиями (появление новых объектов, вырубка леса, сезонные изменения, изменения ледовой обстановки, половодье, наводнение и многое другое) – гипотеза  $H_2$ .

Исходными данными для принятия решения являются РЛИ, полученные несколькими космическими аппаратами: малыми или нано-спутниками. Задача алгоритма принятия решения заключается в том, чтобы с минимальной вероятностью ошибки определить наличие или отсутствие названных изменений. Поскольку на практике чаще всего реализуются ситуации, при которых изменение местности представлено сравнительно небольшим количеством элементов наблюдаемого сигнала на фоне однородной величины ЭПР, необходимо установить границы применимости применения как аналитических выражений, так и предложенного метода статистического моделирования.

Поэтому основная цель данной работы – определить необходимое количество независимых «взглядов» на один и тот же участок поверхности (количество требуемых РЛИ) для надежного (с заданной вероятностью ошибки) определения выбора типа названной поверхности как аналитическими методами, так и методами статистического моделирования в зависимости от ряда параметров: размер поверхности, число независимых наблюдений (спутников) отношения мощностей отражаемых сигналов).

## 2. Описание алгоритм первичной обработки отраженного радиолокационного сигнала

Примеры типовых радиолокационных изображений (РЛИ) приведены на рис. 1. В простейшем случае необходимо осуществить оптимальное различение двух гипотез, а именно: наблюдается поверхность типа 1 или 2, менее тривиальный случай заключается в том, чтобы установить, имеется ли на поверхности типа 1 участок, имеющий удельную ЭПР, характерную для поверхности 2. При этом космические аппараты (КА), на которых размещены радиолокаторы, двигаются по близко расположенным траекториям и наблюдают один и тот же участок поверхности [1; 4; 5]. Далее считаем, что в группу малых спутников входит  $L$  идентичных КА.

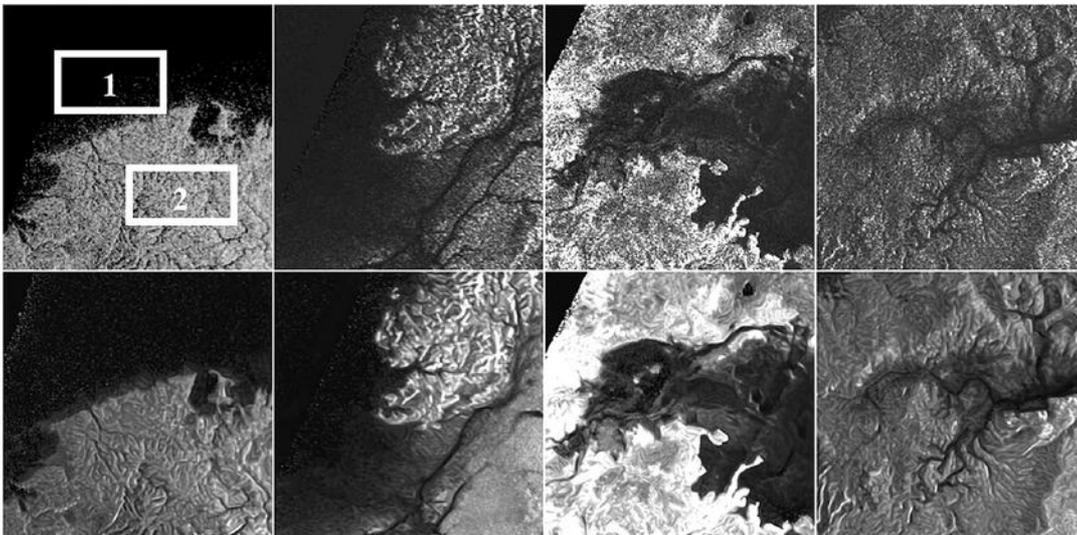


Рис. 1. Примеры типовых РЛИ.

Показаны области двух различных поверхностей

Fig. 1. Examples of typical radar images.

Two different surfaces are demonstrated

На первом этапе определен алгоритм классификации типа поверхности одним радиолокатором, которых двигается по своей траектории и облучает участки однородной поверхности так, что эти участки не пересекаются (рис. 2), что дает основание считать принимаемые сигналы  $y_i(t)$ ,  $i = 1 \dots N$  ( $N$  – количество отсчетов) в отдельных точках траектории статистически независимыми. Наблюдаемые сигналы  $y_i$  поступают на устройства первичной обработки (УПО), на выходе которых формируется вектор  $\bar{z}(z_1, z_2, \dots, z_n)$ , поступающий в блок классификации.

Сигнал, отраженный от  $i$ -го участка наблюдаемой поверхности, представляет собой узкополосный нормальный случайный процесс, амплитуда и фаза которого практически неизменны в течение времени его наблюдения. Принимаемый сигнал на-

блюдается на фоне белого гауссовского шума. Таким образом, наблюдаемые данные имеют вид:

$$y_i(t) = A_i \cos(\omega_0 t + \psi_i) + \eta_i(t), \quad (1)$$

где  $A_i$ ,  $\psi_i$  – амплитуда и фаза сигнала, отраженного от  $i$ -го участка наблюдаемой поверхности, имеющие соответственно релеевское и равновероятное распределения вероятностей [2],  $\eta_i(t)$  – белый гауссовский шум с нулевым математическим ожиданием  $\langle \eta_i(t) \rangle$  и корреляционной функцией  $\langle \eta_i(t_1) \eta_i(t_2) \rangle = N_0 \delta(t_1 - t_2)$ , где  $N_0$  – спектральная плотность шума [5; 6].

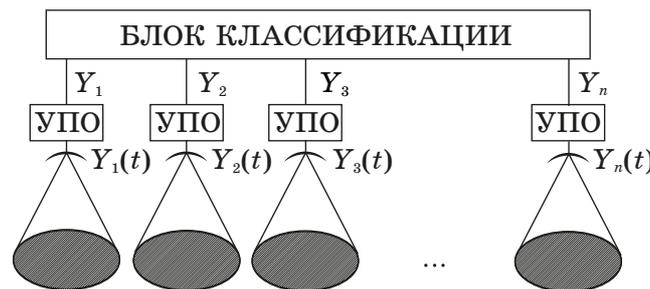


Рис. 2. Схема формирования сигналов  $y_i(t)$  при движении радиолокатора

Fig. 2. The scheme of signals generation for moving radar

Для определения оптимального алгоритма предварительной обработки использован функционал правдоподобия при условии, что РЛС занимает  $i$ -е положение, т.е. наблюдается сигнал  $y_i(t)$  [4] со следующей плотностью распределения:

$$\begin{aligned} \Delta(y) &= K \int_{A, \psi} W(y | A, \psi) W(A, \psi) dA d\psi = \\ &= K \int_{A, \psi} e^{-\frac{1}{N_0 T} \int [y(t) - A \cos(\omega_0 t + \psi)]^2} W(A, \psi) dA d\psi \end{aligned} \quad (2)$$

где  $W(A, \psi)$  – плотности распределения наблюдаемых сигналов. Для нахождения плотности распределения итогового РЛИ выполним следующие преобразования:

$$\begin{aligned} x_{ci} &= A_i \cos \psi_i, \\ x_{si} &= A_i \sin \psi_i, \\ y_{ci} &= \frac{1}{T} \int y(t) \cos \omega_0 t dt, \\ y_{si} &= \frac{1}{T} \int y(t) \sin \omega_0 t dt, \\ z_i &= y_{ci}^2 + y_{si}^2. \end{aligned} \quad (3)$$

При выполнении замены согласно выражениям (3), а также интегрирования, можно показать, что плотность распределения величины  $z_i$  примет следующий вид:

$$\Delta(z_i) = \frac{1}{\sigma_i^2} e^{-\frac{z_i}{\sigma_i^2}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_i$  – среднее квадратическое отклонение распределений исходных сигналов  $y_i(t)$ .

Таким образом, видно, что достаточная статистика  $z_i$  представляет собой экспоненциальную случайную величину с параметром  $\sigma_i^2$ , при этом на данном этапе величина шума считается либо несущественной, либо учитывается на этапе выхода УПО в значении общей мощности.

### 3. Синтез алгоритма классификации

Как следует из сказанного выше, после первичной обработки наблюдаемый вектор  $z_i$  представляет собой последовательность независимых отсчетов, каждый из которых имеет экспоненциальное распределение вероятностей с параметром  $\sigma_i^2$ . Дальнейшая задача заключается в построении оптимального алгоритма различения двух гипотез  $H_1$  и  $H_2$ , отличающихся векторами параметров  $\sigma_1^2 = \{\sigma_{11}^2, \sigma_{12}^2, \dots, \sigma_{1N}^2\}$  и  $\sigma_2^2 = \{\sigma_{21}^2, \sigma_{22}^2, \dots, \sigma_{2N}^2\}$ . В основу алгоритма положено отношение максимального правдоподобия:

$$\Delta(\bar{z}) = \frac{\prod_1^N \frac{1}{\sigma_{2i}^2} e^{-\frac{z_i}{\sigma_{2i}^2}}}{\prod_1^N \frac{1}{\sigma_{1i}^2} e^{-\frac{z_i}{\sigma_{1i}^2}}} \geq q. \quad (5)$$

После логарифмирования выражение (5) приобретает следующий вид:

$$\ln \Delta(\bar{z}) = \sum_1^N \left( \frac{1}{\sigma_{1i}^2} - \frac{1}{\sigma_{2i}^2} \right) z_i \geq \ln q + \sum_1^N \ln \frac{\sigma_{1i}^2}{\sigma_{2i}^2}. \quad (6)$$

На первом этапе рассмотрена задача классификации двух типов поверхностей при условии, что  $\sigma_{11}^2 = \sigma_{12}^2 = \dots = \sigma_{1N}^2 = \sigma_1^2$  и  $\sigma_{21}^2 = \sigma_{22}^2 = \dots = \sigma_{2N}^2 = \sigma_2^2$ . В этом случае достаточная статистика  $l$ , иначе говоря, статистика, содержащая информацию, эквивалентную отношению правдоподобия, вычисляется простым суммированием отсчетов на выходе устройства первичной обработки. Для принятия решения  $l$  сравнивается с порогом, вычисляемым по априорным значениям дисперсий сигналов при одной и другой гипотезах:

$$l = \ln \Delta(\bar{z}) = \sum_1^N z_i \geq \frac{N\sigma_1^2\sigma_2^2}{\sigma_2^2 - \sigma_1^2} \sum_1^N \ln \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} = h. \quad (7)$$

Гипотезы на этом этапе считаем равновероятными и значение порога  $h$  равным единице. Эффективность алгоритма классификации может быть определена аналитически при достаточно большом числе отсчетов  $N$  (аппроксимация достаточной статистики нормальным распределением вероятностей) и/или методом статистического моделирования. В первом случае плотность вероятности статистики  $l$  аппроксимируется нормальным распределением:

$$W(l) = \frac{1}{\delta_k \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(l-m_k)^2}{2\delta_k^2}}, \quad \begin{matrix} k=1 \text{ при } \sigma_1^2 \\ k=2 \text{ при } \sigma_2^2 \end{matrix}. \quad (8)$$

Соответственно, параметры распределения (8) выражаются как  $M\{1\} = m_k = N\sigma_k^2$  и  $D\{1\} = \delta_k^2 = N\sigma_k^4$ . Общая вероятность ошибки при распознавании двух гипотез может быть рассчитана как сумма вероятности принять гипотезу  $H_2$  при истинной  $H_1$  и, соответственно, вероятности принять гипотезу  $H_1$  при истинной  $H_2$  следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{ou} &= P\{H_2 | H_1\} + P\{H_1 | H_2\} = \\ &= 1 - \Phi\left(\frac{h - Nm_1}{\delta_1 \sqrt{N}}\right) + \Phi\left(\frac{h - Nm_2}{\delta_2 \sqrt{N}}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-\frac{x^2}{2}} dx$  – интеграл Лапласа.

Другим способом оценки качества распознавания может служить метод статистического моделирования. При большом числе отсчетов  $N$ , когда предположение о нормализации распределения достаточной статистики выполняется, расчет согласно формуле (9) даст достаточно точные результаты. В то же время при неравномерном распределении параметров выборочного распределения (наблюдении неоднородной поверхности) и сравнительно малом числе отсчетов метод статистического моделирования становится определяющим [7; 8].

На этом этапе синтеза построена модель наблюдаемых данных на входе блока классификации и алгоритма принятия решений. Наблюдаемые данные модели представляют собой случайные величины с параметром  $\sigma_1^2$  и  $\sigma_2^2$  – во втором. Для каждого из двух случаев выполнено построение гистограммы и определены вероятности ошибок для каждого из возможных расположений порога. Изменяя значение порога и вычисляя вероятности

сти ошибки может быть найдено оптимальное положение порога и соответствующее ему значение ошибки. Блок-схема модели показана на рис. 3, алгоритм выбора порога – на рис. 4.



Рис. 3. Блок-схема статистического моделирования

Fig. 3. The statistical simulation block diagram

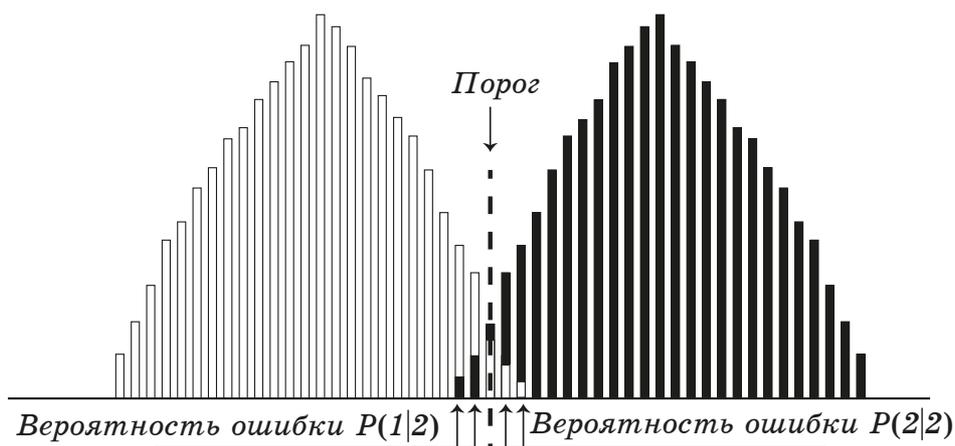
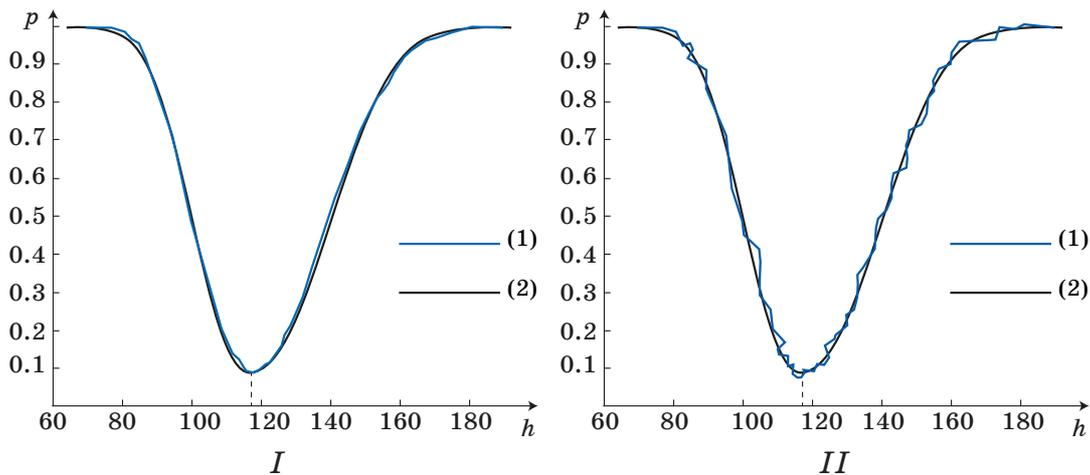


Рис. 4. Алгоритм выбора оптимальной величины порога при статистическом моделировании

Fig. 4. The algorithm for the optimal threshold value selection during statistical simulation

Приведем сравнительные результаты расчета по формуле (9) и статистического моделирования. На рис. 5 показаны зависимости вероятностей ошибок распознавания двух гипотез (на примере двух типов поверхностей), рассчитанных по формуле (9) и полученных с применением модели, от положения порога  $h$ . Количество отсчетов достаточных статистик  $N$  равно 100 (размеры модулируемых РЛИ  $10 \times 10$ ). Дисперсии входных данных в этом случае отличаются в два раза. Видно, что при малом количестве реализаций модельные расчеты дают грубую оценку как величины ошибки, так и положению порога, что связано с недостаточностью статистики в последнем случае.



**Рис. 5.** Зависимость вероятности ошибки от положения порога (линия 1 соответствует моделированию, линия 2 – расчету по формуле)

**Fig. 5.** The dependence of the error probability on the threshold position (line 1 corresponds to the simulation, line 2 is for the formula calculation)

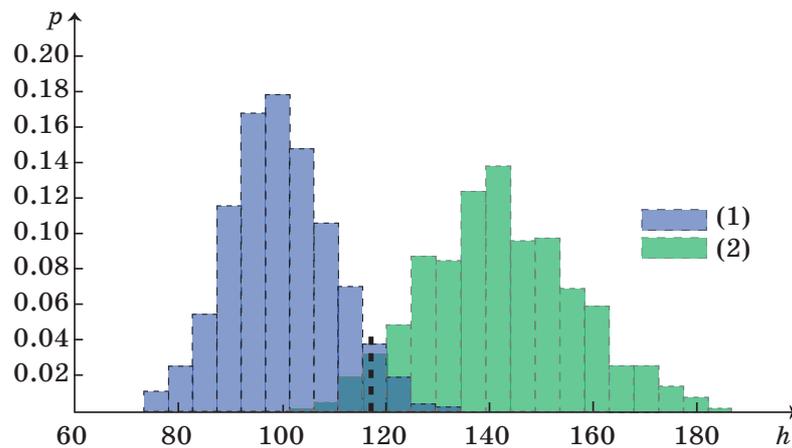
На рис. 6 приведены выборочные гистограммы достаточных статистик. Гистограмма (1) построена при дисперсии отсчета РЛИ, равной  $\sigma_1^2$ , гистограмма (2) –  $\sigma_2^2$ . Гистограммы построены на интервале от минимального значения данных с меньшей дисперсией до максимального значения набора данных с большей дисперсией, каждый подынтервал гистограммы получен делением общего интервала выборочных значений на число подынтервалов, определяемое в соответствии эмпирическим правилом Стерджеса<sup>1</sup> [9]:

$$k = 1 + [3,322 + \log B], \quad (10)$$

где  $B$  – количество реализаций модельных изображений.

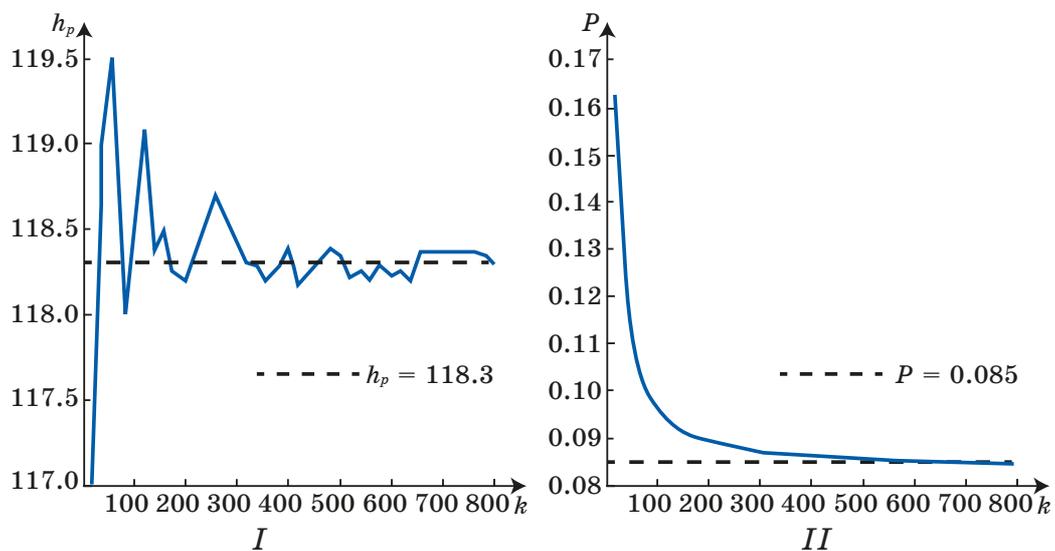
Согласно расчетам по формуле (9), положение порога  $h$  при используемых входных данных равно 118,3, вероятность ошибки  $p$  при этом составляет 0,085. Аналогичные расчеты, выполненные с применением моделирования, дают значения  $h = 119,3$  и  $p = 0,096$  при числе реализаций, равном 100 тыс. и значении порога  $h = 120,3$  и  $p = 0,221$  для  $B = 1000$ . Очевидно, что необходимо установить границы применимости статистической модели, проанализировав значения вероятностей ошибок и положения порога при различных значениях входных параметров. Результаты представлены на рис. 7 и 8. Дисперсии положены отличающимися в два раза, количество отсчетов равно  $N = 100$ .

<sup>1</sup> ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стендартинформ; 2013. 28 с.



**Рис. 6.** Гистограммы распределения достаточных статистик  $l$  (число реализаций – 1000, количество отсчетов – 100). гистограмма построена при дисперсии отсчета РЛИ, равной  $\sigma_1^2$ , правая –  $\sigma_2^2$ , вертикальной пунктирной линией показано значение порога, рассчитанного по формуле (9)

**Fig. 6.** Histograms of the sufficient statistics  $l$  distribution (generation number is 1000, the number of samples is 100). The left histogram is simulated for the image variance equal to  $\sigma_1^2$ , the right is for  $\sigma_2^2$ , the vertical dashed line shows the value of the threshold calculated by the formula (9)

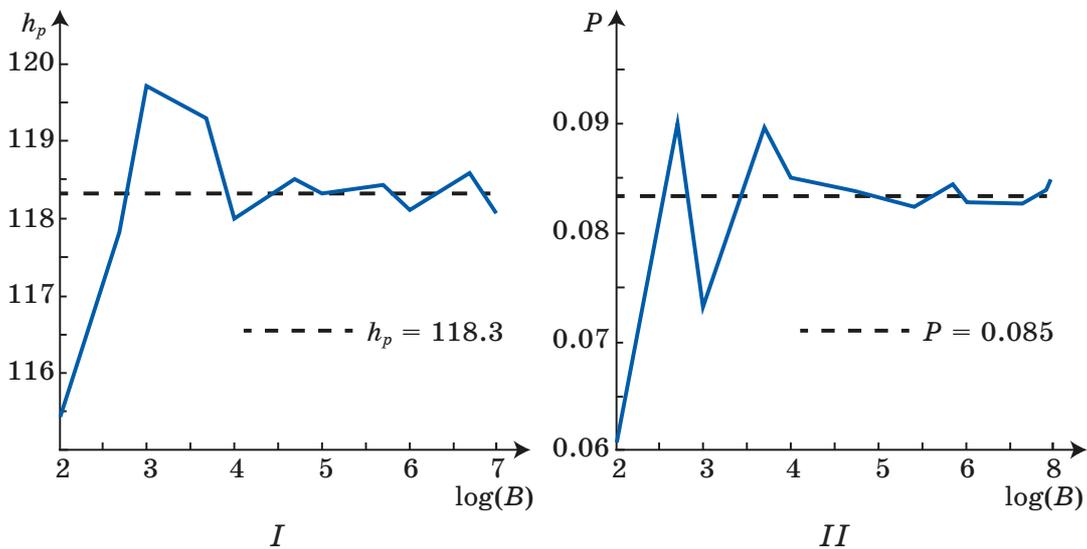


**Рис. 7.** Зависимость положения порога вероятности ( $I$ ) и ошибки ( $II$ ), рассчитанных с применением моделирования от количества разбиений интервала  $k$ . Пунктирной линией показан расчет по формуле

**Fig. 7.** The dependence of the probability threshold position ( $I$ ) and the error ( $II$ ) calculated using simulation on the number of histogram split intervals  $k$ . The dashed line shows the calculation by the formula

Из графиков, представленных на рис. 7, следует, что при увеличении количества интервалов построения гистограммы вероятность ошибки и положение порогового значения стре-

мится к расчетному значению. Это объясняется увеличением точности определения положения порога, в оптимальном случае погрешность определения порога не может быть меньше, чем минимальный размер при дискретизации оси значений при построении гистограммы. Эти соображения объясняют флуктуационный характер графика «а» при малых значениях  $k$ , проявляющееся в сильной случайности моделируемых величин. Этот эффект связан с недостаточным уровнем дискретизации входных данных, а также их изначальной случайной природой. Таким образом, правило Стерджеса, несмотря на широкую применимость при обработке многократных результатов измерений, в данном случае является не самым удачным, поскольку в этом случае шаг гистограммы содержит несколько значений случайной величины, что приводит к снижению точности определения порогового значения и соответствующего ему значения вероятности ошибки. При использовании числа интервалов более 200 вероятность, полученная с помощью моделирования, и расчетная вероятность отличаются не более, чем на 0,005, что обеспечивает достаточную точность. Дальнейший рост количества интервалов приводит к еще более высокой точности, однако существенно увеличивает время моделирования. Поэтому разумным компромиссом является выбор количества интервалов, равного  $2N$ , где  $N$  – количество отсчетов.

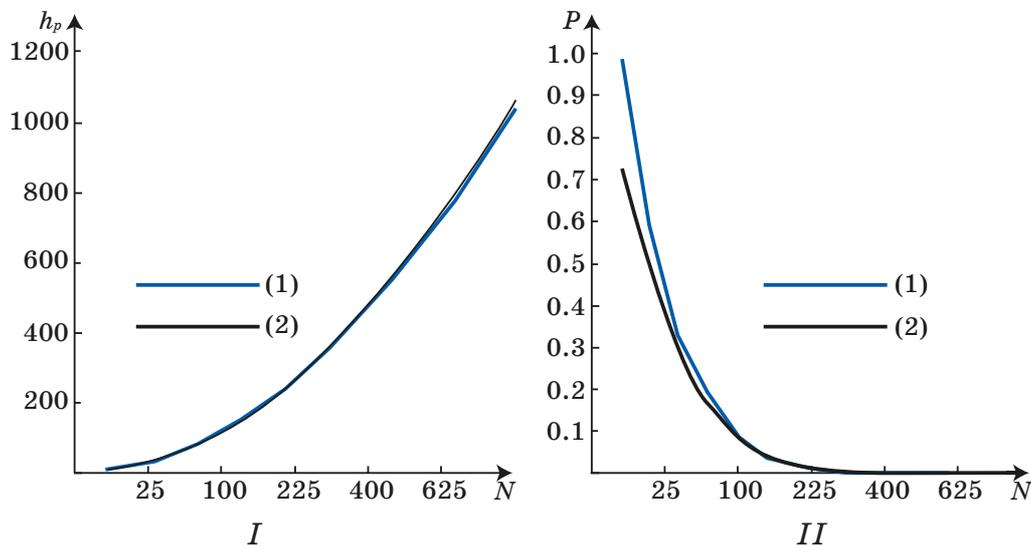


**Рис. 8.** Зависимость вероятности ошибки (*I*) и положения порога (*II*), рассчитанных с применением моделирования, от количества реализаций  $V$ . Пунктирной линией показан расчет по формуле

**Fig. 8.** The dependence of the error probability (*I*) and the threshold position (*II*) on the generation number  $V$  calculated using simulation. The dotted line shows the calculation by the formula

Таким образом, оптимальное количество шагов гистограммы при применении метода, основанного на моделировании ошибки классификации и положения порога, составляет удвоенное количество отсчетов, а число реализаций составляет  $B = 50$  тыс. Дальнейшее увеличение этих показателей приводит к незначительному улучшению точности.

Далее исследована точность результатов моделирования ошибки классификации и положения порога в зависимости от количества отсчетов  $N$ , изменяющегося в диапазоне от 4 до 900. Число реализаций выбрано равным 50 тыс., количество шагов гистограммы равно удвоенному количеству отсчетов. Результаты вычислений в сравнении с расчетами, выполненными согласно формуле (9), приведены на рис. 9.



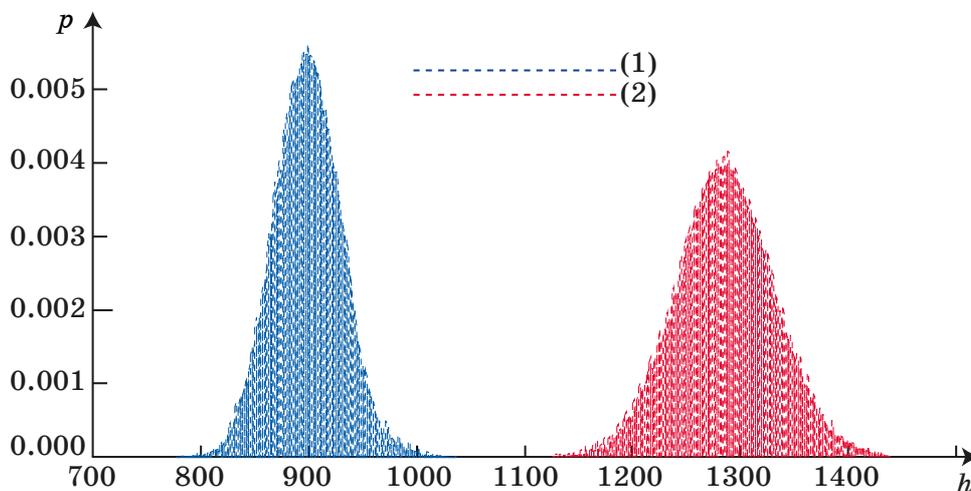
**Рис. 9.** Зависимость положения порога ( $I$ ) и вероятности ошибки ( $II$ ) от количества отсчетов  $N$ . Линия (1) – моделирование, линия (2) – расчет

**Fig. 9.** The dependence of the threshold position ( $I$ ) and the error probability ( $II$ ) on the number of samples  $N$ . Line (1) is for the simulation, line (2) is for calculation

Из графиков, приведенных на рис. 9, следует, что имеется расхождение величины порога, определенной с помощью моделирования и положения порога, по отношению к расчетной величине при больших количествах отсчетов. Расхождение превышает величину шага гистограммы при количестве отсчетов более 600 и при дальнейшем росте  $N$  продолжает нарастать. Это объясняется неоднозначностью алгоритма определения положения порога при значительном количестве отсчетов: в этом случае центры распределений оказываются расположенными на значительном расстоянии друг от друга, и соответствующий минимум суммарной гистограммы растягивается на некото-

рый конечный интервал. Подобная ситуация приведена на гистограмме, показанной на рис. 10. При количестве отсчетов, равном 2500, значение при моделировании оказывается ниже расчетного на величину, равную в среднем пятнадцати шагам гистограммы, тогда как общий диапазон значений приходится на интервал порядка 1500. Однако следует отметить, что подобные значения отсчетов соответствуют нулевой вероятности ошибки, и два распределения разрешаются однозначно для широкого диапазона значений, соответственно, данное расхождение не является следствием моделирования ошибки классификации и положения порога.

На графике, приведенном на рис. 9(II) видно, что имеется расхождение в расчете вероятности ошибки между формулой (9) и моделированием ошибки классификации и положения порога, напротив, для малых значений количества отсчетов. Это объясняется недостаточностью статистики при формировании вектора суммы  $z_i$ , что приводит к отклонению итогового распределения от нормального закона, соответственно, формула (9) является неприемлемой для такого случая. При этом теоретическое значение ошибки расходится с полученным при моделировании менее, чем на 5% при количестве отсчетов более 64.

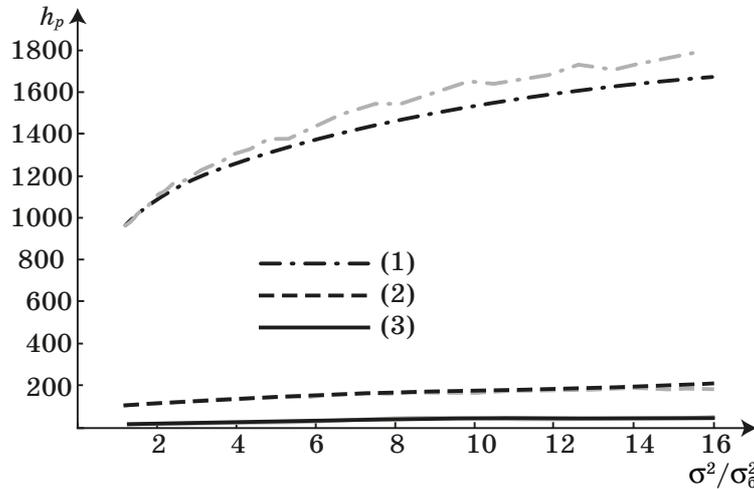


**Рис. 10.** Гистограммы распределения модельных радиолокационных изображений при количестве отсчетов  $N=900$ . Синяя линия соответствует дисперсии  $\sigma_1^2$ , красная –  $\sigma_2^2$ . Количество реализаций – 5000, количество подынтервалов гистограммы – 1800

**Fig. 10.** The histograms of the simulated radar images distribution for the number of samples  $N = 900$ . The blue line corresponds to the variance  $\sigma_1^2$  and the red line is for the variance  $\sigma_2^2$ . The generation number is 5000, the number of histogram split intervals is 1800

Далее нами выполнен анализ влияния отношения дисперсий на результаты моделирования и расчетов ошибки классификации и положения порога. Величина дисперсии изменялась в ин-

тервале от 1,5 до 16. Число реализаций – 50 тыс., количество отсчетов – 25, 100 и 400, количество шагов гистограммы положено равным удвоенному количеству отсчетов. Результаты приведены графиках, представленных на рис. 11 и 12.

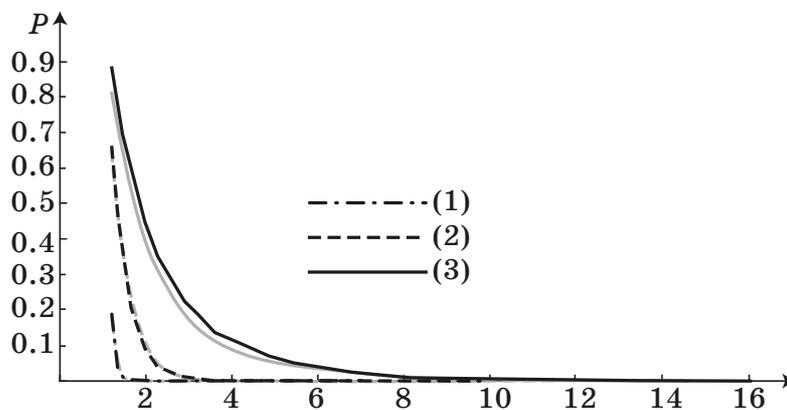


**Рис. 11.** Зависимость положения порога  $h$  от соотношения дисперсий. Линия (1) соответствует количеству отсчетов  $N = 900$ , линия (2) –  $N = 100$ , линия (3) –  $N = 25$ .

Пунктиром показаны расчетные зависимости

**Fig. 11.** The dependence of the threshold position on the variance ratio. Line (1):  $N = 900$ , line (2):  $N = 100$ , line (3):  $N = 25$ .

The dashed lines show the calculated dependencies



**Рис. 12.** Зависимость вероятности ошибки  $p$  от соотношения дисперсий. Линия (1) соответствует количеству отсчетов  $N = 900$ , линия (2) –  $N = 100$ , линия (3) –  $N = 25$ .

Серым цветом показаны расчетные зависимости

**Fig. 12.** The dependence of the error probability on the variance ratio. Line (1):  $N = 900$ , line (2):  $N = 100$ , line (3):  $T = 25$ .

The calculated dependences are shown by gray color

На графиках, приведенных на рис. 11, следует, что при больших отношениях дисперсий значение порога, полученное с применением метода статистического моделирования, дает меньшее значение по сравнению с расчетным. При этом чем больше ко-

личество отсчетов, тем при меньшем отношении дисперсий эффект становится более заметным. Это объясняется той же причиной, что и смещение порога при больших значениях отсчетов, а именно: при больших  $N$  средние значения распределений находятся на значительном удалении друг от друга, при этом на оси значений достаточной статистики образуется интервал, соответствующий нулевой вероятности ошибки (см. гистограммы на рис. 10). В этом случае невозможно однозначно определить положение порога. Следует отметить, что при соотношении дисперсий  $1/16$  расхождение расчета по формуле с моделированием составляет в среднем 6, тогда как общий диапазон значений приходится на интервал порядка 500, при количестве отсчетов 900 – расхождения составляет около 250 при общем диапазоне около 3 300. Необходимо отметить, что данная ситуация соответствует случаю нулевых выборочных вероятностей ошибок (см. гистограммы на рис. 10), то выборки являются однозначно разделимыми, поэтому на корректность работы алгоритма указанный эффект не оказывает.

На графиках, приведенных на рис. 12, следует, что с ростом отношения дисперсий величина ошибки уменьшается, что связано с естественным смещением средних значений выборок, построенных на основании метода статистического моделирования. При больших значениях количества отсчетов результаты расчетов и результаты моделирования находятся в достаточном соответствии. Для малых  $N$  имеется расхождение, обусловленное отклонением модельных данных от нормальных распределений. В этом случае формула (9) оказывается неприемлемой.

Таким образом, применение методов, основанных на моделировании ошибки классификации и порогового значения, полностью согласуется с расчетом по формуле (9) при значительном количестве отсчетов (более 64), рациональное количество реализаций составляет  $B = 5$  тыс., количество разбиений на интервале гистограммы должно быть равно удвоенной величине количества отсчетов. При моделировании, основанном на количестве отсчетов менее, чем 64, нарушается предположение о нормальности распределений достаточных статистик, что приводит к значительным ошибкам классификации. При большом отношении дисперсий (более 6 при количестве отсчетов, равном 100), а также при большом значении количества отсчетов наблюдается несоответствие модельных и расчетных значений, что обусловлено существенным расстоянием между средними значениями выборочных распределений. Однако эта ситуация соответствует нулевой вероятности ошибки разделения двух выборок, и как следствие, хорошей итоговой разделимости гипотез.

#### 4. Анализ эффективности классификации при комплексировании наблюдений разными спутниками

До сих пор все выводы касались принятия решения о типе поверхности одним КА. Для повышения эффективности классификации изменений на РЛИ в системе, состоящей из  $L$  малых спутников, следует использовать комплексирование данных от разных средств наблюдения. Рассмотрим зависимость вероятности правильного распознавания (ВПР) всей системы в целом ( $P_E$ ) от ВПР одного средства наблюдения ( $P$ ) при разном количестве источников информации  $L$ .

В простейшем случае вероятности  $P_E$  и  $P$  связаны очевидным соотношением:

$$P_E = 1 - P^L. \quad (11)$$

На рис. 13 приведена зависимость для алгоритма простого голосования. Из графика следует, что для получения итоговой ВПР выше, чем 0,5, достаточно использовать пять КА с ВПР 0,2 либо семь спутников с ВПР 0,1. При ВПР 0,3 можно ограничиться тремя КА.

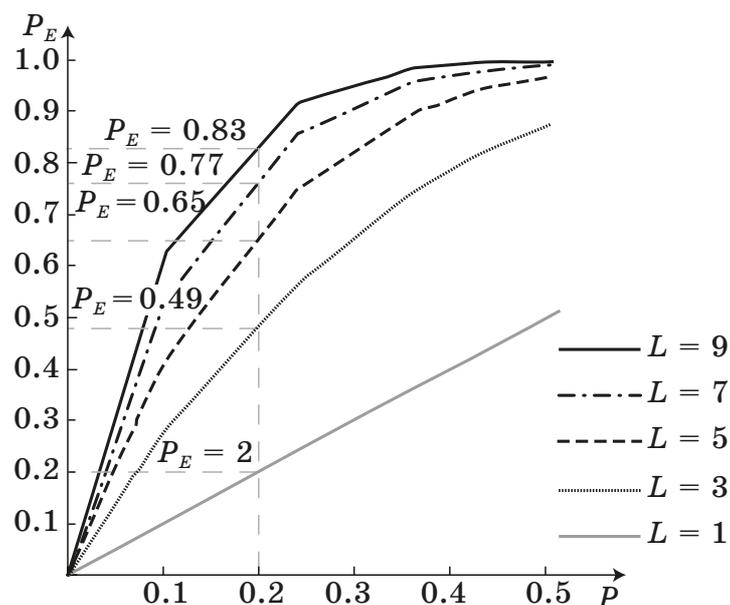


Рис. 13. Вероятности правильного распознавания при комплексировании

Fig. 13. The probabilities of the correct recognition using an aggregation

Результаты, представленные на рис. 13, использованы для оценки достаточного количества спутников при распознавании протяженных целей с ЭПР, соответствующими справочным данным (табл. 1) [4]. В табл. 2 приведены отношения дисперсий сигналов на выходе устройства первичной обработки, отраженных от какого-либо типа конкретной поверхности по от-

ношению к минимальной дисперсии, соответствующей сигналу от бетона.

**Таблица 1.** Справочные значения ЭПР (дБ) для некоторых наблюдаемых объектов

**Table 1.** The reference values for scattering cross section (dB) for some observing objects

Наблюдаемый объект	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$
	Горизонтальная поляризация			Вертикальная поляризация		
Бетон	-53	-38	-28	-45	-31	-28
Асфальт	-47	-29	-24	-37	-23	-22
Пахотные земли	-29	-20	-15	-25	-18	-16
Городская застройка	-20	-12	-8	-15	-11	-7

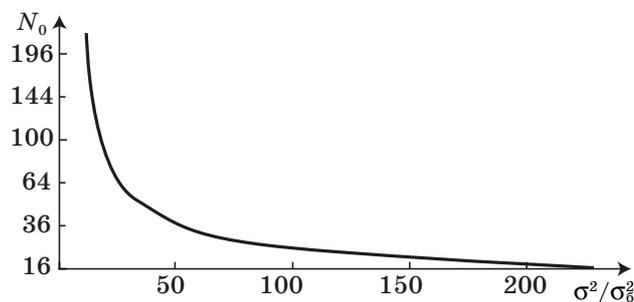
*Примечание:*  $\alpha$  – угол между надиром и направлением на визируемый участок поверхности

**Таблица 2.** Дисперсии объектов наблюдения, выраженные относительно величины ЭПР бетона

**Table 2.** Some observing object variances given by the value of concrete scattering cross section

Наблюдаемый объект	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$
	Горизонтальная поляризация			Вертикальная поляризация		
Асфальт	4.0	7.9	2.5	6.3	6.3	4.0
Пахотные земли	250	63	20	100	20	16
Городская застройка	2000	400	100	1000	100	130

Рассмотрим влияние числа отсчетов сигнала  $N$  от поверхности на эффективность классификации. График зависимости пороговых значений количества отсчетов  $N_0$  от величины дисперсии, по достижении которых ошибка при моделировании имеет нулевое значение, приведен на рис. 14.

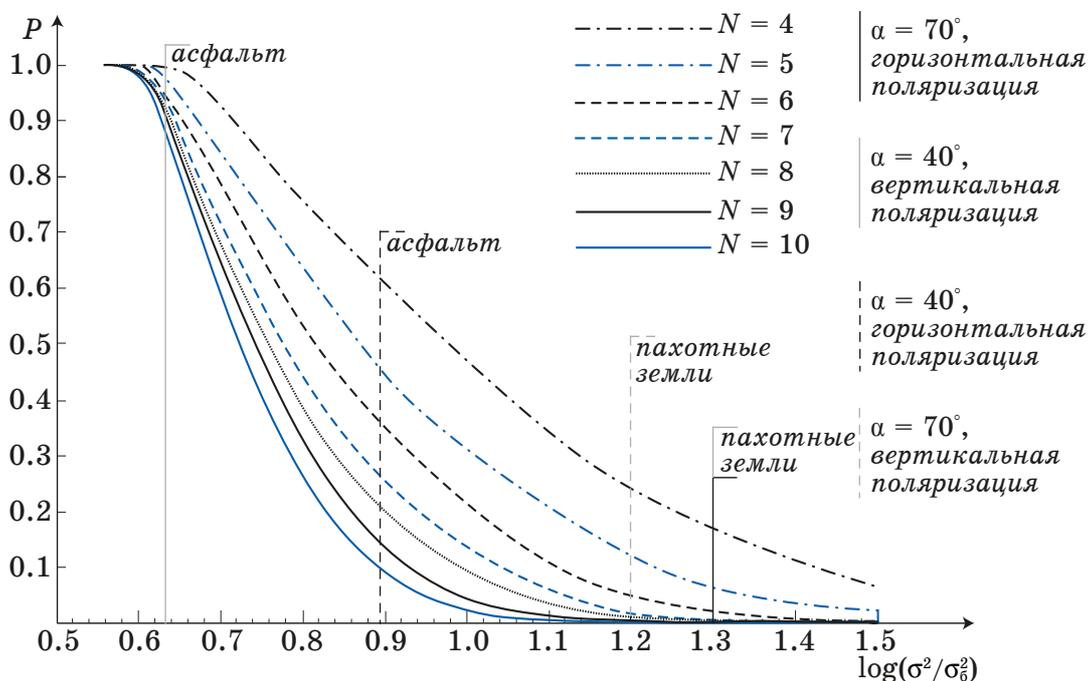


**Рис. 14.** График зависимости пороговой величины количества отсчетов  $N_0$  от отношения дисперсий (количество реализаций равно 50 тыс.), количество интервалов разбиения гистограммы равно удвоенному количеству отсчетов)

**Fig. 14.** The dependence of number of samples  $N_0$  threshold value on the variances ratio (the generation number is 50000, the number of histogram split intervals is the doubled number of samples)

Таким образом, с ростом отношения дисперсий количество отсчетов, при котором ошибка определения принимает минимальное значение, уменьшается. Поэтому дальнейшие исследования выполнены для случая, когда количество отсчетов меньше величины  $N_0$ , поскольку в противном случае проблема классификации изменений на РЛИ не представляет интереса.

Рассмотрим зависимость вероятности ошибки от соотношения дисперсий. Из графика, приведенного на рис. 15, следует, что с ростом угла между направлением надира и направлением на участок визируемой поверхности увеличивается вероятность ошибки, что связано с уменьшением отношения дисперсий между соседних классов объектов.



**Рис. 15.** Зависимость вероятности ошибки  $p$  от отношения дисперсий. Пунктирными линиями показаны некоторые типовые значения соотношения дисперсий наблюдаемых объектов на фоне асфальта из данных, приведенных в табл. 2

**Fig. 15.** The dependence of the error probability on the variances ratio. Dashed lines show some typical values of the variances ratio for the observed objects against the asphalt background (table 2)

Данные табл. 3 показывают, что даже в случае малого отношения дисперсий элементов РЛИ для гарантированной классификации изменений на РЛИ можно ограничиться тремя или четырьмя спутниками, точное их количество определяется требованиями в конкретной задаче. В случае, когда относительная дисперсия превышает 10, для получения ВПР 99 % достаточно использовать два спутника, при относительной дисперсии, равной 20, достаточно данных одного спутника.

В табл. 3 приведено минимальное количество спутников, необходимое для распознавания асфальта и пахотных земель с вероятностью от 80 до 100 %. Количество отсчетов равно 16.

**Таблица 3.** Минимальное количество спутников, необходимое для корректного распознавания асфальта и пахотных земель на фоне бетона при заданной вероятности  $P$

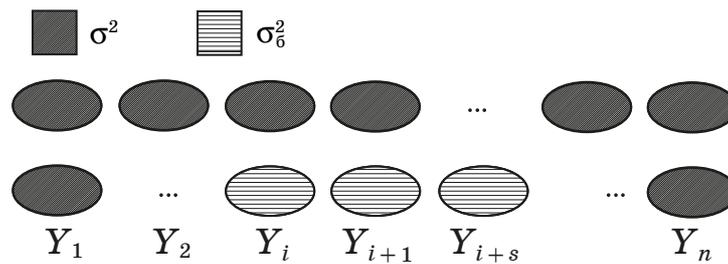
**Table 3.** The minimum number of satellites required for the correct change detection of asphalt and arable lands in comparison with the concrete background

$P, \%$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$
	<i>Горизонтальная поляризация</i>			<i>Вертикальная поляризация</i>		
<b>Асфальт</b>						
90	2	1	3	2	2	2
95	3	2	4	3	3	3
99	4	2	6	3	3	4
99,9	5	3	9	4	4	5
100	10	6	18	7	7	10
<b>Пахотные земли</b>						
90	1	1	1	1	1	1
95	1	1	1	1	1	1
99	1	1	1	1	1	2
99,9	1	1	2	1	2	2
100	1	2	4	2	4	4

## 5. Классификация неоднородных РЛИ

Далее рассмотрен случай классификации двух РЛИ, одно из которых соответствует однородной поверхности (ЭПР вдоль наблюдаемого участка поверхности остается неизменной), а второе содержит внутри наблюдаемого участка элемент поверхности с отличающейся величиной ЭПР. Для этой задачи сформированы две последовательности отсчетов, в одной из которых дисперсия не меняется, во второй – содержит изменения (рис. 16). Задача состоит в том, чтобы найти необходимые условия моделирования, при которых данные со скачком дисперсии будут различимы на фоне данных с однородной (априорно известной) дисперсией. Таким образом, в настоящей постановке расчетное значение вероятности ошибки классификации должно быть поделено на 2, поскольку при формировании модельных наблюдений (см. рис. 4) второй набор входных данных считается априорно известным.

Рассмотрим влияние размера  $ds$  области нетипичной ЭПР на величину ошибки классификации. Соотношение дисперсий положено равным 20, количество отсчетов  $N$  менялось в интервале от 4 до 576, при этом максимальное значение  $ds$  не превышало корня из количества отсчетов. Результаты расчетов приведены в табл. 4.



**Рис. 16.** Схема входных данных при моделировании скачка ЭПР. Дисперсия  $\sigma^2$  соответствует типичной ЭПР поверхности, величина  $\sigma_6^2$  – нетипичной

**Fig. 16.** The input data scheme for the simulation of the radar cross-section step

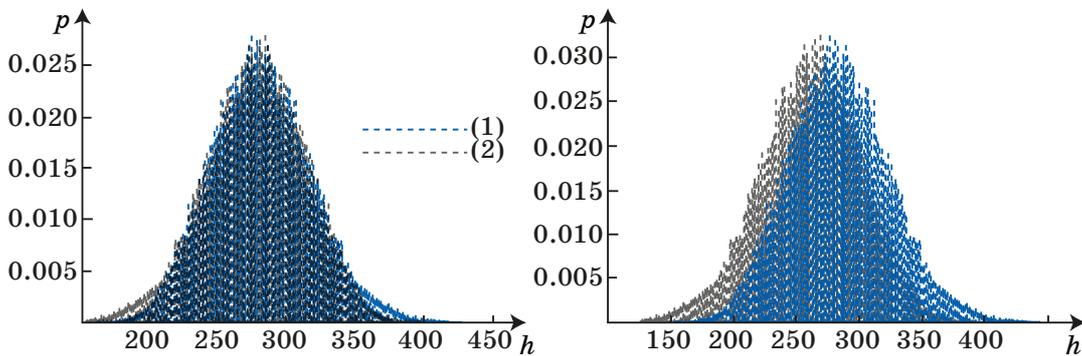
**Таблица 4.** Влияние размера области нетипичной дисперсии на величину ошибки классификации (количество реализаций равно  $B = 1$  млн, количество интервалов разбиения гистограммы равно удвоенному количеству отсчетов)

**Table 4.** The influence of the abnormal variance fragment size on the classification error value. (the generation number is 1 000 000, the number of a histogram split intervals is the doubled number of samples)

$N$	$ds$											
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
4	0.50	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
16	0.50	0.49	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
64	0.50	0.43	0.38	0.37	–	–	–	–	–	–	–	–
144	0.50	0.43	0.41	0.38	0.33	0.29	–	–	–	–	–	–
256	0.50	0.47	0.45	0.45	0.40	0.38	0.36	0.33	–	–	–	–
400	0.50	0.46	0.43	0.39	0.38	0.36	0.35	0.31	0.31	0.27	–	–
576	0.50	0.43	0.48	0.46	0.44	0.43	0.43	0.40	0.38	0.36	0.36	0.31

В том случае, когда участок нетипичной ЭПР состоит из одного отсчета достаточной статистики (одного элемента разрешения), вероятность ошибки классификации нетипичной ЭПР близка к максимуму, т.е. к 50%. В случае, если размер нетипичной области ЭПР мал (менее 10% от числа отсчетов), классификация возможна только при использовании не менее 100 отсчетов. Установлено, что с ростом количества отсчетов  $N$  при фиксированном отношении  $ds/\sqrt{N}$  при количестве отсчетов свыше 400 точность практически не изменяется, т.е. определяющим фактором при данных условиях является не количество отсчетов, а значение величины  $ds/\sqrt{N}$ , т.е. относительный размер нетипичной области ЭПР. В области малых значений  $N$  наблюдается незначительное увеличение вероятности ошибки (порядка 0,02), что связано с общим характером поведения данной зависимости (см. рис. 17(II)). В целом рост вероятности ошибки

классификации связан с уменьшением размера области нетипичного поведения ЭПР: чем эта область больше, тем больше расхождение гистограмм соответствующих распределений, тем выше точность. Примеры гистограмм соответствующей ситуации приведены на рис. 18. Также отмечено, что в случае близких соотношений гистограмм распределения входных данных, что имеет место быть при малом размере  $ds$ , оптимальное количество реализаций должно составлять на два порядка большую величину, т.е. не менее 1 млн, поскольку в противном случае возрастает вероятность ошибок классификации изменений на РЛИ.

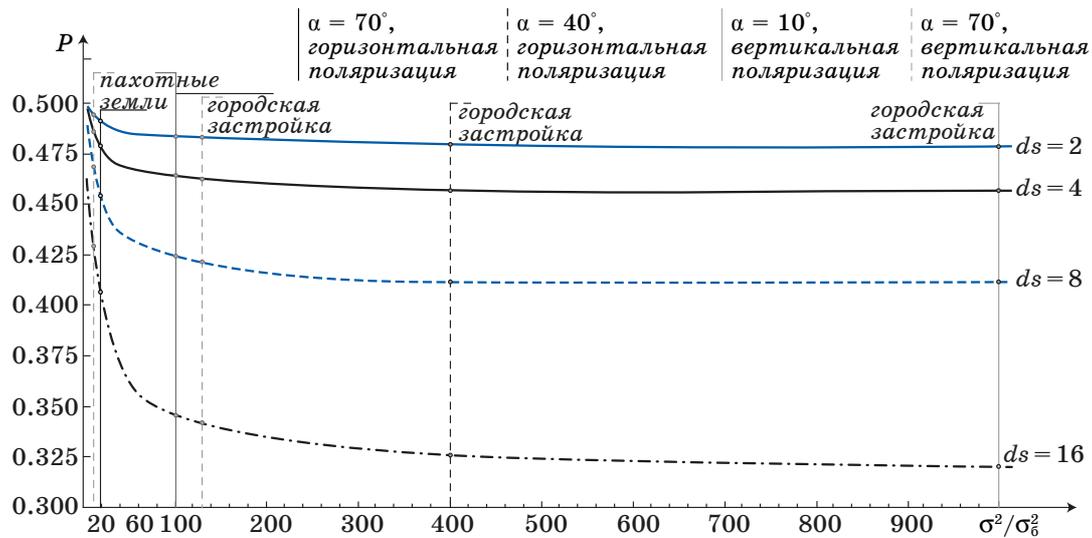


**Рис. 17.** Гистограммы распределения достаточных статистик моделируемых РЛИ при размере нетипичной области,  $N = 2$  отсчетам (а) и  $N = 8$  отсчета (б). Общее количество отсчетов  $N = 64$ , количество реализаций равно  $B = 1$  млн, количество интервалов разбиения гистограммы равно удвоенному количеству отсчетов. Линия (1) соответствует входным данным с однородной дисперсией, линия (2) – данным с нетипичной областью

**Fig. 17.** The histograms of the sufficient statistics distribution of the simulated radar image with the size of the anomalous area of 2 samples (a) and 8 samples (b). The total number of samples  $N = 64$ , the generation number is 1 000 000, the number of histogram split intervals is the doubled number of samples. The red line corresponds to the input data with a stable variance, the green line corresponds to the data with an anomalous region

Рассмотрим влияние отличий в величине ЭПР на вероятность ошибки классификации. Количество отсчетов – 64, моделирование выполнено для размеров области усреднения 8, 4 и 2, количество реализаций составляет  $10^6$ , количество интервалов разбиения гистограммы равно удвоенному количеству отсчетов  $N$ . Результаты представлены на рис. 18. Ошибки классификации изменений на РЛИ, как и следовало ожидать, значительно выше, чем при однородных поверхностях.

Таким образом, даже для задач распознавания городской застройки на фоне бетона необходимо использовать данные нескольких наблюдений (спутников). Результаты расчетов для типовых соотношений дисперсий приведены в табл. 5.



**Рис. 18.** Зависимость вероятности ошибки  $p$  от отношения дисперсий. Пунктирными линиями показаны некоторые типовые значения соотношения дисперсий наблюдаемых объектов на фоне асфальта из табл. 2

**Fig. 18.** The dependence of the error probability on the variances ratio. Dashed lines show some typical values of the variances ratio for the observed objects against the asphalt background (table 2)

**Таблица 5.** Вероятность правильной классификации при комплексировании данных нескольких спутников (наблюдение асфальта, пахотных земель и городской застройки на фоне бетона), %

**Table 5.** The probability of the correct change detection using the aggregation of several satellites data (the observation of asphalt, arable lands and urban development against the background of concrete)

$L$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$	$\alpha = 10^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 70^\circ$
	Горизонтальная поляризация			Вертикальная поляризация		
<b>Асфальт</b>						
1	50.01	50.50	50.00	50.23	50.23	50.01
3	87.50	87.87	87.50	87.67	87.67	87.50
5	96.88	97.03	96.88	96.95	96.95	96.88
7	99.22	99.27	99.22	99.24	99.24	99.22
9	99.80	99.82	99.80	99.81	99.81	99.80
<b>Пахотные земли</b>						
1	51.88	51.58	51.13	51.76	51.13	50.98
3	88.86	88.65	88.33	88.77	88.33	88.22
5	97.42	97.34	97.21	97.39	97.21	97.17
7	99.40	99.38	99.33	99.39	99.33	99.32
9	99.86	99.85	99.84	99.86	99.84	99.84
<b>Городская застройка</b>						
1	52.11	52.02	51.76	52.04	51.76	51.83
3	89.02	88.95	88.77	88.97	88.77	88.82
5	97.48	97.46	97.39	97.46	97.39	97.41
7	99.42	99.41	99.39	99.42	99.39	99.40
9	99.87	99.87	99.86	99.87	99.86	99.86

Данные табл. 4 показывают, что при размере области нетипичной ЭПР в два отсчета при использовании одного КА вероятность правильного распознавания едва ли превышает 50%, однако при использовании даже двух КА вероятность правильного распознавания превышает 80% даже для объектов с небольшим соотношением дисперсией (87,5 при отношении дисперсий в 2,5). При использовании семи и более КА вероятность правильного распознавания превосходит 99 % для объектов с любым соотношением дисперсий.

## 6. Заключение

1. Проведен сравнительный анализ определения вероятностей ошибок классификации двух типов однородных поверхностей, соответствующим различным значениям ЭПР, аналитическим методом и методом статистического моделирования. В частности, показано, что расчетные данные имеют высокую корреляцию с модельными при использовании 100 и выше отсчетов, в противном случае расчеты по традиционным формульным приближениям дают некорректные результаты. Установлено, что оптимальное количество реализации при использовании модельных данных составляет  $B = 50$  тыс. в случае вероятности ошибки не выше 0,5, для более высоких значений ошибок рекомендуется увеличивать количество реализаций во избежание ложных распознаваний. Правило Стерджиса показало неудовлетворительные результаты при построении гистограмм модельных значений. Поэтому в решении настоящей задачи рекомендуется использовать количество разбиений, равное удвоенному количеству отсчетов.

2. Показано, что при комплексировании результатов, принятых решающими устройствами нескольких спутников, и отношении ЭПР различаемых поверхностей, превышающей величину, равную 10, для получения вероятности правильного распознавания в 99,9% достаточно ограничиться двумя независимыми наблюдениями даже при использовании 16 отсчетов. При меньших отношениях ЭПР наблюдаемых объектов вероятность правильного распознавания может быть увеличена как за счет увеличения числа КА, так и за счет увеличения количества отсчетов.

3. При наличии на поверхности участка с нетипичной ЭПР, вероятность правильной классификации (обнаружения названной аномалии) существенно уменьшается. Тем не менее вероятность в 99% может быть достигнута даже при малом размере аномалии (2 отсчета) и отношении дисперсий 6,3, если комплексно использовать РЛИ, полученные с семи спутников.

## Список литературы

1. Мясников Ф. С., Иванов О. Ю. Обнаружение изменений на земной поверхности по данным дистанционного зондирования. В: Тягунов А. Г. (ред.). *Компьютерный анализ изображений: Интеллектуальные решения в промышленных сетях (CAI-2016): материалы 1-й Международ. конф.* Екатеринбург: УрФУ; 2016. С. 161–162.

2. Wright J., Yang A. Y., Ganesh A., Sastry S. S., Ma Y. Robust face recognition via sparse representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2009;31(2):210–227.

3. Dorosinskiy L. G. Invariants for the radar image classification. In: Maximov Ya. (ed.) *Applied and Fundamental Studies. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Academic Conference, March 8–10, 2013*. St. Louis, Missouri, USA: Publishing House «Science and Innovation Center», and the International Journal of Advanced Studies; 2013. Pp. 214–216.

4. Сколник М. И. *Справочник по радиолокации*. М.: Техносфера; 2014. Т. 1.

5. Ван Трис Г. *Теория обнаружения, оценок и модуляции*. М.: Советское радио; 1972.

6. Dorosinskiy L. G., Kurganski A. A. Modeling the clutter reflection suppression algorithm in synthetic-aperture radar. In: *CEUR Workshop Proceedings. REIT-Spring 2018: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, Yekaterinburg, March 14, 2018*. Pp. 49–57.

7. Dorosinskiy L., Myasnikov F. Radarsignal classification algorithms synthesis and analysis. In: *2017 IEEE 2<sup>nd</sup> Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, March 25–26, 2017*. Chongqing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2017. Pp. 119–122. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8053989

8. Yang D., Yang X., Liao G., Zhu S. Strong Clutter Suppression via RPCA in Multichannel SAR/GMTI System. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015;12(11):2237–2241. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2461654

## References

1. Myasnikov F. S., Ivanov O. Yu. Change detection of the earth's surface based on remote sensing. In: Tyagunov A. G. (ed.). *Computer image analysis: Intelligent solutions in industrial networks (CAI-2016): materials of the 1st International Conference*. Ekaterinburg: Ural Federal University named after first President of Russia B. N. Yeltsin; 2016, pp. 161–162. (In Russ.)

2. Wright J., Yang A. Y., Ganesh A., Sastry S. S., Ma Y. Robust face recognition via sparse representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2009;31(2):210–227.

3. Dorosinskiy L. G. Invariants for the radar image classification. In: Maximov Ya. (ed.) *Applied and Fundamental Studies. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Academic Conference, March 8–10, 2013*. St. Louis,

Missouri, USA: Publishing House «Science and Innovation Center», and the International Journal of Advanced Studies; 2013. Pp. 214–216.

4. Skolnik M. I. *Radar Reference*. Moscow: Tekhnosfera; 2014. Vol. 1. (In Russ.)

5. Van Trees H. L. *Detection, estimation and modulation theory. Part 1. Detection, estimation and linear modulation theory*. John Wiley & Sons; 1968.

6. Dorosinskiy L. G., Kurganski A. A. Modeling the clutter reflection suppression algorithm in synthetic-aperture radar. In: *CEUR Workshop Proceedings. REIT-Spring 2018: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Workshop on Radio Electronics and Information Technologies, Yekaterinburg, March 14, 2018*. Pp. 49–57.

7. Dorosinskiy L., Myasnikov F. Radarsignal classification algorithms synthesis and analysis. In: *2017 IEEE 2<sup>nd</sup> Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), Chongqing, China, March 25–26, 2017*. Chongqing: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2017. Pp. 119–122. DOI: 10.1109/IAEAC.2017.8053989

8. Yang D., Yang X., Liao G., Zhu S. Strong Clutter Suppression via RPCA in Multichannel SAR/GMTI System. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015;12(11):2237–2241. DOI: 10.1109/LGRS.2015.2461654

## Информация об авторах

**Доросинский Леонид Григорьевич**, окончил радиотехнический институт – РтФ Уральского государственного технического университета – УПИ (1967) профессор. Доктор технических наук (1997), профессор (2007). С 2016 г. – директор департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ-РтФ.

**Виноградова Нина Сергеевна**, окончила физический факультет Уральского государственного университета им. А.М. Горького (2009), магистр. С 2015 г. – старший преподаватель, зам. директора департамента радиоэлектроники и связи ИРИТ-РтФ.

## Information about the authors

**Leonid G. Dorosinskiy**, Graduated from the radioengineering faculty of the Ural Polytechnical Institute (1967), professor. Dr. tech. sciences (1997), professor (2007). Nowadays he works as a head of the department of radio-electronics and communication of the Institute of radio-electronics and IT of the Ural federal university.

**Nina S. Vinogradova**, Graduated from the faculty of physics of Gorky Ural state university (2009), master of physics. Nowadays she works as a senior lecturer and a subhead of the department of radio-electronics and communication of the Institute of radio-electronics and IT of the Ural federal university.

Поступила / Received: 04.04.2019

Принята в печать / Accepted: 04.05.2019

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2019.3.2.003

УДК 629.7.05

## Вопросы совместной обработки градиентных измерений в высокочувствительной магнитометрии

В. С. Поленов, Д. А. Ницак✉

Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского  
и Ю. А. Гагарина, Россия, 394064, г. Воронеж,  
ул. Старых Большевиков, 54А

✉ dima\_nitsak@mail.ru

### Аннотация

В интересах снижения влияния собственного магнитного поля носителя магнитометрической аппаратуры на показания магнитометра исследованы градиенты 1-го и 2-го порядков для  $z$ -компоненты вектора магнитной индукции произвольно ориентированного магнитного диполя. Рассмотрены особенности совместной обработки градиентных измерений.

### Ключевые слова

градиентометр, магнитное поле Земли, магнитометр

### Для цитирования

Поленов В. С., Ницак Д. А. Вопросы совместной обработки градиентных измерений в высокочувствительной магнитометрии. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(2):157–169. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.003

## Issues of the integrated processing of gradient measurements in high sensitive magnetometry

V. S. Polenov, D. A. Nitsak✉

Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin,  
54A Staryh Bolshevikov Str., Voronezh, 394064, Russia

✉ dima\_nitsak@mail.ru

### Abstract

We explore the first and the second-order of the derivative magnetic flux vector in relation to altitude in order to reduce internal magnetic field of the magnetometric equipment carrier influence on the readings of the vector supersensitive magnetometer. We consider the details of gradient measurements integrated processing in multidirectional magnetic dipole approximation. The average intensity altitude-component in the second-

order gradiometer is by an order of magnitude more than one of the first-order gradiometer without regard to the distance between the magnetic dipole and sensor. We confirm that every first and second-order gradient altitude-component disappears in the half-domain of the spherical angular values definition. The integrated processing of gradient measurements imposes the constraint on the domain of the spherical angular values definition. We conclude that this constraint may be controlled by limiting the corrected gradient projection in relation to the root-mean-square deviation.

### Keywords

gradiometer, geomagnetical field, magnetometer

### For citation

Polenov V. S., Nitsak D. A. Issues of the integrated processing of gradient measurements in high sensitive magnetometry. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(2):157–169. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.003

## 1. Введение

Высокая навигационная информативность аномального магнитного поля Земли (МПЗ) находит применение в бортовых корреляционно-экстремальных навигационных системах (КЭНС). Автономность и помехоустойчивость КЭНС, использующих геомагнитные поля Земли, стимулирует развитие информационно-измерительных технологий в направлении повышения точности и надежности данных КЭНС, а также чувствительности и быстродействия применяемых датчиков.

Использование магнитоградиентных измерений в КЭНС обеспечивает меньший радиус корреляции и позволяет компенсировать низкочастотные вариации МПЗ, однако требует повышенной чувствительности датчиков.

Решения по созданию высокочувствительных градиентометров реализуются, в частности на базе сверхпроводящих квантовых интерферометрических датчиков (СКВИД) с использованием криогенного оборудования для создания рабочих температур в диапазоне от 4 до 80 К. В таких условиях СКВИД-магнитометр обладает предельно высокой энергетической чувствительностью, сравнимой с постоянной Планка, большим динамическим диапазоном и высоким быстродействием [1; 2].

Важнейшей задачей при использовании СКВИД-магнитометров является компенсация собственного магнитного поля носителя магнитометрической аппаратуры. Благодаря развитию силовой электроники и разработке новых магнитных материалов, создаваемые на их основе мощные источники электрической энергии и двигатели электромеханических приводов все чаще применяются в бортовых системах управления.

При работе с реальными геологическими моделями аномального МПЗ, для компенсации магнитных помех важно оценить производные по базисным координатам. Например, вторая производная вектора индукции магнитного поля по высоте полета носителя, как правило, пренебрежимо мала по сравнению с соответствующей характеристикой собственного магнитного поля носителя [3].

Современные технологии позволяют создавать мобильные градиометры второго порядка на базе высокотемпературных СКВИД, разрешающая способность по индукции магнитного поля которых сравнима с разрешающей способностью низкотемпературных СКВИД, причем второй порядок производной может быть реализован с помощью электронной обработки сигналов градиометров первого порядка [2]. Таким образом при бортовых магнитоградиентных измерениях оценка градиентов магнитной индукции аномального МПЗ первого и второго порядков может проводиться совместно.

В работе исследован характер первой и второй производных вектора индукции магнитного поля по высоте полета носителя (далее – по координате  $z$ ), независимо от расстояния между источником и измерителем, в целях снижения влияния собственного магнитного поля носителя магнитометрической аппаратуры на показания магнитометра.

## 2. Градиентная магнитометрическая схема для оценки $z$ -компоненты второй производной индукции магнитного поля

Классическая градиентная магнитометрическая схема для оценки второй производной вектора индукции магнитного поля по направлению оси  $z$ , представляет собой три магнитометрических датчика, расположенных эквидистантно вдоль оси  $z$  с базой  $d$  и включенных дифференциально, как показано на рис. 1.

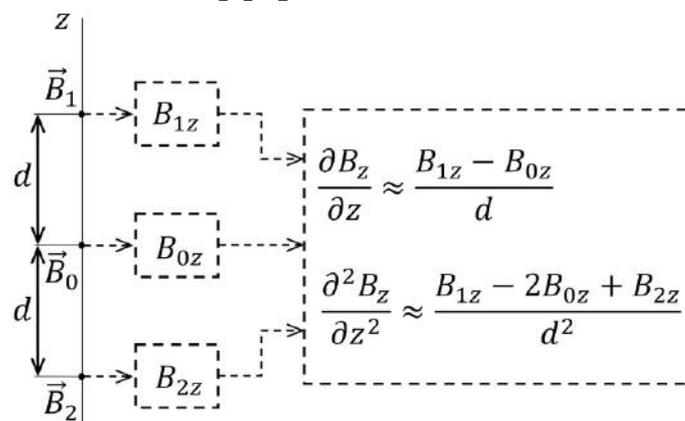


Рис. 1. Пример градиентометрической системы второго порядка

Fig. 1. A second-order gradiometer example

При достаточно малой базе градиентометра ( $d < 0,1$  м) схема на основе векторных магнитометров может проводить измерения соответствующих  $z$ -компонент величин:

$$B_z, \frac{\partial B_z}{\partial z}, \frac{\partial^2 B_z}{\partial z^2}.$$

Современные технологии позволяют уменьшить значение базы до 1 см и менее, что обеспечивает высокую точность градиентометрических вычислений.

При удалении от источника на расстояние, существенно превосходящее его размеры, поле этого источника неотлично от поля точечного диполя. Величина магнитной индукции постоянных магнитов в дальней зоне также хорошо описывается с помощью модели магнитного диполя, причем магнитные моменты материалов с высокой коэрцитивной силой практически не изменяются под действием внешнего магнитного поля.

Выражение для вектора магнитной индукции произвольно ориентированного магнитного диполя  $\vec{P}_m$  известно, т.е. вектор магнитной индукции диполя при достаточно больших расстояниях от диполя обратно пропорционален кубу расстояния  $|\vec{R}|$  до него:

$$\vec{B}_{dip} = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[ \frac{3(\vec{P}_m, \vec{R})\vec{R}}{|\vec{R}|^5} - \frac{\vec{P}_m}{|\vec{R}|^3} \right], \quad (1)$$

где

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2},$$

$\vec{R}$  – радиус-вектор, проведенный в точку пространства, где проводится измерение.

Важной особенностью (1) является ее существенная зависимость от режимов работы источников питания и исполнительных электромеханических устройств носителя магнитометрической аппаратуры.

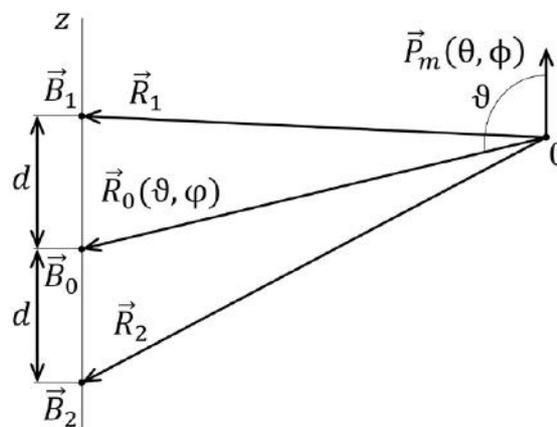


Рис. 2. Система координат, связанная с магнитным моментом

Fig. 2. The frame is referenced to magnetic moment

Проведем функциональный анализ градиентных измерений, определив векторные компоненты (1) как функции сферической системы координат в соответствии с рис. 2:  $\vec{P}_m(\theta, \phi); R(\vartheta, \varphi)$ .

Введем обозначения:

$$\overline{\Delta B}_1 = \frac{\vec{B}_1 - \vec{B}_0}{d}; \quad \overline{\Delta B}_2 = \frac{\vec{B}_1 - 2\vec{B}_0 + \vec{B}_2}{d^2}. \quad (2)$$

Выражения для  $\vec{B}_0$ ,  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  в общем случае достаточно громоздки, например, при  $\theta = 0$ ,  $\phi = 0$ ,  $\varphi = 0$ :

$$\vec{B}_0 = \frac{P}{R^3} \begin{bmatrix} 3 \sin \vartheta \cos \vartheta \\ 0 \\ 3 \cos^2 \theta - 1 \end{bmatrix};$$

$$\vec{B}_\alpha = \frac{P}{(R^2 + d^2 \mp 2Rd \cos \vartheta)^{5/2}} \begin{bmatrix} 3R(R \cos \vartheta \mp d) \sin \vartheta \\ 0 \\ 3R^2 \cos^2 \theta \mp 4Rd \cos \vartheta - R^2 + 2d^2 \end{bmatrix},$$

$$\alpha = 1, 2.$$

Подстановка обобщенных выражений  $\vec{B}_0$ ,  $\vec{B}_1$  и  $\vec{B}_2$  в (2) делает неудобным  $\overline{\Delta B}_1$  и  $\overline{\Delta B}_2$  для анализа, поэтому далее вместо них будем рассматривать  $\vec{b}^{(1)}$  и  $\vec{b}^{(2)}$ , определяемые как:

$$\vec{b}^{(1)} = \frac{R^4}{P} \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\vec{B}_1 - \vec{B}_2}{2d}; \quad \vec{b}^{(2)} = \frac{R^5}{P} \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\vec{B}_1 - 2\vec{B}_0 + \vec{B}_2}{d^2},$$

где верхние индексы в круглых скобках указывают на порядок производной.

Для интересующих нас  $z$ -составляющих  $\vec{b}^{(1)}$  и  $\vec{b}^{(2)}$  число переменных удастся свести к трем:  $\theta, \vartheta, \Delta = \phi - \varphi$ :

$$b_z^{(1)} = 15\theta_s \vartheta_s \Delta_c \left( \vartheta_c^2 - \frac{1}{5} \right) + 15\theta_c \vartheta_c \left( \vartheta_c^2 - \frac{3}{5} \right); \quad (3)$$

$$b_z^{(2)} = 105\theta_s \vartheta_s \vartheta_c \Delta_c \left( \vartheta_c^2 - \frac{3}{7} \right) + \theta_c (105\vartheta_c^4 - 90\vartheta_c^2 + 9), \quad (4)$$

где  $\theta_c = \cos \theta$ ,  $\theta_s = \sin \theta$ ,  $\vartheta_c = \cos \vartheta$ ,  $\vartheta_s = \sin \vartheta$ ,  $\Delta_c = \cos \Delta$ .

Выражения (3) и (4) позволяют оценить влияние взаимного направления  $\vec{P}_m(\theta, \phi)$  и  $\vec{P}_m(\vartheta, \varphi)$  на характер градиентных измерений независимо от коэффициентов пропорциональности  $P/R^4$  и  $P/R^5$ , соответственно.

Выполненная замена вполне обоснована, так как в градиентометре 1-го порядка максимальное значение разности

$$\left( \frac{d^4 \Delta B_{1z}}{P} - \frac{b_z^{(1)}}{r^4} \right) \Big|_{\theta=0, \vartheta=0} = \frac{2}{|r-1|^3} - \frac{2(|r|+3)}{r^4}$$

убывает со скоростью минус 100 дБ на порядок относительно расстояния  $r = R/d$  до магнитного диполя при  $r \rightarrow \infty$ . В градиентометре 2-го порядка, соответствующая разность

$$\left( \frac{d^5 \Delta B_{2z}}{P} - \frac{b_z^{(2)}}{r^5} \right) \Big|_{\theta=0, \vartheta=0} = \frac{2}{|r-1|^3} + \frac{2}{|r+1|^3} - \frac{4(r|r|+6)}{r^5}$$

убывает еще быстрее – минус 140 дБ на порядок  $r$  при  $r \rightarrow \infty$ .

Максимальные значения (3) и (4) достигаются при  $\theta = m\pi$ ,  $\vartheta = n\pi$ , где  $m, n = 0, \pm 1, \dots$  и равны, соответственно 6 и 24.

Средние значения

$$(2\pi^3)^{-1} \int_0^\pi \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi b_z^{(1)} d\Delta \quad \text{и} \quad (2\pi^3)^{-1} \int_0^\pi \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi b_z^{(2)} d\Delta$$

равны нулю. Среднеквадратические отклонения:

$$(2\pi^3)^{-1} \int_0^\pi \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi (b_z^{(1)})^2 d\Delta = \frac{423}{64} \approx 6.6;$$

$$(2\pi^3)^{-1} \int_0^\pi \int_0^\pi \int_{-\pi}^\pi (b_z^{(2)})^2 d\Delta = \frac{44091}{512} \approx 86.1$$

позволяют сравнить средние интенсивности измерений в градиентометрах 1-го и 2-го порядков, опуская зависимость убывания от расстояния между магнитным диполем и точкой измерения. В относительных единицах это 8.2 и 19.4 дБ, соответственно.

Нулевые значения (3) определяются из уравнения

$$\Delta_1 = \pi - \arccos \frac{5\vartheta_s^2 - 2}{\operatorname{tg}\theta \operatorname{tg}\vartheta (5\vartheta_s^2 - 4)}, \quad (5)$$

нулевые значения (4) – из уравнения

$$\Delta_2 = \arccos \frac{35\vartheta_s^4 - 40\vartheta_s^2 + 8}{5\vartheta_s \vartheta_c \operatorname{tg}\theta (7\vartheta_s^2 - 4)}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны границы областей определения  $\theta$  и  $\vartheta$ , удовлетворяющих (5) и (6) с учетом сохранения  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  в области действительных значений. Сплошной линией ограничена область определения  $\theta$  и  $\vartheta$  для градиентометра 1-го порядка, пунктирной – 2-го порядка. Площадь каждой указанной области определения составляет половину от  $\pi^2$ , т.е. значения градиен-

тов – каждого в отдельности, – можно свести к нулю в половине всех возможных случаев когда  $0 \leq \theta \leq \pi$  и  $0 \leq \vartheta \leq \pi$ .

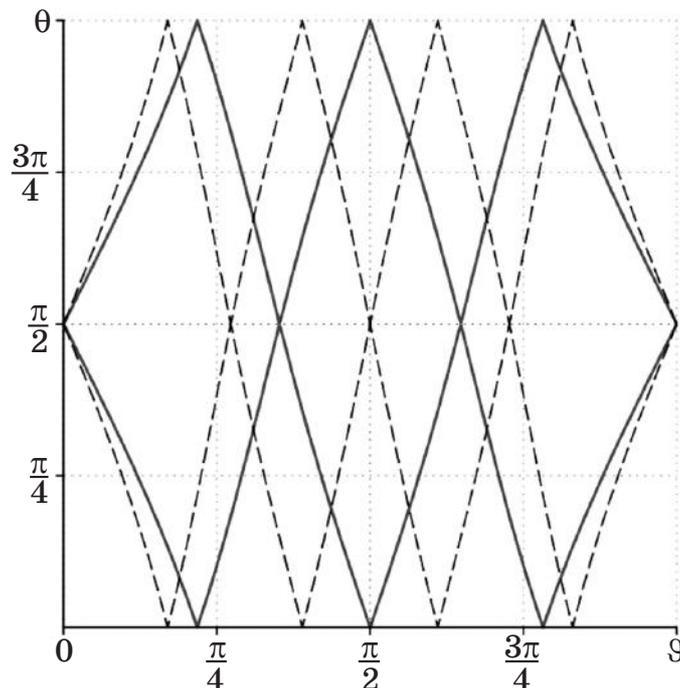


Рис. 3. Границы областей определения  $\theta$  и  $\vartheta$   
Fig. 3. The definition bounds of  $\theta$  and  $\vartheta$

Как видно из рис. 3, области определения нулевых значений (3) и (4) не совпадают. Действительные значения  $\vartheta$  и  $\Delta$  для совместных решений системы уравнений  $b_z^{(1)} = 0$  и  $b_z^{(2)} = 0$  возможны при  $\theta = \pi/2$ :  $\Delta = \pi/2$  при любом  $\vartheta$  и  $\vartheta = 0$  при любом  $\Delta$ . Это существенно усложняет задачу снижения влияния собственного магнитного поля на измеритель, когда прорабатываются варианты компоновки электронных изделий в составе носителя магнитометрической аппаратуры на этапе проектирования. Следовательно, при совместной обработке результатов градиентных измерений необходим поиск компромиссных решений.

### 3. Совместная обработка измерений градиентометра 1-го и 2-го порядков

Подстановкой (5) в (4) находим

$$b_z^{(2)} \Big|_{\Delta=\Delta_1} = \frac{-3\vartheta_c(5\vartheta_c^4 + 3)}{5\vartheta_c^2 - 1}. \quad (7)$$

Выражение (7) равно нулю при  $\theta = \pi/2$  и имеет разрывы 2-го рода при  $\vartheta$  равном

$$\arccos \frac{\sqrt{5}}{5} \text{ и } \pi - \arccos \frac{\sqrt{5}}{5}.$$

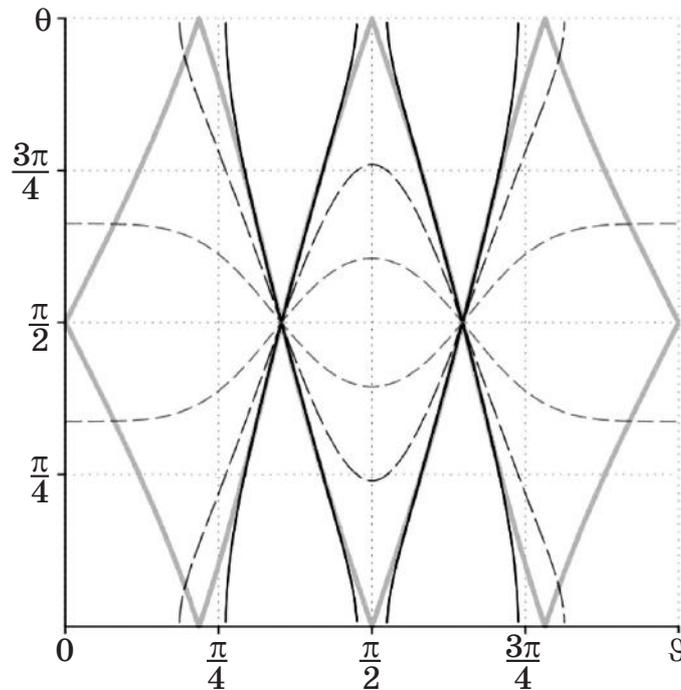
Возведем (7) в квадрат и решим уравнение

$$\frac{9\vartheta_c^2 (5\vartheta_c^4 + 3)^2}{(5\vartheta_c^2 - 1)^2} = k \frac{44091}{512}.$$

Получим

$$\theta_{1,2} = \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ \pi \end{array} \right\} \pm \arccos \frac{\sqrt{k} \sqrt{9798} (5\vartheta_c^2 - 1)}{32 (5\vartheta_c^4 + 3)},$$

где  $k$  – коэффициент, задающий максимально допустимое значение  $b_z^{(2)}$  относительно его среднеквадратического отклонения. На рис. 4 для различных значений показано изменение области определения  $\theta$  и  $\vartheta$  нулевых значений градиента 1-го порядка. Сплошная линия соответствует  $k = 1$ , длинный пунктир –  $k = 1/2$ , пунктир –  $k = 1/10$ .



**Рис. 4.** Изменение (сужение) границ области определения  $\theta$  и  $\vartheta$  для градиентометра 1-го порядка

**Fig. 4.** The definition bounds variation (contraction) of  $\theta$  and  $\vartheta$  for a first-order gradiometer

Выполним аналогичные действия для анализа ограничений области определения  $\theta$  и  $\vartheta$  нулевых значений градиента 2-го порядка.

Подстановкой (6) в (3) находим

$$b_z^{(1)} \Big|_{\Delta=\Delta_2} = \frac{3\vartheta_c (5\vartheta_c^4 + 3)}{5\vartheta_c (7\vartheta_c^2 - 3)}. \quad (8)$$

Выражение (8) равно нулю при  $\theta = \pi/2$  и содержит разрывы 2-го рода при

$$\vartheta = \arccos \frac{\sqrt{21}}{7}, \quad \vartheta = \frac{\pi}{2} \quad \text{и} \quad \vartheta = \pi - \arccos \frac{\sqrt{21}}{7}.$$

Возведя (8) в квадрат и решив уравнение

$$\frac{9\vartheta_c^2 (5\vartheta_c^4 + 3)^2}{25\vartheta_c^2 (7\vartheta_c^2 - 3)^2} = k \frac{423}{64},$$

получим

$$\theta_{1,2} = \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ \pi \end{array} \right\} \pm \arccos \frac{5\sqrt{k}\sqrt{47}\vartheta_c(7\vartheta_c^2 - 3)}{8(5\vartheta_c^4 + 3)}.$$

На рис. 5 для различных значений  $k$  показано изменение области определения  $\theta$  и  $\vartheta$  нулевых значений градиента 2-го порядка при аналогичных обозначениях.

В обоих случаях при  $k = 1$  область определения  $\theta$  и  $\vartheta$  практически не меняется, при  $k = 1/2$  составит примерно 77% от максимума, а при  $k = 1/10$ , соответственно, 38%. Угол  $\vartheta$  в общем может принимать произвольные значения, чего в свою очередь нельзя сказать о  $\theta$ . С уменьшением  $k$  диапазон возможных значений  $\theta$  сужается и стремится к  $\pi/2$ .

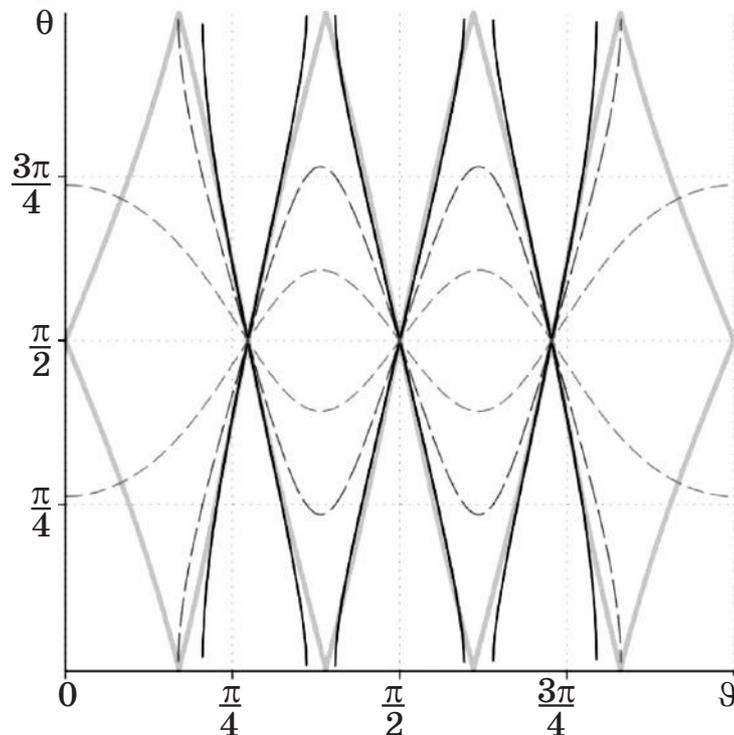


Рис. 5. Изменение (сужение) границ области определения  $\theta$  и  $\vartheta$  для градиентометра 2-го порядка

Fig. 5. The definition bounds variation (contraction) of  $\theta$  and  $\vartheta$  for a second-order gradiometer

Отсутствие зависимости (3) и (4) от  $P$  и  $R$  можно использовать для компенсации магнитных помех при совместной обработке градиентных измерений, а также для калибровки магнетометра.

Выполним нормировку (3) и (4) и решим уравнение  $24b_z^{(1)} = 6b_z^{(2)}$ . Равенство нормированных градиентов 1-го и 2-го порядков для произвольных  $\theta$  и  $\vartheta$  обеспечивается при

$$\Delta_n = \arccos \frac{\vartheta_s(35\vartheta_c^3 + 15\vartheta_c^2 - 15\vartheta_c - 3)}{\operatorname{tg}\theta(35\vartheta_c^4 + 15\vartheta_c^3 - 35\vartheta_c^2 - 11\vartheta_c + 4)}. \quad (9)$$

Таким образом, нормированные значения (3) и (4) с учетом (9)

$$\frac{1}{6}b_z^{(1)} \Big|_{\Delta=\Delta_n} = \frac{1}{24}b_z^{(2)} \Big|_{\Delta=\Delta_n} = \frac{\theta_c(5\vartheta_c^4 + 3)}{70\vartheta_c^3 - 40\vartheta_c^2 - 30\vartheta_c + 8}. \quad (10)$$

Выражение (10) равно нулю при  $\theta = \pi/2$ , не имеет экстремумов и содержит разрывы 2-го рода при

$$\vartheta = \arccos \left( \frac{2\sqrt{79}}{21} \sin\gamma + \frac{4}{21} \right),$$

$$\vartheta = \arccos \left( \frac{\sqrt{3}\sqrt{79}}{21} \cos\gamma - \frac{\sqrt{79}}{21} \sin\gamma + \frac{4}{21} \right)$$

$$\text{и } \vartheta = \pi - \arccos \left( \frac{\sqrt{3}\sqrt{79}}{21} \cos\gamma + \frac{\sqrt{79}}{21} \sin\gamma - \frac{4}{21} \right),$$

где

$$\gamma = \frac{1}{3} \operatorname{arctg} \left( \frac{21\sqrt{27519}}{436} \right) + \frac{\pi}{6},$$

что соответствует, примерно 25, 77 и 124 градусам.

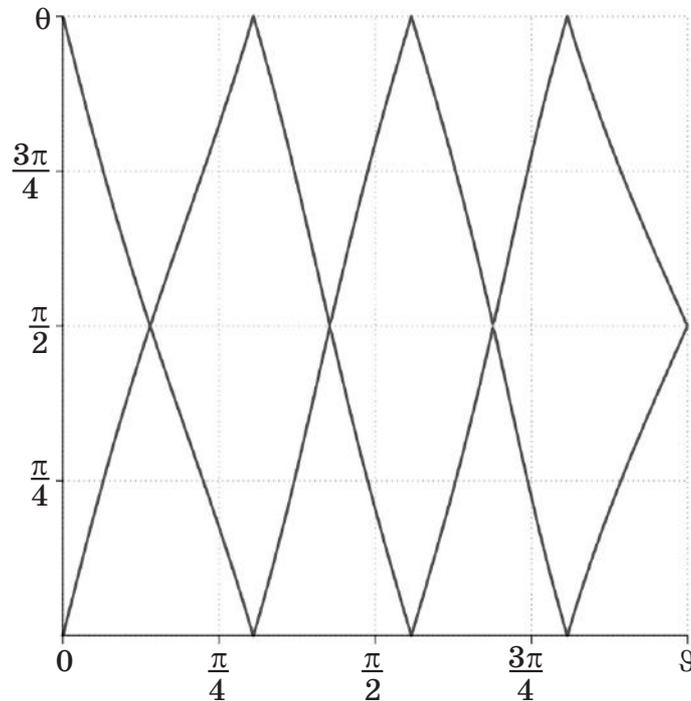
На рис. 6 показаны границы области определения  $\theta$  и  $\vartheta$ , где  $\Delta_n$  принимает действительные значения. По аналогии с (5) или (6) площадь обозначенной области определения составляет половину от  $\pi^2$ .

Решая  $\Delta_n = 0$  относительно  $\theta$ , получим

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{\vartheta_s(35\vartheta_c^3 + 15\vartheta_c^2 - 15\vartheta_c - 3)}{35\vartheta_c^4 + 15\vartheta_c^3 - 35\vartheta_c^2 - 11\vartheta_c + 4}. \quad (11)$$

Подстановкой (11) в (10) находим максимальные по модулю значения градиентов, принадлежащие границе области определения  $\theta$  и  $\vartheta$ , показанной на рис. 6,

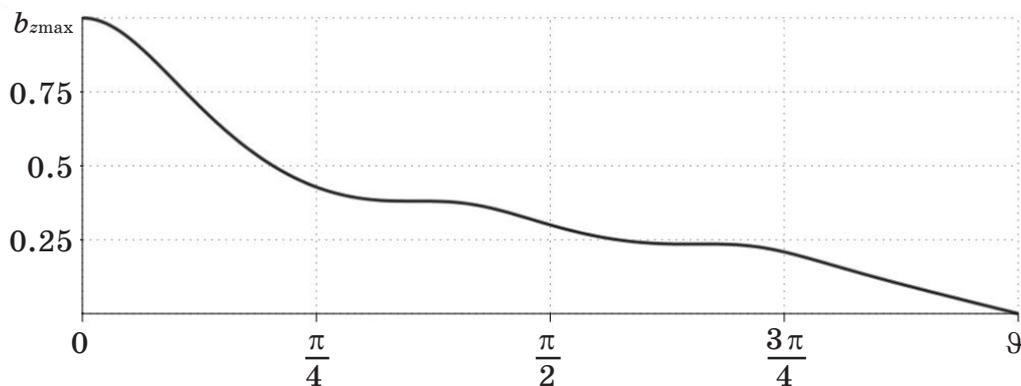
$$b_{z\max} = \frac{5\vartheta_c^4 + 3}{2} \sqrt{\frac{-\vartheta_c - 1}{175\vartheta_c^5 - 65\vartheta_c^4 - 150\vartheta_c^3 + 10\vartheta_c^2 + 23\vartheta_c - 25}}. \quad (12)$$



**Рис. 6.** Границы области определения  $\theta$  и  $\vartheta$ , где обеспечивается равенство нормированных градиентов 1-го и 2-го порядков

**Fig. 6.** The definition bound of  $\theta$  and  $\vartheta$  for normalized first and second-order gradients equality

На рис. 7 (12) представлена как функция от  $\vartheta$ . При  $\vartheta > 36.7^\circ$  нормированные значения градиентов 1-го и 2-го порядков  $b_{z\max}$  не превышают половины от максимального значения, что целесообразно учитывать при проектировании магнитометрической аппаратуры.



**Рис. 7.** Максимальные абсолютные значения нормированных градиентов 1-го и 2-го порядков

**Fig. 7.** The maximum modulus of normalized first and second-order gradients

#### 4. Заключение

1. Средняя интенсивность измерений  $z$ -компоненты в градиентометре 2-го порядка без учета зависимости убывания от расстояния между магнитным диполем и точкой измерения примерно в 13 раз больше средней интенсивности соответствующих измерений в градиентометре 1-го порядка.

2. Значения  $z$ -проекции градиентов 1-го и 2-го порядков по отдельности можно свести к нулю в половине всех возможных случаев когда  $0 \leq \theta \leq \pi$  и  $0 \leq \vartheta \leq \pi$ .

3. Совместная обработка градиентных измерений накладывает ограничения на область определения  $\theta$  и  $\vartheta$ . Эти ограничения можно контролировать, определяя максимально допустимое значение для приведенной проекции вектора градиента относительно ее среднеквадратического отклонения или обеспечивая равенство нормированных градиентов 1-го и 2-го порядков для построения компенсирующих схем.

#### Список литературы

1. Гринберг Я. С. Проблемы создания высокоточных измерительных приборов на основе сверхпроводниковых квантовых интерферометров. В: Голышев Н. В. (ред.). *Биомагнитные исследования*. Новосибирск: НГТУ; 2000. С. 17–19.

2. Бурмистров Е. В. *Градиентометр на базе ВТСП СКВИДов для работы в неэкранированном пространстве: дис. ... канд. физ.-мат. наук*. М.; 2009.

3. Каршаков Е. В., Павлов Б. В. Навигационное обеспечение задачи измерения физических полей на борту летательного аппарата. *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. 2010;104(3):77–82.

#### References

1. Grinberg Ya. S. The squid based precise measuring instruments creation problems. In: Golyshev N. V. (ed.). *Bio magnetic research*. Novosibirsk: State Technical University of Novosibirsk; 2000, pp. 17–19. (In Russ.)

2. Boormistrov E. V. *The high-temperature squid based gradiometer for unshielded area work: PhD (Phys.-Math.)*. Moscow; 2009. (In Russ.)

3. Korshakov E. V., Pavlov B. V. A navigational support of airborne physical fields measurements. *South Federal University reports. The Technical Science*. 2010;104(3):77–82. (In Russ.)

#### Информация об авторах

Поленов Виктор Сидорович – доктор физико-математических наук, профессор, старший научный сотрудник, Военно-воздушная акаде-

мия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А.

**Ницак Дмитрий Анатольевич** – кандидат технических наук, начальник отдела, Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, Россия, 394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А, e-mail: [dima\\_nitsak@mail.ru](mailto:dima_nitsak@mail.ru).

### Information about the authors

**Viktor S. Polenov** – Dr. Sc. (Phys.Math.), Professor, Senior Research Assistant, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, 54A Staryh Bolshevnikov Str., Voronezh, 394064, Russia.

**Dmitry A. Nitsak** – Cand. Sc. (Eng.), Head of Department, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin, 54A Staryh Bolshevnikov Str., Voronezh, 394064, Russia, e-mail: [dima\\_nitsak@mail.ru](mailto:dima_nitsak@mail.ru).

Поступила / Received: 15.04.2019

Принята в печать / Accepted: 25.06.2019

DOI 10.15826/urej.2019.3.2.004

УДК 621.396.3

## Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративных приемопередающих устройств

С. И. Кудинов✉, В. Э. Иванов

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

✉ s.kudinov@urfu.ru

### Аннотация

Рассматриваются вопросы ударного возбуждения колебательной системы транзисторного сверхрегенеративного приемопередающего устройства в момент запуска импульсами тока для разных законов затухания и их влияние на чувствительность и усиление в приемном режиме работы, определение условий достижения высокой чувствительности устройства к слабым внешним сигналам на основе анализа флуктуационных колебаний в приемном режиме работы, оценка полосы пропускания входного колебательного контура сверхрегенеративного приемопередатчика при нулевом значении затухания этого контура, а также оценка суммарного воздействия ударных и флуктуационных колебаний на параметры сверхрегенеративного приемопередатчика.

### Ключевые слова

сверхрегенератор, ударные колебания, затухание контура, флуктуационные колебания, полоса пропускания колебательного контура

### Для цитирования

Кудинов С. И., Иванов В. Э. Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративных приемопередающих устройств. *Уральский радиотехнический журнал*. 2019;3(2):170–194. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.004

## Research of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of superregenerative transceivers

S. I. Kudinov✉, V. E. Ivanov

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

✉ s.kudinov@urfu.ru

### Abstract

We study the issues of shock excitation of the oscillatory system of a transistor superregenerative transceiver at the moment of starting with current pulses for different damping laws and their influence on the

sensitivity and gain in the receiving mode of operation, determining the conditions for achieving high sensitivity of the device to weak external signals based on the analysis of fluctuation fluctuations in the receiving mode of operation. We evaluate the bandwidth of the input oscillatory circuit of the superregenerative transceiver at zero damping of this circuit. We estimate the total impact shock and vibrations on the fluctuation parameters superregenerative transceiver.

### Keywords

superregenerator, shock oscillations, contour attenuation, fluctuation oscillations, oscillation contour bandwidth.

### For citation

Kudinov S. I., Ivanov V. E. Research of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of superregenerative transceivers. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(2):170–194. DOI: 10.15826/urej.2019.3.2.004

## Введение

Изменение климата вынуждает ученых и специалистов создавать новые более усовершенствованные методы контроля окружающей среды, в том числе для исследования параметров атмосферы. Развитие систем радиозондирования (СР) атмосферы в глобальном масштабе в настоящее время осуществляется под управление Всемирной метеорологической организации (ВМО). Это способствует своевременному созданию новых технических средств для СР, повышению их характеристик и снижению расходов на эксплуатацию.

В основу построения СР были положены результаты фундаментальных исследований отечественных и зарубежных ученых: А. П. Молчанова, Г. С. Горелика, Л. С. Гуткина, М. К. Белкина, И. Р. Уайтхеда, Б. Г. Рождественского, Г. И. Кравченко и др. [1–43].

Отличительной особенностью отечественных СР является эффективное применение в составе аэрологических радиозондов (АРЗ) сверхрегенеративных приемопередатчиков (СПП) [44–53]. Это позволяет осуществить измерение пространственных координат и передачу телеметрической информации АРЗ на одной несущей частоте с высокой надежностью и минимальными затратами.

В статье проводится подробный анализ физических процессов, происходящих в транзисторном СВЧ-автогенераторе (СВЧ АГ) течение приемного интервала работы СПП, определяющих его важнейшие параметры – высокую чувствительность к запросному сигналу РЛС и избирательность. Эти вопросы частично рассматривались в ряде работ авторов, но достаточно полного, последовательного изложения всех особенностей процесса усиления сделано не было.

Необходимо пояснить эффект сверхрегенеративного усиления (СУ) внешнего сигнала. На рис. 1 изображены основные параметры СПП в течение одного периода повторения радиоимпульсов (частота суперизации  $F_{\text{super}}$ ):  $T_{\text{super}}$ :  $U_p$  – огибающая радиоимпульса СПП, со стационарной амплитудой  $U_{st}$ ;  $\tau_{\text{super}}$  – длительность импульса включения (импульса суперизации) СПП;  $\tau_{\text{demp}}$  – интервал демпфирования;  $\tau_d$  – длительность задержки переднего фронта радиоимпульсов СПП;  $\tau_p$  – длительность радиоимпульсов СПП;  $\Delta\tau_d$  – приращение длительности радиоимпульсов СПП за счет СУ;  $\delta_{(t)}$  – закон изменения декремента затухания контура СВЧ АГ;  $\delta_0$  – декремента затухания контура выключенного СПП;  $\delta_s$  – декремента затухания контура в момент запуска СПП;  $U_b$  – напряжение запуска СВЧ АГ.

При включении автогенератора в момент поступления отпиряющего напряжения  $U_{\text{super}} = U_b$ , отрицательный пусковой декремент затухания  $\delta_s$  обеспечивает его самовозбуждение от уровня флуктуации и развитие автоколебаний до установления стационарной амплитуды  $U_{st}$ . Нарастающий характер декремента затухания  $\delta_{(t)}$  связан с жестким характером переходного процесса установления автоколебаний в контуре определяемого регенеративной характеристикой СВЧ АГ [9; 11]. При поступлении внешнего запросного радиоимпульса РЛС в момент запуска время установления колебаний сокращается на величину  $\Delta\tau_d$ , а энергия радиоимпульса пропорционально увеличивается. Это приращение энергии используется для обнаружения ответного сигнала СПП и определения наклонной дальности до АРЗ [47–50].

Для повышения эффекта усиления внешнего сигнала необходимо обеспечивать минимальный уровень собственных шумов СВЧ АГ в момент запуска. С другой стороны, при запуске автогенератора импульсы постоянного тока создают ударные колебания (УК), которые резко снижают чувствительность и усиле-

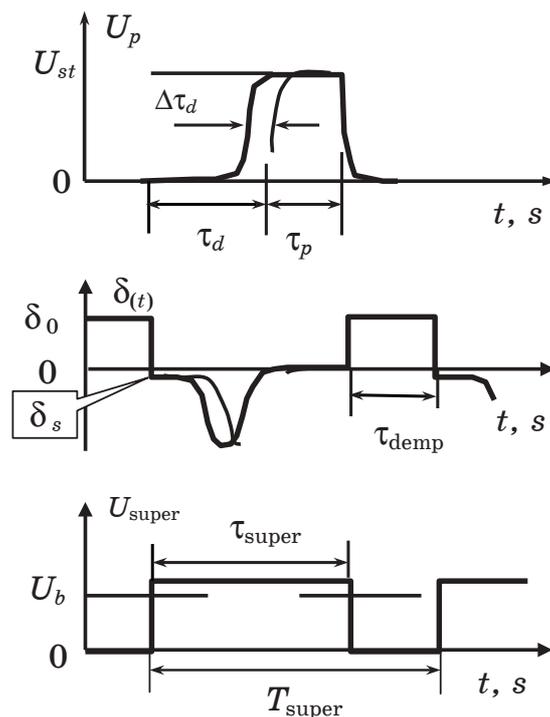


Рис. 1. Сверхрегенеративный эффект усиления

Fig. 1. Superregenerative amplification effect

ние СПП. Влияние УК на условия запуска и чувствительность сверхрегенеративных усилителей (СУ) и приемопередатчиков (СПП) исследовалось в работах авторов [3; 4; 6; 7]. Однако результаты этих исследований не были доведены до расчетных соотношений и давали только возможность качественной оценки этого эффекта. Тем не менее влияние УК практически проявляется всегда, в том числе при запуске мощных импульсных СВЧ-автогенераторов и требует соответствующего учета. Механизм их действия связан с возбуждением колебательной системы автогенератора высшими гармониками видеоимпульсов тока активного элемента в момент запуска.

В работе проводится исследование механизма формирования флуктуационных и ударных колебаний и их влияние на параметры СПП.

### Исследование ударных колебаний в контуре СПП

В работе исследуется эффект ударного возбуждения колебательной системы транзисторного СПП в момент запуска импульсами тока для разных законов затухания путем численного решения дифференциального уравнения с помощью пакета МАТЛАБ. Некоторые аспекты исследования вопросов теории СПП частично были рассмотрены ранее [51–53].

На рис. 2 изображена эквивалентная схема колебательной системы СПП содержащая соответственно  $C_c$  – емкость и  $L_c$  – индуктивность контура,  $R_c(t)$  – резонансное знакопеременное сопротивление контура, управляемое генератором импульсов тока  $I_e$  с частотой суперизации. По сути, СПП является приемопередающим устройством с быстрым переключением приемного и передающего режимов работы в течение одного периода суперизирующей частоты [11–15]. Ударные колебания возбуждаются в контуре импульсами тока генератора  $I_e(t)$ , протекающего через активный элемент СПП в момент его запуска. Поскольку спектр импульсов тока активного элемента достаточно сложен, а затухание контура

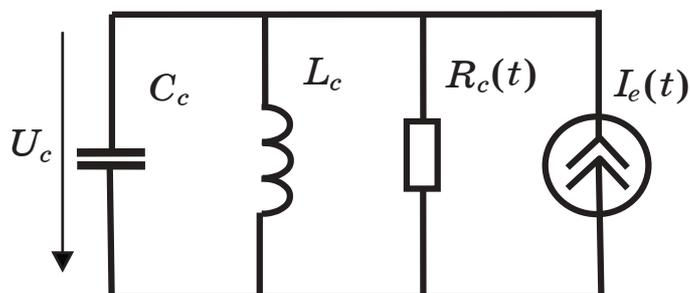


Рис. 2. Эквивалентная схема сверхрегенеративного приемопередатчика

Fig. 2. Equivalent scheme of the superregenerative transceiver

является функцией тока, определить эффект возбуждения вынужденных колебаний в контуре практически можно путем интегрирования дифференциального уравнения колебательной системы СПП.

Математическая модель СПП учитывающая амплитуды и флуктуации внешних сигналов и затухания контура может быть представлена в виде нелинейного стохастического уравнения вида

$$\frac{d^2u}{dt^2} + 2\delta[t, u, \xi(t)] \frac{du}{dt} + \omega^2 u = \omega^2 E[t, \zeta(t)], \quad (1)$$

где  $u$  – напряжение на емкости контура;  $\delta[t, u, \xi(t)]$  – декремент затухания контура;  $E[t, \xi(t)]$  – внешнее воздействие в контуре;  $\xi(t)$  – флуктуационная составляющая затухания;  $\zeta(t)$  – флуктуационная составляющая внешнего воздействия.

Для расчета уровня УК исходное дифференциальное уравнение (1), моделирующее процессы в контуре, необходимо представить в виде явной зависимости от постоянной составляющей тока эмиттера:

$$\frac{d^2u_c}{dt^2} + 2\delta(t) \frac{du_c}{dt} + \omega^2 u_c = -\frac{1}{C} \frac{dI_e(t)}{dt}, \quad (2)$$

где  $u_c$  – амплитуда напряжения на элементах контура СПП;

$\delta(t) = \frac{1}{2R_c(t)C_c}$  – декремент затухания контура;

$R_c(t) = \frac{L_c}{R_c C_c}$  – резонансное сопротивление параллельного контура;

$R_c$  – активное сопротивление контура.

Реально ток эмиттера  $I_e$  нарастает постепенно (рис. 3). Максимальная амплитуда ударных колебаний  $U_m$  оказывается пропорциональна крутизне и амплитуде пускового тока. Если затухание колебательной системы положительно (система диссипативна, декрементная) ударные колебания имеют затухающий характер (рис. 3, 1). В случае отрицательного затухания (инкрементная система) ударные колебания определяют экспоненциальное нарастание амплитуды автоколебаний (рис. 3, 2).

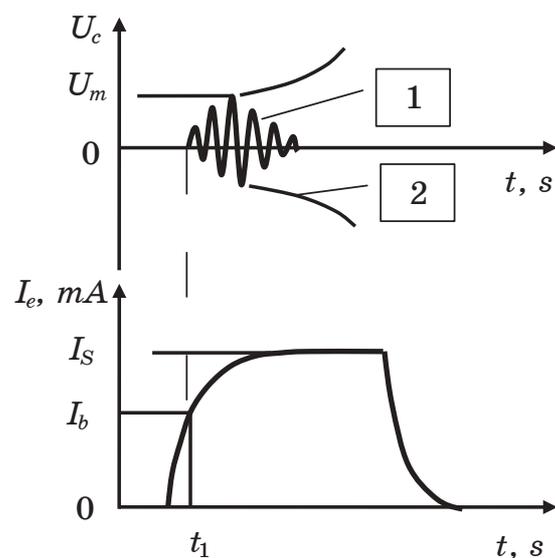


Рис. 3. Механизм ударного возбуждения колебательного контура СПП

Fig. 3. Mechanism of shock excitement of an oscillatory contour of the superregenerative transceiver

Необходимо подчеркнуть, что это условие также предполагает мягкий характер возбуждения автоколебаний в контуре.

Для осуществления численных расчетов далее предполагается, что амплитуда ударных колебаний достаточно мала, а флуктуации тока и регенеративной характеристики не влияют на процесс их формирования. В этом случае математическая модель диссипативной и инкрементной модели колебательной системы может быть задана в виде неоднородного дифференциального уравнения (2). Уравнение колебательной системы СПП представлено в классическом варианте. Далее рассматривается линейный режим работы СПП.

Вынужденные колебания (УК) определяются функцией постоянного тока, которая задается в виде зависимости отображающей реальный закон изменения тока эмиттера транзистора при запуске (рис. 3):

$$I_e(t) = I_b (1 - e^{-\alpha t}), \quad (3)$$

где  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий крутизну нарастания тока эмиттера;  $I_b$  – пусковой ток автогенератора;  $I_e = I_b$  – граничный ток, соответствующий моменту самовозбуждения.

Ток эмиттера, вызывая ударные колебания, одновременно управляет затуханием контура. Поэтому необходимо получить выражение, связывающее изменение затухания от тока активного элемента.

Зависимость тока коллектора  $I_k$  от управляющего напряжения описывается экспоненциальной функцией [14]:

$$I_k = I_{k0} \left( \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_t}\right) - 1 \right), \quad (4)$$

где  $\varphi_t$  – температурный потенциал при  $T = 300^\circ \text{K}$ ;  $I_{k0}$  – тепловой ток.

Дифференцируя выражение (4), можно получить формулу для расчета фактора регенерации в виде функции от напряжения  $U_{be}$ :

$$\Psi = R_y \frac{I_{k0}}{\varphi_t} \exp\left(\frac{U_{be}}{\varphi_t}\right) - 1, \quad (5)$$

где  $\Psi = SR_y - 1$  фактор регенерации автогенератора;  $R_y$  – управляющее сопротивление автогенератора;

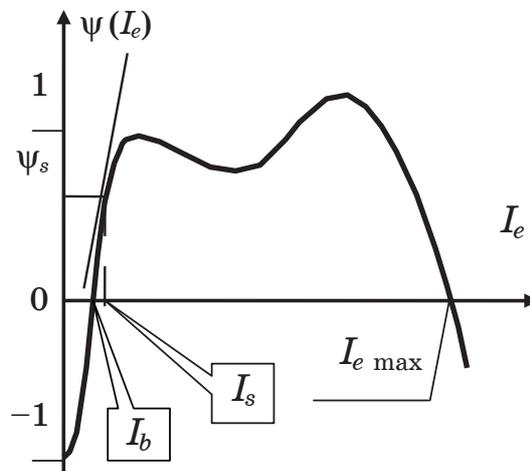
$S = \frac{dI_k}{dU_{be}}$  – крутизна активного прибора автогенератора.

Дифференциальное приращение  $\Psi$  за счет управляющего напряжения находится на основе выражения (5) и может быть представлено следующим соотношением:

$$d\Psi = \frac{1}{\Phi_t}(\Psi + 1)dU_{be}. \quad (6)$$

На рис. 4 приведена статическая регенеративная характеристика транзисторного СВЧ-автогенератора (СРХ) – зависимость фактора регенерации от тока эмиттера [9–11]. Выражение для фактора регенерации автогенератора, работающего в линейном (малосигнальном) режиме, от тока эмиттера может быть представлено в виде:

$$\psi(I_e) = \psi(I_e = I_b) + \left[ \frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e = I_S)} (I_e - I_b). \quad (7)$$



**Рис. 4.** Статическая регенеративная характеристика транзисторного СВЧ-автогенератора

**Fig. 4.** Static regenerative characteristic of the transistor microwave oscillator

Для моделирующих расчетов фактор регенерации удобно представить в виде линейной модели так, чтобы выполнялись условия: при  $I_e = 0$   $\psi = 1$ , а при  $I_e = I_b$   $\psi(I_e) = 0$ :

$$\psi(I_e) = 1 - \left( \frac{1}{I_b} \right) I_e. \quad (8)$$

Соответственно, затухание колебательной системы можно представить в зависимости от фактора регенерации, и в конечном счете от текущего значения тока эмиттера и далее использовать для решения исходного дифференциального уравнения:

$$\delta(t) = \frac{G_\Sigma}{2C_c} \psi(t). \quad (9)$$

где  $G_\Sigma$  – суммарная проводимость потерь колебательной системы СПП;  $C_c$  – эквивалентная емкость контура.

Далее декремент затухания учитывая (9) целесообразно записать следующим образом

$$\delta(t) = \frac{G_{\Sigma}}{2C_c} \left[ \left( \frac{1}{I_b} \right) I_s (1 - e^{-\alpha t}) - 1 \right]. \quad (10)$$

При подстановке соотношений для декремента затухания (10) и тока эмиттера (3) в выражение (2), уравнение автогенератора можно представить в виде:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + \frac{G_{\Sigma}}{C_c} \left[ \left( \frac{1}{I_b} \right) I_s (1 - e^{-\alpha t}) - 1 \right] \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C_c} \frac{dI_s (1 - e^{-\alpha t})}{dt}. \quad (11)$$

С помощью полученного соотношения, изменяя величину тока эмиттера в соответствии с выражением (3) от нуля (что соответствует собственному затуханию нерегенерированного контура) до установившегося пускового значения (что соответствует автоколебательному режиму) можно рассчитать амплитуду ударных колебаний для различной формы импульсов тока. При этом учитываются соответствующие изменения затухания контура для декрементного, так и для инкрементного режимов работы СПП.

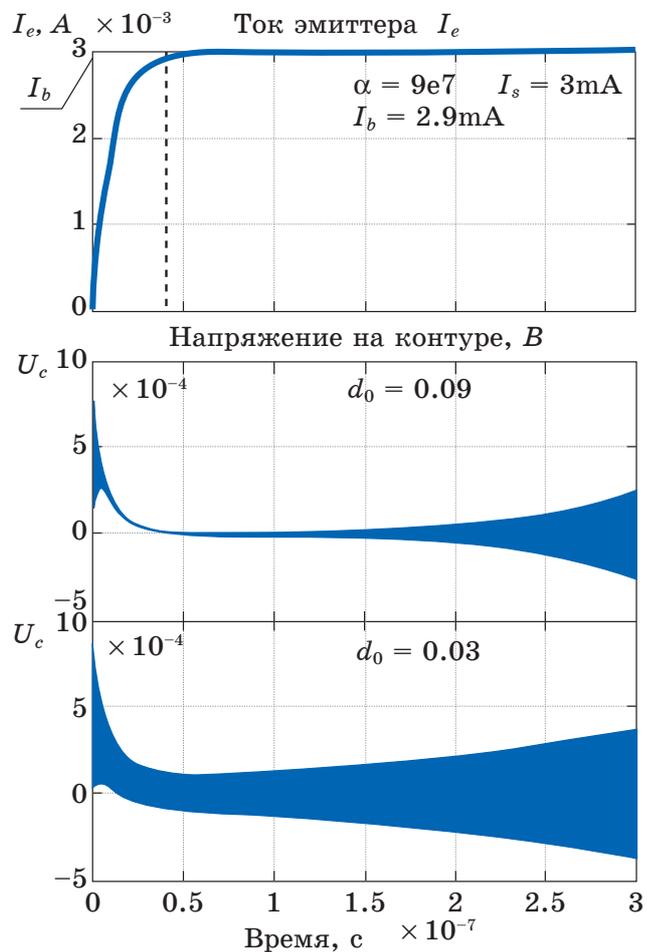
Компьютерное моделирование процесса развития УК и перехода к автоколебаниям проводилось для транзисторного СВЧ АГ СПП, работающего на частоте 1680 МГц при различных значениях начального затухания нерегенерированного контура –  $d_0 = 0.01 \div 0.1$ . Пусковой ток  $I_s$  выбирался для транзистора BFG-235A в диапазоне значений  $I_s = (1 - 10) \text{mA}$ , в соответствии с расчетами обобщенной регенеративной характеристики (ОРХ), выполненными в работе [11]. Показатель крутизны нарастания тока импульса запуска  $\alpha$  выбирался в диапазоне значений  $10^6 - 10^8$ . Пусковое значение тока  $I_s$  устанавливалось на  $0.05 - 0.1 \text{mA}$  больше значения граничного тока  $I_b$ . На рис. 5 представлен результат компьютерного моделирования воздействия УК на развитие автоколебаний в СПП в виде зависимости напряжения на контуре от величины начального значения затухания нерегенерированного контура  $d_0$  при пусковом  $I_s = 3 \text{mA}$  и граничном  $I_b = 2.9 \text{mA}$  токах.

Анализ показывает, что в момент времени  $t = 0$  амплитуды УК в обоих случаях одинаковы. При начальном затухании контура  $d_0 = 0.03$  УК не спадают до пренебрежимо малых значений флуктуационных колебаний в момент достижения током запуска граничного тока, а переходят в инкрементной области в автоколебания СПП. При большем начальном затухании контура  $d_0 = 0.09$  амплитуда УК снижается значительно быстрее. При некотором достаточном интервале времени УК снижают-

ся до уровня флуктуационных колебаний на момент достижения током запуска граничного значения  $I_s = I_b$ . В этом случае УК не определяют ни начальную величину автоколебаний, ни их фазу, т. е. не оказывают существенного влияния на реальную чувствительность приемного режима СПП.

Также исследовалась зависимость амплитуды УК от скорости нарастания переднего фронта импульса тока запуска. Значения показателя степени  $\alpha = 4e7$  и  $\alpha = 6e7$  для закона изменения тока эмиттера позволяют снижать скорость нарастания переднего фронта запускающего импульса и уменьшать амплитуду УК. Для двух заданных значений  $\alpha$  рассчитанные уровни УК в контуре СПП существенно отличаются. Интерес представляют результаты моделирования зависимости амплитуды УК в контуре СПП от соотношения

пускового и граничного токов. Расчет УК для одного значения граничного тока, но с разными значениями пусковых токов показывает, что величина превышения пускового тока над граничным существенным образом не влияет на уровень УК. Следует отметить, что здесь четко прослеживается другая, очень важная для выбора параметров запуска СПП, тенденция – с уменьшением значения  $D = I_s - I_b$  происходит увеличение времени интегрирования внешнего входного сигнала за счет медленного роста амплитуды собственных автоколебаний, начиная от флуктуационного уровня. Интервал между значениями пускового и граничного токов  $D = I_s - I_b$  определяет скорость нара-



**Рис. 5.** Зависимость амплитуды УК и автоколебаний контура СПП от собственного затухания  $d_0$  при воздействии импульса пускового тока  
**Fig. 5.** Dependence of amplitude of shock fluctuations and self-oscillations of a contour with from own attenuation of  $d_0$  at influence of an impulse of starting current

стания автоколебаний в инкрементном режиме работы и, следовательно, его уменьшение наиболее существенно влияет на повышение реальной чувствительности СПП. Поэтому при разработке СПП необходимо технически обеспечить возможность точно регулировать превышение пускового тока над граничным значением. Принципиально это можно обеспечить путем стабилизации среднего тока автогенератора СПП.

Анализ расчетов показывает, что:

- начальная амплитуда УК пропорциональна величине и крутизне нарастания пускового тока;
- УК монотонно уменьшаются на декрементном участке работы СПП  $I_s \leq I_b$ ;
- на инкрементном участке скорость нарастания амплитуды автоколебаний существенно зависит от превышения пускового тока граничного значения.

### Исследование флуктуационных колебаний в приемном режиме работы СПП

Важнейшим вопросом теории СПП является определение условий достижения высокой чувствительности устройства к внешним сигналам. Для оценки чувствительности СПП необходимо провести анализ и определить амплитуду суммарных флуктуационных колебаний  $A_{n\Sigma}$  в его контуре в процессе запуска. Основной причиной колебаний  $A_{n\Sigma}$  в основном являются флуктуациями пускового тока СВЧ-транзистора. Флуктуационный ток типа «белого шума» возбуждает в исследуемой колебательной системе квазигармонические колебания, которые в упрощенном варианте могут быть заменены гармоническим током с амплитудой равной эффективной амплитуде флуктуационного тока. При таком подходе в правой части уравнения (2) необходимо записать выражение для производной эффективного значения флуктуационного тока:

$$\frac{d^2U}{dt^2} + 2\delta(t)\frac{dU}{dt} + \omega^2U = \frac{1}{C_c} \frac{dI_{n\Sigma}}{dt}, \quad (12)$$

где  $I_{n\Sigma}$  – флуктуационный пусковой ток.

Амплитуда флуктуационного квазигармонического тока зависит от текущей полосы пропускания, тепловых и дробовых колебаний в контуре СВЧ АГ.

$$i_{n\Sigma} = \Delta f \sqrt{(4kTG_\Sigma + 2q[(I_e + I_{k0} + I_e\alpha_0(1 - \alpha_0)])}. \quad (13)$$

Поскольку  $\Delta f = f_0 d(t)$ , а

$$d(t) = \frac{G_\Sigma}{\omega C_c} \psi(t),$$

зависимость полосы пропускания от времени для входного тока, формируемого по закону  $I_s(1 - e^{-\alpha t})$  можно записать в виде соотношения связывающего значения пускового и граничного токов автогенератора

$$\Delta f = \frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \frac{I_s(1 - e^{-\alpha t})}{I_b} - 1 \right|. \quad (14)$$

Окончательное выражение для эффективной амплитуды флуктуационного тока принимает вид:

$$i_{n\Sigma} = 2 f_0 \frac{G_\Sigma}{\omega C_c} \left[ 1 - \left( \frac{1}{I_b} \right) I_s (1 - e^{-\alpha t}) \right] \sqrt{q I_b (1 - e^{-\alpha t})}. \quad (15)$$

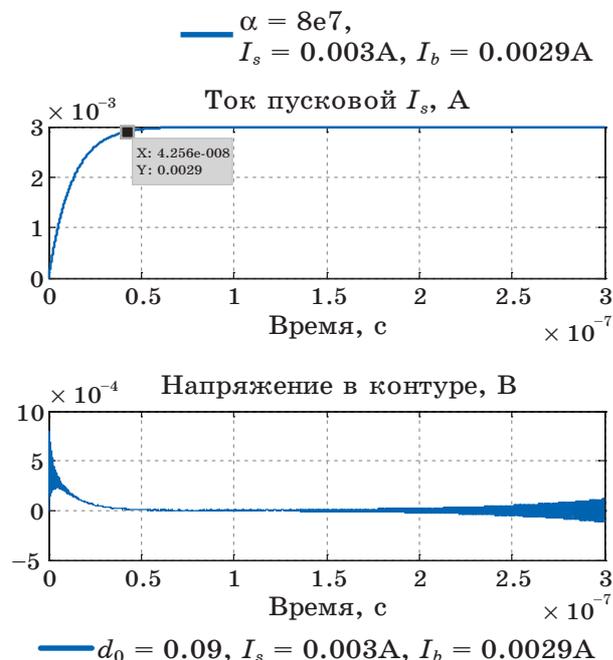
В процессе компьютерного моделирования использовались дополнительные соотношения для расчета эффективного среднеквадратического значения флуктуационного тока в режиме запуска СПП:

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{\Delta f} \sqrt{4kTG_\Sigma + 4qI_e};$$

$$i_{n\Sigma} = 2 \sqrt{\frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \left( \frac{1}{I_b} \right) I_s (1 - e^{-\alpha t}) - 1 \right|} \sqrt{kTG_\Sigma + qI_s(1 - e^{-\alpha t})}. \quad (16)$$

На рис. 6. приведены результаты компьютерного расчета процесса развития флуктуационных колебаний в контуре СВЧ АГ на этапе его запуска. Для заданных параметров пускового тока определена начальная амплитуда УК, их спад на декрементном участке, переход в режим автоколебаний.

Для наглядной оценки суммарных флуктуаций тока  $i_{n\Sigma}$  в приемном режиме работы СПП необходимо учитывать действие флуктуаций начальных условий, связанных с граничным током  $-i_{nb}$ , и флуктуаций вынужденных колебаний, связанных



**Рис. 6.** Процесс развития флуктуационных колебаний в контуре СВЧ-автогенератора

**Fig.6.** Development of fluctuation fluctuations in a microwave oscillator contour

с пусковым током  $-i_{ns}$ . Таким образом, суммарный флуктуационный ток, действующий в течение приемного интервала, будет определяться выражением

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2}. \quad (17)$$

Эффективную амплитуду напряжения флуктуационных колебаний, которая определяет чувствительность СПП, можно рассчитать по формуле

$$A_{n\Sigma} = \rho \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2}, \quad (18)$$

где

$$\rho = \frac{1}{\omega C_c} -$$

характеристическое сопротивление контура СПП;  $\omega$  – резонансная угловая частота контура.

Оценка эффективной амплитуды флуктуационных колебаний для рабочей частоты СПП дает следующие значения. Для транзистора BFG-235A, использованного в качестве активного прибора в СПП, пусковой ток составляет  $I_s = 10\text{mA}$ . На рабочей частоте  $f_0 = 1680\text{ МГц}$ , полоса пропускания имеет значение порядка  $\Delta f = 20\text{ МГц}$ . Суммарный флуктуационный ток в режиме запуска СПП имеет величину

$$i_{n\Sigma} = \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2} \approx 5.2e-7\text{A}.$$

Соответственно эффективная амплитуда напряжения порожденного флуктуационным током при характеристическом сопротивлении колебательного контура СПП порядка 20 Ом будет составлять

$$A_{n\Sigma} = \rho \sqrt{i_{nb}^2 + i_{ns}^2} = 20 \cdot 5.2e-7 = 1e-5\text{В. или } 10\text{ мкВ.}$$

Из анализа выражений (16) – (18) следует вывод, что для повышения чувствительности СПП необходимо обеспечивать режимы запуска СВЧ-автогенератора с минимальными величинами граничного  $I_b$  и пускового  $I_s$  токов.

### Оценка полосы пропускания при нулевом значении затухания контура СВЧ АГ

Для оценки предельной чувствительности СПП необходимо определить минимальную полосу пропускания при нулевом значении затухания контура СВЧ АГ. На рис. 4 приведена статическая регенеративная характеристика (СРХ) транзисторного СВЧ-автогенератора – зависимость фактора регенерации от тока эмиттера, которая дает возможность оценить влияние флуктуаций пускового тока автогенератора на флуктуации фактора ре-

генерации [16–18]. Это принципиально позволяет определить эффективную полосу пропускания контура СПП, в том числе при нулевом среднем значении затухания. Далее принимается допущение, что случайные изменения физических параметров СВЧ-транзистора на фактор регенерации влияют слабо и не рассматриваются. Учитывая практически незначительное превышение пускового тока  $I_s$  относительно граничного  $I_b$  ( $I_s \rightarrow I_b$ ), для расчетов используется линейное приближение выражения для фактора регенерации (7).

На рис. 5 изображена плотность распределения флуктуационной составляющей пускового тока  $P(I_e)$ , которая практически имеет нормальный закон распределения. Учитывая линейный характер зависимости  $\psi(I_e)$  для малых отклонений пускового тока, можно утверждать, что плотность распределения фактора регенерации также будет подчиняться нормальному распределению. Поэтому среднеквадратичное значение флуктуаций фактора регенерации можно оценить с помощью соотношения:

$$\sigma_\psi = \left[ \frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} i_{n\Sigma}. \quad (19)$$

Соответственно минимальная эффективная полоса пропускания колебательного контура  $\Delta f_n$  на границе самовозбуждения при  $I_b = I_e$  может быть определена с помощью выражения:

$$\sigma_f = f_0 \left[ \frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} i_{n\Sigma}. \quad (20)$$

Таким образом, минимальное затухание регенерированного контура СПП в течение приемного интервала определяется эффективным значением флуктуаций пускового тока из-за естественных и технических шумов. Соответственно минимальная полоса пропускания контура СПП определяется эффективным значением флуктуаций затухания контура СПП. Например, в указанном диапазоне СВЧ минимальная полоса приема СПП для сделанных выше оценок флуктуационного тока при реальном значении

$$\left[ \frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} \approx 100$$

составляет:

$$2\sigma_f = \Delta f_b = f_0 \left[ \frac{d\psi}{dI_e} \right]_{(I_e=I_b)} i_{n\Sigma} \approx 10^5, [Hz]. \quad (21)$$

При экспериментальных исследованиях получить такую полосу пропускания в диапазоне частот  $1680 \pm 10$  МГц оказалось

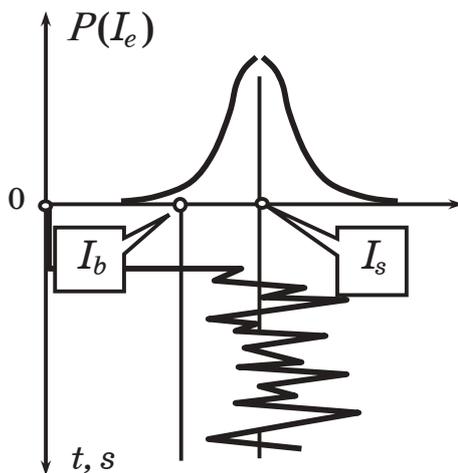


Рис. 7. Плотность распределения пускового тока автогенератора

Fig.7. Distribution density of starting current of the oscillator

возможным при достижении времени задержки переднего фронта радиоимпульсов СПП около 3–6 мкс. При этом разница пускового и граничного токов в экспериментальном макете СПП составляла 50–75 мкА. Предельная чувствительность СПП составляет 125–130 дБ/Вт. Значение пускового тока СВЧ-автогенератора составляет 5–8 мА. При этом величина тока эмиттера транзистора BFG-235A в стационарном (передающем) режиме СВЧ АГ находится в пределах 160–200 мА, а выходная импульсная мощность составляет 1–1,5 Вт.

### Оценка суммарного воздействия ударных и флуктуационных колебаний на параметры СПП

Далее представляется необходимым рассмотреть развитие колебательного процесса в СПП при суммарном воздействии ударных и флуктуационных колебаний в контуре. Для упрощения расчетов флуктуационные колебания моделируются эквивалентным гармоническим сигналом. Как ранее указывалось, режим работы транзистора на приемном интервале – малосигнальный, регенеративная характеристика может быть представлена линейной зависимостью при небольших значениях тока эмиттера, соизмеримых со значением граничного тока. Следовательно, допустимо суммировать воздействие токов ударных и флуктуационных колебаний. Уравнение СПП (2) для данных условий запуска можно записать в виде:

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2\delta(t) \frac{dU_c}{dt} + \omega^2 U_c = \frac{1}{C_c} \frac{d(I_e(t) + I_{n\Sigma})}{dt}. \quad (22)$$

Декремент затухания  $\delta(t)$  меняется во времени по закону изменения линеаризованного фактора регенерации СПП в диапазоне значений тока запуска от нуля до пускового тока и оценивается соотношением (10). Закон изменения входного пускового тока импульса суперизации соответствует выражению (3). Для учета совместного влияния ударных и флуктуационных колебаний необходимо просуммировать эти токи, продифференцировать выражение (16) и ввести результат (17) в уравнение (16):

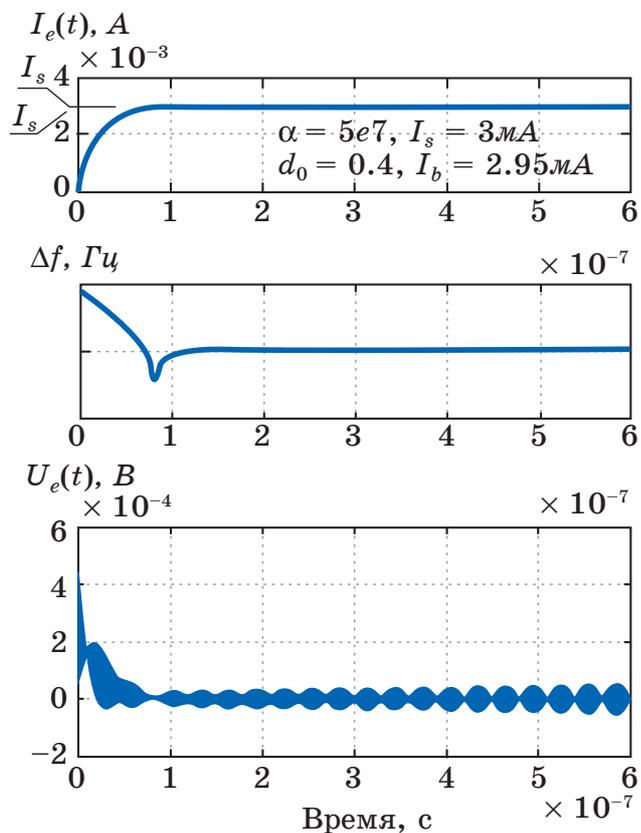
$$\frac{d[I_s(1-e^{-\alpha t}) + 2\sqrt{\frac{G_\Sigma}{2\pi C_c} \left| \left( \frac{1}{I_b} \right) I_s(1-e^{-\alpha t}) - 1 \right|} \times \sqrt{kTG_\Sigma + qI_s(1-e^{-\alpha t})} \sin(2\pi ft)]}{dt} \quad (23)$$

Результаты компьютерного моделирования расчета суммарных колебаний представлены на рис. 8.

На верхнем графике (рис. 8) показан закон изменения тока запуска СВЧ-АГ  $I_e(t)$ , формируемый за счет суперлирующего импульса.

Средний график (рис. 8) представляет процесс изменения полосы пропускания во времени. Полоса пропускания уменьшается от значения  $\Delta f_0$ , соответствующего начальному затуханию нерегенерированного контура  $d_0$  декрементного участка, до минимального значения  $\Delta f_n$ , определяемого уровнем флуктуаций фактора регенерации СПП при достижении током запуска граничного уровня  $I_b$ . После изменения знака затухания от положительного значения к отрицательному, рассчитанное значение полосы пропускания  $\Delta f$  принимает постоянное значение на инкрементном участке работы СВЧ АГ.

При изменении частоты гармонических колебаний, имитирующих флуктуационные колебания, относительно резонансной частоты контура существует возможность проследить воздействие внешнего квазигармоническо-



**Рис. 8.** Пусковой ток  $I_e(t)$ , полоса пропускания  $\Delta f$ , амплитуда автоколебаний в контуре СПП при одновременном учете ударных и внешних квазигармонических колебаний

**Fig. 8.** Starting current of  $I_e(t)$ ,  $\Delta f$  bandwidth, amplitude of self-oscillations in a contour with at simultaneous accounting of shock and external quasiharmonic oscillations

го сигнала и УК в виде биений на переходной процесс развития автоколебаний и оценить их количественные показатели.

В целом выбранная модель СВЧ АГ и компьютерное моделирование предоставляет возможность оценить качественно и количественно параметры колебательного процесса в контуре для различных внешних сигналов, действующих на СВЧ АГ. Проведенный анализ показал, что в конечном счете для обеспечения высокой чувствительности СПП величину пускового тока  $I_n$  и скорость нарастания  $\alpha$  необходимо выбирать таким образом, чтобы к моменту выполнения условия самовозбуждения амплитуда  $A_{sh}$  УК была меньше амплитуды флуктуаций  $A_{n\Sigma}$ :

$$A_{sh} \leq A_{n\Sigma}. \quad (24)$$

Необходимо сделать некоторые замечания относительно спектра излучения СПП который принципиально должен иметь шумовой характер поскольку появление дискретных составляющих в спектре связано с влиянием УК. Результаты экспериментальных исследований позволили выработать критерий оценки уровня УК, который заключается в определении соотношения амплитуд дискретной спектральной составляющей и сплошного спектра. Предложенный метод использовался при измерении предельной чувствительности опытных образцов СПП. Под предельной чувствительностью понимается мощность внешнего непрерывного гармонического сигнала на резонансной частоте СПП, при которой отношение уровней дискретной спектральной составляющей и сплошного спектра равно единице. Результаты измерений показывают, что предельная чувствительность СПП АРЗ на частоте 1680 МГц составляет минус 125–130 дБ при полосе пропускания 2–10 МГц.

## Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать выводы, которые необходимо учитывать при проектировании конструкций СПП:

1. Начальная амплитуда УК пропорциональна величине и крутизне нарастания пускового тока  $I_s$ . Амплитуда УК монотонно уменьшается на декрементном участке работы СПП. Скорость снижения амплитуды УК существенно зависит от собственного затухания контура СПП.

2. На инкрементном участке работы (при превышении пусковым током эмиттера граничного значения  $I_e \geq I_b$ ) скорость нарастания амплитуды автоколебаний СПП определяется суммарной амплитудой ударных и флуктуационных колебаний, а также существенно зависит от величины отрицательного за-

тухания контура, от превышения пускового тока  $I_e$  граничного значения  $I_b$ :  $D = I_e - I_b$ .

3. Для снижения влияния УК на чувствительность СПП величину пускового тока  $I_s$ , скорость нарастания переднего фронта импульса запуска  $I_e(t)$  необходимо выбирать таким образом, чтобы к моменту выполнения условия самовозбуждения  $I_e(t) = I_b$  амплитуда УК  $A_{sh}$  успевала снизиться до значений меньших, чем амплитуда флуктуационных колебаний  $A_{n\Sigma}$ :  $A_{sh} \geq A_{n\Sigma}$ .

4. При экспериментальных исследованиях СПП влияние УК может эффективно оцениваться путем анализа спектра излучения. В качестве критерия оценки уровня УК предлагается использовать отношение амплитуд дискретных и шумовых составляющих спектра излучения СПП.

5. В классических импульсных автогенераторах линейчатый спектр излучения обусловлен влиянием ударных колебаний за счет импульсов пускового тока активного элемента.

В заключение следует отметить, что современные отечественные радиолокационные СР «Вектор-М», МАРЛ разработаны и успешно эксплуатируются на сети Росгидромета РФ. В составе аэрологических радиозондов типа МРЗ-3, МРЗ-3МК, РЗМ-2 применяются транзисторные СПП, конструкции которых постоянно совершенствуются.

### Список литературы

1. Горелик Г. С. Линейные резонансные явления в суперрегенеративном приемнике. *Электросвязь*. 1939;(6):29–49.
2. Гуткин Л. С. Действие помех на суперрегенератор. Ч. 1. *Радиотехника*. 1946;1(9):40–62.
3. Whitehead I. R. *Super-Regenerative Receivers*. Cambridge University Press; 1950.
4. Томсон В. Суперрегенеративные усилители на сантиметровых волнах. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1962;(8):105–112.
5. Белкин М. К. *Сверхрегенеративный радиоприем*. Киев: Техника; 1968.
6. Кравченко Г. И., Марков Ф. В., Гуревич В. Л. и др. Ударные колебания и пороговая чувствительность сверхрегенеративных усилителей. *Радиотехника*. 1973(6):15.
7. Белкин М. К., Кравченко Г. И., Скоробутов Ю. Г., Стрюков Б. А. *Сверхрегенераторы*. М.: Радио и связь; 1983.
8. Ермаков В. И., Кузенков А. Ф., Юрманов В. А. *Системы зондирования атмосферы*. Л.: Гидрометиздат; 1977.
9. Armstrong E. H. Some recent developments of regenerative circuits. *Proc. IRE*. 1922;10:244–260.
10. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*. 2005;52(1):54–70.

11. Chen J. Y., Flynn M. P., Hayes J. P. A 3.6mW 2.4-GHz multi-channel super-regenerative receiver in 130nm CMOS. In: *Proc. IEEE Custom Integrated Circ. Conference, September 2005*, pp. 361–364.
12. Otis B., Chee Y. H., Rabaey J. A 400uW-RX, 1.6mW-TX super-regenerative transceiver for wireless sensor networks. In: *Digest of Technical Papers of the IEEE Int. Solid-State Circ. Conference, San Francisco, February 2005*. Vol. 1, pp. 396–397, 606.
13. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1-GHz super-regenerative transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36:1025–1031.
14. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. J. A 2-V 600- $\mu$ A 1-GHz BiCMOS superregenerative receiver for ISM applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33:2186–2196.
15. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Dehollain C., Joehl N., Declercq M. A 2.4-GHz DSSS superregenerative receiver with a simple delay-locked loop. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2005;15:499–501.
16. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal Solid-state circuits*. 2001;36:440–451.
17. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. *Proc. ISCAS'98*. 1998;4:325–328.
18. Moncunill-Geniz F. X., Dehollain C., Joehl N., Declercq M., Pala-Schonwalder P. A 2.4-GHz Low-Power Superregenerative RF Front-End for High Data Rate Applications. In: *Microwave Conference, 36<sup>th</sup> European, September 2006*, pp. 1537–1540.
19. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A 2V, 600 mA, 1 GHz, BiCMOS super-regenerative receiver. In: *ISSCC Digest of Technical Papers, San Francisco, 1998*, vol. 41, pp. 128–129.
20. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ISCAS 98' Conference, Monterey (USA), 1998*.
21. Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. Modelisation and Simulation of Integrated Super-Regenerative Receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ICECS 99' Conference, Pafos (Cyprus), 5–8 September 1999*, vol. 1, pp. 521–524.
22. Koukab A., Declercq M., Dehollain C. Analysis and Simulation of Substrate Coupling in RF IC. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.
23. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A PLL stabilized Super-Regenerative Transceiver. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.
24. A. Vouilloz, Dehollain C., Declercq M. A Low Power CMOS Super-Regenerative Receiver at 1 GHz. In: *CD-ROM and Proceedings of CICC 2000' Conference, Orlando (USA), 21–24 May 2000*.

25. Joehl N., Favre P., Deval P., Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. A BiCMOS Micropower 1 GHz Super-Regenerative Receiver. In: *Proceeding of URSI ISSSE 98' Conference, Pisa (Italy) 1998*, pp. 74–78.

26. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. A 2V 600 uA 1 GHz BiCMOS Super-Regenerative Receiver for ISM Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33(12):2186–2196.

27. Dehollain C., Declercq M., Joehl N., Favre P., Deval P., Chenes P., Sultan, Bellini G., Besseux P., Valence V., Magnin R. Low Power Wireless Data Transmission Systems at Short Distance for ISM Applications. In: *Proceeding of BSD LPD 2000' Workshop, Rapallo (Italy), 25 and 28 July 2000*, pp. 213–243.

28. Favre P., Joehl N., Deval P., Declercq M., Dehollain C. A Low Power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. In: *Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), Stockholm (Sweden), 19–21 September 2000*, pp. 84–87.

29. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(3):440–451. DOI: 10.1109/4.910483.

30. Bradley W. E. Superregenerative. *Electronics*. 1948;(Sept.):96–98.

31. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(7):1025–1031. DOI: 10.1109/4.933457.

32. Moncunill-Geniz F., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2005;52(1):54–70.

33. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. ISC AS 98. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.

34. Lee D., Mercier P. P. Noise Analysis of Phase-Demodulating Receivers Employing Super-Regenerative Amplification. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;PP(99):1–13. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2686860.

35. Hernandez L., Paton S. A superregenerative receiver for phase and frequency modulated carriers. In: *Proceedings of the 2002 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2002, Scottsdale, Arizona, USA, May 26–29, 2002*. IEEE; 2002, pp. 81–84. DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1010165.

36. Insam E. *Designing Super-Regenerative Receivers*. Electronics World; 2002.

37. Frey D. R. Improved Super-Regenerative Receiver Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2013;60(12):3267–3278. DOI: 10.1109/TCSI.2013.2265971.

38. Frey D. Synchronous filtering. In: *2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems*.

39. Pala-Schonwalder P., Moncunill-Geniz F., Bonet-Dalmau X., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas J. R. A BPSK superregenerative receiver.

Preliminary results. In: *2009 TEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, 24–27 May 2009*. DOI: 10.1109/ISCAS.2009.5118061.

40. Lathi B. P. *Signal processing and linear systems*. New York: Oxford University Press; 2016.

41. Thoppay P. E., Dehollain C., Declercq M. J. Noise analysis in super-regenerative receiver systems. *2008 Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, Istanbul, 22 June–25 April 2008*. DOI: 10.1109/RME.2008.4595757.

42. Feick R., Rojas O. Modeling and simulation of the superregenerative receiver. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 1997;43(2):92–102.

43. Bonet-Dalmau J., Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas R. Frequency Domain Analysis of Super-regenerative Receivers in the Linear and the Logarithmic Modes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2012;59(5):1074–1084. DOI: 10.1109/TCSI.2012.2185296.

44. Иванов В. Э. Исследование регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора. В: Панченко Б. А. (ред.) *Радиотехнические системы локации пространственно-распределенных объектов: Оптимизация и моделирование*. Свердловск: УПИ; 1981. С. 93–99.

45. Иванов В. Э. *Исследование динамической регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора*. Свердловск; 1981.

46. Кудинов С. И., Иванов В. Э. Исследование обобщенной регенеративной характеристики транзисторного СВЧ-автогенератора. В: *СВЯЗЬПРОМ 2006: труды межд. науч.-практ. конф. на III Евро-Азиатского форуме «СВЯЗЬПРОМЭКСПО 2006», Екатеринбург, 3–5 мая 2006*. Екатеринбург: Компания Реал – Медиа; 2006. С. 106–108.

47. Иванов В. Э. *Исследование механизма вторичной реакции сверхрегенеративного приемопередатчика*. Свердловск; 1979.

48. Иванов В. Э., Кудинов С. И. Некоторые вопросы нелинейной теории сверхрегенеративного приемопередатчика. В: *Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем: труды Третьей всерос. науч.-практ. конф. (с участием стран СНГ)*. Ульяновск; 2001.

49. Иванов В. Э., Фридзон М. Б., Ессяк С. П. *Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств*. Екатеринбург: УрО РАН; 2004.

50. Иванов В. Э., Гусев А. В., Игнатков К. А. и др. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2015;(9):3–49.

51. Иванов В. Э., Кудинов С. И. Исследование влияния флуктуационных и ударных колебаний на чувствительность сверхрегенеративного приемопередатчика. В: *СВЯЗЬ-ПРОМ 2007: труды межд. науч.-практ. конф. на IV Евро-Азиатском форуме «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007», Екатеринбург, 2–4 мая 2007*. Екатеринбург: Компания Реал – Медиа; 2007. С. 78–80.

52. Кудинов С. И., Иванов В. Э. Ударные колебания и чувствительность сверхрегенеративного приемопередатчика. В: *Наука – образова-*

ние – Производство: «Опыт и перспектива развития»: материалы рег. науч.-техн. конф. Нижний Тагил; 2007. С. 171–173.

53. Кудинов С. И., Иванов В. Э. Исследование флуктуаций затухания колебательной системы сверхрегенеративного приемопередатчика в приемном режиме. В: СВЯЗЬ-ПРОМ 2007: труды межд. науч.-практ. конф. на IV Евро-Азиатском форуме «СВЯЗЬ-ПРОМЭКСПО 2007», Екатеринбург, 2–4 мая 2007. Екатеринбург: Компания Реал – Медиа; 2007. С. 91–93.

## References

1. Gorelik G. S. The linear resonant phenomena in the superregenerative receiver. *Elektrosvyaz*. 1939;(6):29–49. (In Russ.)
2. Gutkin L. S. Action of hindrances on a superregenerator. Part 1. *Radiotekhnika*. 1946;1(9):40–62. (In Russ.)
3. Whitehead I. R. *Super-Regenerative Receivers*. Cambridge University Press; 1950.
4. Tomson W. Superregenerative amplifiers on centimetric waves. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1962;(8):105–112. (In Russ.)
5. Belkin M. K. *Superregenerative radio reception*. Kiev: Tekhnika; 1968. (In Russ.)
6. Kravchenko G. I., Markov F. V., Gurevich V. L. et al. Shock fluctuations and threshold sensitivity of superregenerative amplifiers. *Radiotekhnika*. 1973(6):15. (In Russ.)
7. Belkin M. K., Kravchenko G. I., Skorobutov Yu. G., Stryukov B. A. *Superregenerators*. Moscow: Radio i svyaz; 1983. (In Russ.)
8. Ermakov V. I., Kuzenkov A. F., Yurmanov V. A. *Systems of sounding of the atmosphere*. Leningrad: Gidrometizdat; 1977. (In Russ.)
9. Armstrong E. H. Some recent developments of regenerative circuits. *Proc. IRE*. 1922;10:244–260.
10. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*. 2005;52(1):54–70.
11. Chen J. Y., Flynn M. P., Hayes J. P. A 3.6mW 2.4-GHz multi-channel super-regenerative receiver in 130nm CMOS. In: *Proc. IEEE Custom Integrated Circ. Conference, September 2005*, pp. 361–364.
12. Otis B., Chee Y. H., Rabaey J. A 400uW-RX, 1.6mW-TX super-regenerative transceiver for wireless sensor networks. In: *Digest of Technical Papers of the IEEE Int. Solid-State Circ. Conference, San Francisco, February 2005*. Vol. 1, pp. 396–397, 606.
13. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1-GHz super-regenerative transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36:1025–1031.
14. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. J. A 2-V 600- $\mu$ A 1-GHz BiCMOS superregenerative receiver for ISM applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33:2186–2196.
15. Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Dehollain C., Joehl N., Declercq M. A 2.4-GHz DSSS superregenerative receiver with a simple delay-locked loop. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. 2005;15:499–501.

16. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal Solid-state circuits*. 2001;36:440–451.

17. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. *Proc. ISCAS'98*. 1998;4:325–328.

18. Moncunill-Geniz F. X., Dehollain C., Joehl N., Declercq M., Pala-Schonwalder P. A 2.4-GHz Low-Power Superregenerative RF Front-End for High Data Rate Applications. In: *Microwave Conference, 36<sup>th</sup> European, September 2006*, pp. 1537–1540.

19. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A 2V, 600 mA, 1 GHz, BiCMOS super-regenerative receiver. In: *ISSCC Digest of Technical Papers, San Francisco, 1998*, vol. 41, pp. 128–129.

20. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ISCAS 98' Conference, Monterey (USA), 1998*.

21. Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. Modelisation and Simulation of Integrated Super-Regenerative Receivers. In: *CD-ROM and Proceeding of ICECS 99' Conference, Pafos (Cyprus), 5–8 September 1999*, vol. 1, pp. 521–524.

22. Koukab A., Declercq M., Dehollain C. Analysis and Simulation of Substrate Coupling in RF IC. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.

23. Favre P., Joehl N., Declercq M., Dehollain C., Deval P. A PLL stabilized Super-Regenerative Transceiver. In: *Proceedings of the International Workshop on Low Power RF integrated Circuits, Lausanne (Switzerland), 19–20 October 1999*.

24. Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. A Low Power CMOS Super-Regenerative Receiver at 1 GHz. In: *CD-ROM and Proceedings of CICC 2000' Conference, Orlando (USA), 21–24 May 2000*.

25. Joehl N., Favre P., Deval P., Vouilloz A., Dehollain C., Declercq M. A BiCMOS Micropower 1 GHz Super-Regenerative Receiver. In: *Proceeding of URSI ISSSE 98' Conference, Pisa (Italy) 1998*, pp. 74–78.

26. Favre P., Joehl N., Vouilloz A., Deval P., Dehollain C., Declercq M. A 2V 600  $\mu$ A 1 GHz BiCMOS Super-Regenerative Receiver for ISM Applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 1998;33(12):2186–2196.

27. Dehollain C., Declercq M., Joehl N., Favre P., Deval P., Chenes P., Sultan, Bellini G., Besseux P., Valence V., Magnin R. Low Power Wireless Data Transmission Systems at Short Distance for ISM Applications. In: *Proceeding of BSD LPD 2000' Workshop, Rapallo (Italy), 25 and 28 July 2000*, pp. 213–243.

28. Favre P., Joehl N., Deval P., Declercq M., Dehollain C. A Low Power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. In: *Proceedings of the European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC), Stockholm (Sweden), 19–21 September 2000*, pp. 84–87.

29. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(3):440–451. DOI: 10.1109/4.910483.

30. Bradley W. E. Superregenerative. *Electronics*. 1948;(Sept.):96–98.

31. Joehl N., Dehollain C., Favre P., Deval P., Declercq M. A low-power 1 GHz Super-Regenerative Transceiver with time-shared PLL control. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. 2001;36(7):1025–1031. DOI: 10.1109/4.933457.

32. Moncunill-Geniz F., Pala-Schonwalder P., Mas-Casals O. A generic approach to the theory of superregenerative reception. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2005;52(1):54–70.

33. Vouilloz A., Declercq M., Dehollain C. Selectivity and sensitivity performances of superregenerative receivers. ISC AS 98. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*.

34. Lee D., Mercier P. P. Noise Analysis of Phase-Demodulating Receivers Employing Super-Regenerative Amplification. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2017;PP(99):1–13. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2686860.

35. Hernandez L., Paton S. A superregenerative receiver for phase and frequency modulated carriers. In: *Proceedings of the 2002 International Symposium on Circuits and Systems, ISCAS 2002, Scottsdale, Arizona, USA, May 26–29, 2002*. IEEE; 2002, pp. 81–84. DOI: 10.1109/ISCAS.2002.1010165.

36. Insam E. *Designing Super-Regenerative Receivers*. Electronics World; 2002.

37. Frey D. R. Improved Super-Regenerative Receiver Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2013;60(12):3267–3278. DOI: 10.1109/TCSI.2013.2265971.

38. Frey D. Synchronous filtering. In: *2006 IEEE Transactions on Circuits and Systems*.

39. Pala-Schonwalder P., Moncunill-Geniz F., Bonet-Dalmau X., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas J. R. A BPSK superregenerative receiver. Preliminary results. In: *2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Taipei, 24–27 May 2009*. DOI: 10.1109/ISCAS.2009.5118061.

40. Lathi B. P. *Signal processing and linear systems*. New York: Oxford University Press; 2016.

41. Thoppay P. E., Dehollain C., Declercq M. J. Noise analysis in superregenerative receiver systems. *2008 Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics, Istanbul, 22 June–25 April 2008*. DOI: 10.1109/RME.2008.4595757.

42. Feick R., Rojas O. Modeling and simulation of the superregenerative receiver. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. 1997;43(2):92–102.

43. Bonet-Dalmau J., Moncunill-Geniz F. X., Pala-Schonwalder P., Aguila-Lopez F. D., Giralt-Mas R. Frequency Domain Analysis of Superregenerative Receivers in the Linear and the Logarithmic Modes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*. 2012;59(5):1074–1084. DOI: 10.1109/TCSI.2012.2185296.

44. Ivanov V. E. A research of regenerative characteristic of the transistor microwave oscillator. In: Panchenko B. A. (ed.) *Radio systems for locating spatially distributed objects: Optimization and modeling*. Sverdlovsk: UPI; 1981, pp. 93–99. (In Russ.)

45. Ivanov V. E. *Research of dynamic regenerative characteristics of the transistor microwave oscillator*. Sverdlovsk; 1981. (In Russ.)

46. Kudinov S. I., Ivanov V. E. Investigation of the Generalized Regenerative Characteristics of a Transistor Microwave Oscillator. In: *SVYAZPROM 2006: proceedings of the international scientific-practical conference at the III Euro-Asian Forum “SVYAZPROMEXPO 2006”, Ekaterinburg, 3–5 May 2006*. Ekaterinburg: Kompaniya Real – Media; 2006, pp. 106–108. (In Russ.)

47. Ivanov V. E. *Investigation of the mechanism of the secondary reaction of a superregenerative transceiver*. Sverdlovsk; 1979. (In Russ.)

48. Ivanov V. E., Kudinov S. I. Some questions of the nonlinear theory of a superregenerative transceiver. In: *Modern problems of the creation and operation of radio systems: the works of the Third All-Russian Scientific and Practical Conference (with the participation of the CIS countries)*. Uliyanovsk; 2001. (In Russ.)

49. Ivanov V. E., Fridzon M. B., Essyak S. P. *Radio sounding of the atmosphere. Technical and metrological aspects of the development and application of radiosonde measuring devices*. Ekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 2004. (In Russ.)

50. Ivanov V. E., Gusev A. V., Ignatkov K. A. et al. Current status and development prospects of atmosphere radio sensing systems in Russia. *Journal Achievements of Modern Radioelectronics*. 2015;(9):3–49. (In Russ.)

51. Ivanov V. E., Kudinov S. I. Investigation of the influence of fluctuation and shock oscillations on the sensitivity of a superregenerative transceiver. In: *SVYAZ-PROM 2007: proceedings of the international scientific-practical conference at the IV Euro-Asian Forum “SVYAZ-PROMEXPO 2007”, Ekaterinburg, 2–4 May 2007*. Ekaterinburg: Kompaniya Real – Media; 2007, pp. 78–80. (In Russ.)

52. Kudinov S. I., Ivanov V. E. Shock oscillations and sensitivity of a superregenerative transceiver. In: *Science – Education – Production: “Experience and Prospects for Development”: materials of a regional scientific and technical conference*. Nizhniy Tagil; 2007, pp. 171–173. (In Russ.)

53. Kudinov S. I., Ivanov V. E. Investigation of the attenuation fluctuations of the oscillatory system of a superregenerative transceiver in a receiving mode. In: *SVYAZ-PROM 2007: proceedings of the international scientific-practical conference at the IV Euro-Asian Forum “SVYAZ-PROMEXPO 2007”, Ekaterinburg, 2–4 May 2007*. Ekaterinburg: Kompaniya Real – Media; 2007, pp. 91–93. (In Russ.)

## Информация об авторах

**Иванов Вячеслав Элизбарович**, доктор технических наук, профессор Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Сфера научных интересов – системы радиозондирования атмосферы, системы ближней радиолокации и связи, приемопередающие устройства СВЧ-диапазона; e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

**Кудинов Сергей Иванович**, кандидат технических наук, доцент департамента Радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (г. Екатеринбург). Сфера научных интересов – системы радиозондирования атмосферы, системы ближней радиолокации и связи, приемопередающие устройства СВЧ-диапазона; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

### Information about the authors

**Sergey I. Kudinov** is a candidate of technical Sciences, associate Professor of the Department of radioelectronics and communications of the Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, Yekaterinburg. Sphere of scientific interests: system of radio sounding of the atmosphere, short-range radiolocation system and communication transceiver device of the microwave range; e-mail: s.kudinov@urfu.ru

**Viacheslav E. Ivanov** is a Doctor of Technical Sciences, professor of the Institute of Radioelectronics and Information Technologies of the Ural Federal University named after the first President of Russia BN. Yeltsin, Yekaterinburg. His scientific interests are upper-air sounding systems, near-field radiolocation and communication systems, microwave transceivers; e-mail: v.e.ivanovekt@gmail.com

Поступила / Received: 30.06.2019

Принята в печать / Accepted: 10.07.2019

## Publication Requirements for Articles Submitted to “Ural Radio Engineering Journal”

The journal accepts for publication authors’ original articles in Russian and English which correspond to the subject of the Ural Radio Engineering Journal.

The submitted papers should not be published in other scientific journals in parallel.

All papers are submitted over automated editorial media on the website of the journal (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) or via email ([urejournal@gmail.com](mailto:urejournal@gmail.com)). A paper is considered being submitted if a reply message with confirmation is received.

A paper is submitted in formats readable by MS Word. The final paper length should be between 8 to 30 pages (including references).

The text file of the paper should start with the information about the authors: complete name, affiliation (place of work, study, etc.), postal address for journal delivery, e-mail address, and phone numbers.

The text file of the paper should contain a required number of UDC classification codes, abstract, key words and the text of the article in Russian or English. The style of the paper should be scientific and meet the requirements of anonymization.

### *Paper Title*

The paper title should be informative and concise. Only commonly accepted abbreviations should be used.

### *Abstract*

Abstract functions as an autonomous source of information. It should be informative, intelligent, brief and structured. If the paper is published in Russian the English abstract should be more extensive (and differs from the Russian one).

Abstract may start with the phrases: *This paper focuses on..., This paper aims at explaining..., Our paper is concerned with...* and etc.

Abstract in English represents the main content of the paper and its conclusions. The abstract structure as in the paper is welcomed:

Introduction, Target and Research Questions, Methodology, Results and Conclusion. The results of the research are described accurately and informatively. The conclusion may include recommendations, assessments and proposals from the article.

The text of the abstract should be laconic and concrete, deprived of peripheral issues, extra parenthetical words and general enunciations.

#### ***Keywords***

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

#### ***Mathematical Formulas***

All mathematical formulas in the paper should be unified. MathType, import from MatLab or analogous editable mathematical package are recommended.

#### ***Tables***

All tables should have titles and a legend explaining any included abbreviations.

#### ***Figures***

All figures should be prepared in the raster formats JPEG, TIFF with the resolution not less than 600 dpi. Lowercase letters (a, b и т.д.) are used for the identification of different parts of the figure. Symbols used for marking and heading the figures should be identical with their inscription in the paper.

Files with figures are duplicated in a separate folder. The number of the figure in the paper is the name of the file.

Figures, graphics and etc. in MS Excel should also be sent in Excel files.

#### ***Acknowledgements***

Acknowledgements should be as short as possible. All grants required references should be listed. The full titles of financing organizations should be listed.

#### ***References***

The list of the references should be given at the end of the paper. References are numbered in brackets by order of appearance in the document (e. g. [1; 2]).

References should include only articles quoted in the paper and already published or accepted for publication. Articles published in the Internet should be quoted with Digital Object Identifier (DOI).

References in the paper in Russian are also provided in English. Titles of the resources in Russian are provided transliterated and translated.

### *Author Credentials*

Information about the authors is at the end of the article: full name, academic degree, position, place of work, e-mail, postal address. All is in two languages.

### *Plagiarism*

Plagiarism in any form is a serious violation of the main principles of science and therefore is unacceptable.

Inadmissible:

1. Copying of parts of papers of other authors word for word without putting them between quotation marks in accordance to the rules of scientific citation.

2. Use of particularly unique term taken from science literature without its author's or source's indication.

3. Paraphrasing, abridgment or changing of ideas of other authors without their name indication.

4. Pseudo citation: the material doesn't apply to the source it is taken from.

5. Falsified data — data which is falsified or changed in laboratory or during an experiment (it is not practically a plagiarism though it is obvious academic fraud).

6. Unconfirmed co-authorship or co-operation: the contribution of every author or co-author should be absolutely defined.

7. Self-plagiarism/republication: presentation of one and the same or similar paper for two or more submissions concurrently.

Editorial board reserves the right to return a paper to the author if the paper doesn't meet the requirements. No explanation is given. The information about the reviewers can't be disclosed to the authors or the third person party.

## Требования к статьям, публикуемым в журнале Ural Radio Engineering Journal

Журнал принимает к публикации оригинальные авторские статьи на русском и английском языке, соответствующие тематике. Присланные на рассмотрение и рецензирование статьи не должны одновременно печататься в другом научном журнале.

Все статьи принимаются через автоматизированную редакционную среду на сайте журнала (<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>) или по электронной почте ([urj@urfu.ru](mailto:urj@urfu.ru)). Статья считается принятой в случае получения ответного сообщения/письма с подтверждением.

Статья принимается в форматах, читаемых MS Word. Объем статьи должен составлять от 0.5 до 1.5 авт. л.

Текстовый файл статьи следует начинать с информации об авторах: имена, аффилиация (место работы, учебы и др.), почтовый адрес для пересылки журнала, адрес электронной почты, номера контактных телефонов для связи.

В текстовом файле должны быть приведены: необходимое количество кодов классификации УДК, аннотация, ключевые слова и непосредственно текст статьи — **на русском или английском языках**. Изложение текста в статье должно отвечать научной стилистике и требованиям анонимизации.

### **Заглавие статьи**

Заглавие научной статьи должно быть информативным и кратким. Можно использовать только общепринятые сокращения.

### **Аннотация**

Аннотация призвана выполнять функцию независимого от статьи источника информации, она должна быть информативной, содержательной, компактной и структурированной. В случае публикации статьи на русском языке английский вариант аннотации должен быть более развернутым (он может отличаться от русского). Аннотация может начинаться со слов: „This paper focuses on...“, „This paper aims at explaining...“, „Our paper is concerned with...“ и т. п.

Аннотация на английском языке должна отражать основное содержание статьи и ее выводы. Приветствуется построение аннотации, повторяющее структуру статьи, включая введение, цели и задачи, методологию исследования, результаты, заключение. Результаты работы описываются предельно точно и ин-

формативно. Выводы могут сопровождаться рекомендациями, оценками, предложениями, приведенными в статье.

Текст аннотации должен быть лаконичен и конкретен, свободен от второстепенной информации, лишних вводных слов, общих формулировок.

#### ***Ключевые слова***

От 3 до 8 слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

#### ***Математические формулы***

Все математические формулы в тексте должны быть набраны единообразно. Рекомендуется использовать MathType, импорт из MatLab или аналогичных математических пакетов с возможностью редактирования.

#### ***Таблицы***

Все таблицы должны иметь заглавие и легенду, объясняющую любые упомянутые в них сокращения.

#### ***Рисунки***

Все иллюстрации должны быть подготовлены в растровом формате JPEG, TIFF, разрешение не менее 600 dpi. Для идентификации частей иллюстрации следует использовать строчные буквы (*a*, *b* и т. д.). Начертание символов, используемых для обозначений на рисунках и в подписях к ним, должно совпадать с их написанием в тексте статьи.

Файлы с рисунками дублируются в отдельной папке. В названиях файлов должны быть указаны номера иллюстраций в текстестатьи.

Иллюстрации, графики и пр., выполненные в MS Excel, необходимо дополнительно выслать в виде файла Excel.

#### ***Благодарности***

Благодарности должны быть как можно более краткими. Следует указать все гранты, в правилах которых требуется упоминание. Названия финансирующих организаций нужно писать целиком.

#### ***Список литературы***

В тексте и в сносках ссылки на источники должны приводиться в [квадратных скобках], нумерация сквозная. Описание всех ссылок дается в списке литературы в конце статьи.

Список литературы должен включать только те работы, которые цитируются в тексте и которые были опубликованы или

приняты к публикации. Статьи, опубликованные в интернете и не прошедшие в печать, должны цитироваться с использованием цифрового идентификатора объекта (Digital Object Identifier (DOI)). При наличии DOI также может быть добавлен и к опубликованным материалам из списка литературы.

Для статьи на русском языке список литературы приводится также и на английском, при этом названия русскоязычных источников представляются как в транслитерации, так и в переводе.

### **Информация об авторах**

В конце статьи приводится информация об авторах: ФИО, научная степень, должность, место работы, e-mail, почтовый адрес — также на двух языках.

### **Плагиат**

Плагиат в любой форме представляет собой серьезное нарушение одного из самых основных принципов науки и не может быть приемлем.

Недопустимы:

1. Копирование слово в слово частей чужой работы без заключения скопированного отрывка в кавычки и указания источника в соответствии с правилами научного цитирования.
2. Использование особо уникального термина или понятия, найденного при чтении литературы, без указания автора или источника.
3. Перефразирование или сокращенная, измененная формулировка чужой идеи без указания того, чей труд был взят за основу.
4. Ложное цитирование: материал не должен быть отнесен к источнику, из которого он не был получен.
5. Ложные данные — данные, которые были сфабрикованы или изменены в лаборатории или в процессе эксперимента (хотя и не являются буквально плагиатом, тем не менее представляют собой явное академическое мошенничество).
6. Неподтвержденное соавторство или сотрудничество: вклад каждого автора или соавтора должен быть совершенно определенным.
7. Самоплагиат/вторичная публикация: представление одной и той же или похожей до степени сродства статьи для двух или более публикаций одновременно.

Редакция оставляет за собой право на возвращение авторам любой рукописи, которая, по их мнению, не подходит для публикации, без объяснения причин. Ни при каких обстоятельствах личность рецензентов и референтов по отдельным статьям не может быть раскрыта авторам или третьей стороне.

## Publication Ethics

### General

The editorial board of the journal “Ural Radio Engineering Journal” honors the ethical criteria established for international scholarly publications, like integrity, confidentiality, transparency, conflict of interests and other aspects. We are guided by recommendations of the Committee on Publication Ethics. Being a member of Association of Science Editors and Publishers (ASEP), we adhere to the basic ethical principles manifested in the ASEP Declaration.

- The editorial board grants that all materials submitted for publication will be peer reviewed and accepted based on the principles of editorial independence and unbiased judgment.
- The editorial board is responsible for the quality of published scientific papers and supports the initiatives aimed at prevention of misconduct or unethical actions on the part of the authors or reviewers.
- Ethical rules are accepted as a must for all parties of the scholar publications: authors, reviewers, editorial board members, as well as persons and entities interested in the information disseminated by the Journal.
- Materials submitted to the editorial board are not returned to the authors. The authors will receive no remuneration (royalties) for the published materials. All scientific papers are published on free of charge basis.
- The editorial board adheres to the COPE ethical criteria, such as:
  - impartiality;
  - observance of scientific ethics when reviewing the papers, encouragement of scholarly discussions between the authors and reviewers;
  - assistance to protection of intellectual property and copyright;
  - papers will be rejected in case of plagiarism when another’s publications, words, or ideas are used without attribution to the original source, which is to be identified by the plagiarism detection software Antiplagiat;

- confidentiality (non-disclosure of the authors' and the reviewers' personal information and other information obtained within the professional interaction);
- making editorial correction in papers by agreement with authors.

### **Responsibilities and ethics of editors**

The editorial board should:

- strive to meet the needs of readers and authors;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- take appropriate measures to maintain a high quality of the material published;
- preclude commercial needs from compromising intellectual standards;
- always be willing to publish corrections, clarifications, retractions and apologies, if required.

### **Author's responsibilities and ethics**

The author shall cooperate with the editorial board throughout the publication process by introducing appropriate corrections, if required. The author is fully responsible for any plagiarisms in the text, illustrations or other materials.

The manuscripts submitted to the Journal's editorial staff should comply with the research paper manuscript formatting rules stated on the Journal web site.

The author is not entitled to submit the same paper for several scientific publications. The authors are obliged to observe the following ethical principles:

- compliance of the materials with the ethics and legal standards including copyright protection laws (in particular, the materials protected by the copyright including tables, digits or long quotations can be reproduced only by the owner's permission);
- research originality and scientific novelty;
- researchers should use best endeavors to describe the work performance methodology clear and definitely in such way that their results can be approved by other researchers, if required;
- impartial discussion of the research importance;
- acknowledgement of other persons' contributions, mandatory references to the deliberations used for the benefit of submitted materials;

- presentation of all major contributors to the research as coauthors;
- informing about significant errors or inaccuracies, if any, found in the publication and interacting with the editorial staff with the purpose of the quickest error correction or removal of the publication;
- no adoptions without proper references to primary sources (plagiarism).

The authors are fully responsible for reliability of the information contained in the submitted materials, for compliance of the materials with the statutory regulations, the moral rules and the ethics standards.

### **Responsibilities and ethics of authors**

According to the Journal policy the editorial board establishes the review procedures for the materials to be published. In the process of reviewing the manuscripts the information about the authors and the reviewers will be held in confidence. Disclosures in breach of the confidence are allowed only in case of suspected deception or falsification on the part of the authors or the reviewers. Reviewers are not entitled to use the reviewed manuscripts for personal purposes or provide these manuscripts to third parties without prior permission of senior editors. They are obliged to return or delete the manuscript copy after presenting the review. The manuscripts rejected by the editorial board are not preserved. The reviewer remarks are not published or made public otherwise without permission of the reviewer, the manuscript author or the editor. Reviewers shall provide fair and unbiased judgment of the manuscript, giving clearly and well-grounded comments to appraise the paper's scientific content only. Personal criticism of the author is unacceptable. The reviewers are obliged to be guided by the following ethical principles:

- to review only those manuscripts which the reviewer has sufficient knowledge to judge;
- to prepare a review in time based on the constructive approach;
- to maintain confidentiality;
- to be impartial preparing a review;
- to inform the editor in case the materials have been published earlier in this or another publication;
- to inform the editor and, if required, to pass the manuscript to another reviewer in case of potential conflict of interests (existing of financial, organizational or other relations between the reviewer and the author);

- the review contents should not be influenced by the manuscript origin, the authors' nationality, sex, religion or political commitments;
- not to use the information obtained within the reviewing process for the personal purposes and in the interests of other persons.

### **Privacy**

E-mail addresses intimated by the authors will be used exclusively for communication with the authors and referees and shall not be disclosed to other persons or entities.

#### Disclosure and conflict of interest policy

Referees deemed to have conflicts of interest in view of personal, financial or organization benefits, as well as competition with any submitting authors (companies, organizations) will not be appointed to review the manuscripts in question.

## Публикационная этика

### Общие положения

- Редакция журнала *Ural Radio Engineering Journal* руководствуется в своей работе международными этическими правилами научных публикаций, в основе которых лежит порядочность, конфиденциальность, надзор за публикациями, разрешение возможных конфликтов интересов и др. В своей деятельности редакция следует рекомендациям Комитета по этике научных публикаций (Committee on Publication Ethics), опирается на принципы публикационной этики, принятые Декларацией АНРИ.
- Редакция гарантирует рассмотрение всех представленных к публикации материалов, соблюдение редакторской независимости и добросовестности, принятие объективных решений.
- Редакция несет ответственность за качество опубликованных научных статей и поддерживает инициативы, направленные на снижение числа некорректных действий со стороны авторов и рецензентов и нарушений норм этики.
- Этическим правилам журнала должны следовать все участники процесса публикации результатов научных исследований: авторы, рецензенты, члены редакционной коллегии, сотрудники редакции, а также лица и организации, заинтересованные в информации, представляемой журналом.
- Материалы, направляемые в редакцию журнала, авторам не возвращаются. Вознаграждение (гонорар) за опубликованные материалы не выплачивается. Все научные статьи публикуются в журнале на безвозмездной основе.
- Редакция журнала руководствуется такими этическими принципами COPE, как:
  - беспристрастность;
  - соблюдение научной этики при рецензировании статей, поощрение научной дискуссии между авторами и рецензентами;
  - содействие защите интеллектуальной собственности и авторских прав;

- отклонение рукописи статьи при выявлении плагиата — опубликованных ранее материалов других авторов без ссылки на первоисточники; проверка осуществляется с помощью системы «Антиплагиат»;
- конфиденциальность (неразглашение персональных данных авторов и рецензентов и прочей информации, полученной в ходе профессионального взаимодействия);
- внесение в статью редакционных правок после согласования с авторами.

### **Ответственность и этические принципы сотрудников редакции**

Редакция журнала:

- обеспечивает выполнение запросов читателей и авторов;
- предпринимает необходимые меры для обеспечения высокого качества публикуемых материалов;
- гарантирует свободу выражения мнений всем членам научного сообщества;
- не допускает превалирования коммерческих соображений над интеллектуальными критериями;
- по мере необходимости обеспечивает публикацию поправок, разъяснений, опровержений и извинений.

### **Ответственность и этические принципы авторов**

На протяжении всего процесса публикации автор обязан сотрудничать с редакцией журнала, исправляя статью в случае необходимости.

Автор полностью берет на себя ответственность за возможный плагиат текста, рисунков и других заимствованных материалов.

Рукописи, предоставляемые на рассмотрение в редакцию журнала, должны соответствовать правилам оформления рукописи научной статьи, представленным на сайте журнала.

Автор не имеет права представлять одну статью на публикацию в несколько научных изданий.

Авторам необходимо придерживаться следующих этических принципов:

- соответствие материалов этическим и юридическим нормам, в т. ч. законодательству о защите авторских прав (в частности, материалы, защищенные авторским правом, в т. ч. таблицы, цифры или крупные цитаты, могут воспроизводиться только с разрешения их владельцев);
- оригинальность и научная новизна исследований;

- достоверность полученных результатов;
- четкость в описании методологии выполнения работ, чтобы их результаты могли быть подтверждены при необходимости другими исследователями;
- объективное обсуждение значимости исследований;
- признание вклада других лиц, обязательное наличие библиографических ссылок на использованные работы;
- представление в качестве соавторов всех участников, внесших существенный вклад в исследование;
- информирование об обнаружении ошибок или неточностей в публикации и взаимодействие с редакцией с целью скорейшего исправления ошибок или изъятия публикации;
- отсутствие в статье заимствований без ссылок на первоисточники (плагиата).

Авторы несут всю ответственность за достоверность информации, содержащейся в представляемых материалах, за соответствие материалов нормам законодательства, морали и этики.

### **Ответственность и этические принципы рецензентов**

В соответствии с политикой журнала редакция устанавливает процедуру проведения рецензирования представленных к опубликованию материалов.

При рецензировании рукописей обеспечивается конфиденциальность информации об авторах и о рецензентах. Нарушение конфиденциальности допускается только при подозрении фальсификации со стороны авторов либо рецензентов.

Рецензенты не имеют права использовать полученные рукописи в личных целях или предоставлять их другим лицам без разрешения ответственного члена редколлегии. Замечания рецензентов не публикуются и не обнародуются иным образом без разрешения рецензента, авторов рукописи и редактора.

Рецензенты должны давать честную и объективную оценку рукописи, четко и аргументированно формулировать свои замечания, оценивая исключительно научное содержание статьи. Неприемлема критика личности автора.

Рецензент обязан руководствоваться следующими этическими принципами:

- осуществлять рецензирование только тех рукописей, для оценки которых он обладает достаточными знаниями;
- готовить рецензию своевременно на основе конструктивного подхода;

- соблюдать конфиденциальность;
- при составлении рецензии быть объективным;
- предупредить редактора о материалах, опубликованных ранее в данном или другом издании, при их наличии;
- предупредить редактора и, если необходимо, передать статью другому рецензенту в случае потенциального конфликта интересов (финансовых, организационных или других отношений между рецензентом и автором);
- не использовать информацию, полученную при рецензировании, в личных целях или интересах иных лиц.

На содержание рецензии не должно оказывать влияние происхождение рукописи, национальность, пол, религиозные или политические убеждения авторов.

### **Приватность**

Представленные авторами имена и адреса электронной почты используются исключительно в деловых целях (для контакта с авторами или с рецензентами при подготовке статьи к публикации) и не могут быть предоставлены другим лицам и организациям.

### **Политика раскрытия и конфликты интересов**

При наличии конфликтов интересов вследствие личной, финансовой или организационной заинтересованности, а также конкурентных отношений с любыми авторами (компаниями, организациями), представляющими рукопись, рецензенты не участвуют в ее рассмотрении.

## Правила оформления статьи

## Article Submission Guidelines

---

УДК 000.000

### Название статьи

#### И. О. Фамилия автора<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Место работы, город, страна

e-mail

#### Аннотация

Аннотация должна содержать не более 300 слов и представлять основную идею статьи.

#### Ключевые слова

От трех до восьми слов или устоявшихся словосочетаний. Рекомендуется использовать таксономию IEEE.

### Paper Title

#### Author Name<sup>1</sup>

Author Affiliation, City, Country

e-mail address

#### Abstract

The abstract should contain no more than 300 words and represent the main idea of the article.

#### Keywords

3–8 words or established terms. IEEE taxonomy is recommended.

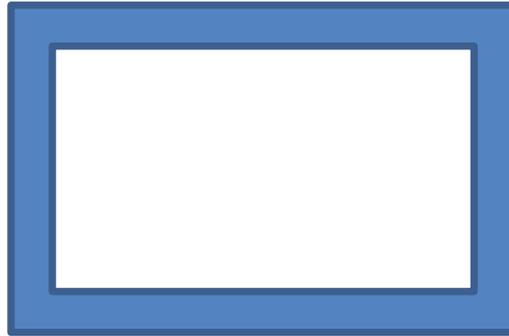
### Введение (Introduction)

Во введении необходимо представить основную идею работы, описать исследования, которые были проведены. И дать понять читателю, о чем пойдет речь в основной части статьи.

Introduction contains the main idea of the article and the description of the completed research. Introduction outlines the concept of the main part of the paper.

### Заголовок 1 (Heading 1)

Рисунки должны иметь подписи на русском и английском языке.



**Рис. 1.** Название рисунка

**Fig. 1.** Example of a figure caption

Figure captions should be below the figures; table heads should appear above the tables. Insert figures and tables after they are cited in the text. Use the abbreviation “Fig. 1”, even at the beginning of a sentence.

### Заголовок 2 (Heading 2)

Название таблицы указывается на русском и английском языках. В конце таблицы необходимо указать источник, в противном случае вы являетесь автором таблицы.

Table heads are in Russian and English. The source of the table is indicated after the table, otherwise you are the author of the table.

**Таблица 1.** Заголовок таблицы

**Table 1.** Table head


Source/источник:

### Заголовок 3 (Heading 3)

Формулы должны быть набраны шрифтами Times New Roman и/или Symbol. Нельзя использовать встроенный редактор формул редактора Word версий 2010 и выше, так как он использует нестандартный математический шрифт. Используйте простой набор математических выражений в строку или редакторы MathType или MS Equation. Для создания многоуровневых формул используйте редакторы формул MathType или MS Equation.

Нумеруйте формулы последовательно. Нумерация выполняется с выравниванием по правому краю.

Названия переменных: латинские буквы наклонные, русские буквы прямые:  $U_{ном}$ . Названия функций и операторы: прямые латинские буквы:  $pi = di/dt$ . Греческие буквы всегда прямые.

Помните, что формулы включаются в текст с использованием знаков препинания, например, следующая за этим текстом формула должна завершиться точкой, так как это будет конец предложения:

$$a + b = \gamma. \quad (1)$$

Удостоверьтесь, что все переменные, используемые в формуле, были определены до или сразу после формулы. Ссылаясь на формулу, пишите «... в (1)...», но не «... в уравнении (1)...», за исключением начала предложения: «Уравнение (1)...».

#### *Несколько распространенных ошибок*

- Не используйте букву «o» вместо «0» (нуля), и наоборот: « $\mu_o$ », но не « $\mu_0$ ».
- Все греческие буквы в формулах должны быть прямые, хотя по умолчанию редакторы формул считают иначе.
- Запятые, точки и т. д. ставятся вплотную к словам, после этих знаков обязательно ставится пробел: «Запятые, точки...», но не «Запятые , точки..»
- Тире ставится одновременным нажатием клавиш ALT + SHIFT + + «-» (на дополнительной цифровой клавиатуре). Не используйте дефис, или короткое тире, или минус вместо тире.

The equations are an exception to the prescribed specifications of this template. You will need to determine whether or not your equation should be typed using either the Times New Roman or the Symbol font (please no other font). To create multileveled

equations, it may be necessary to treat the equation as a graphic and insert it into the text after your paper is styled.

Number equations consecutively. Equation numbers, within parentheses, are to position flush right, as in (1), using a right tab stop.

To make your equations more compact, you may use the solidus (/), the exp function, or appropriate exponents. Italicize Roman symbols for quantities and variables, but not Greek symbols. Use a long dash rather than a hyphen for a minus sign. Punctuate equations with commas or periods when they are part of a sentence, as in

$$\alpha + \beta = \phi. \quad (1)$$

Note that the equation is centered using a center tab stop. Be sure that the symbols in your equation have been defined before or immediately following the equation. Use “(1),” not “Eq. (1)” or “equation (1),” except at the beginning of a sentence: “Equation (1) is ...”

#### *Some Common Mistakes*

- The word “data” is plural, not singular.
- The subscript for the permeability of vacuum  $m_0$ , and other common scientific constants, is zero with subscript formatting, not a lowercase letter “o”.
- In American English, commas, semi-/colons, periods, question and exclamation marks are located within quotation marks only when a complete thought or name is cited, such as a title or full quotation. When quotation marks are used, instead of a bold or italic typeface, to highlight a word or phrase, punctuation should appear outside of the quotation marks. A parenthetical phrase or statement at the end of a sentence is punctuated outside of the closing parenthesis (like this). (A parenthetical sentence is punctuated within the parentheses.)
- A graph within a graph is an “inset,” not an “insert.” The word alternatively is preferred to the word “alternately” (unless you really mean something that alternates).
- Do not use the word “essentially” to mean “approximately” or “effectively”.
- In your paper title, if the words “that uses” can accurately replace the word using, capitalize the “u”; if not, keep using lower-cased.

- Be aware of the different meanings of the homophones “affect” and “effect,” “complement” and “compliment,” “discreet” and “discrete,” “principal” and “principle”.
- Do not confuse “imply” and “infer”.
- The prefix “non” is not a word; it should be joined to the word it modifies, usually without a hyphen.
- There is no period after the “et” in the Latin abbreviation “et al.”.
- The abbreviation “i. e.” means “that is,” and the abbreviation “e. g.” means “for example”.

### **Заключение (Conclusion)**

В заключении должны быть сформулированы основные выводы по работе.

Conclusion contains the main outputs of the research/paper.

### **Благодарности (Acknowledgment)**

Здесь можно расположить благодарности, в том числе указать гранты и другие виды спонсорства, которые способствовали проведению исследований по теме публикации.

Here you can place the gratitude, including grants and other types of sponsorship that contributed to the research on the topic of publication.

The preferred spelling of the word “acknowledgment” in America is without an “e” after the “g.” Avoid the stilted expression “one of us (R. B. G.) thanks ...”. Instead, try “R. B. G. thanks...”. Put sponsor acknowledgments in the unnumbered footnote on the first page.

### **Список литературы/References**

Библиографический список нумеруется. При цитировании номер ссылки включается в текст в квадратных скобках. Помните, что знаки препинания следуют после скобки: [1]. Ссылка делается без пояснений вида «... в статье [3]...», за исключением случая, когда она стоит в начале предложения: «Статья [4] содержит...»

The Reference list is numbered. When quoting, the reference number is included in the text in square brackets. Note that

punctuation marks come before the parentheses [1]. The reference is made without explanation (“... in the article/paper [3]...”), except when it is at the beginning of a sentence: “The article/paper [4] ...”.

### **Информация об авторе**

Фамилия Имя Отчество, научная степень, должность, место работы, e-mail, город, страна.

### **Information about the author**

Full name, academic degree, position, place of work, e-mail, City, Country.

# **URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL**

**2019, Vol. 3, No. 2**

Founded by Ural Federal University  
named after the first President of Russia B. N. Yeltsin  
19, Mira st., 620002, Ekaterinburg, Russia

Journal Registration Certificate  
PI № FS77-69790 as of 18.05.2017

## **Address of Journal**

Office 129a, Mira st.,  
620002, Ekaterinburg, Russia  
Phone: +7 343 375-97-02  
E-mail: [urj@urfu.ru](mailto:urj@urfu.ru)  
Website: <https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Format 70x100 1/16. Circulation 500 cop.

Publisher — Ural Federal University  
Publishing Center  
4, Turgenev st., 620083 Ekaterinburg, Russia  
Phone: +7 343 358-93-06, +7 343 350-58-20, +7 343 350-90-13  
Fax: +7 343 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>

# УРАЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2019, Т. 3, № 2

Учредитель — Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19

---

Ответственный за выпуск Н.В. Папуловская  
Редактор Е.Е. Крамаревская  
Переводчик А.Г. Ковалева  
Верстка Т.А. Лоскутовой  
Дизайн обложки А.А. Кобелев

---

Свидетельство о регистрации  
ПИ № ФС77-69790 от 18.05.2017

#### Адрес редакции:

Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 32, оф. 129а  
Тел.: +7 (343) 375-97-02  
E-mail: [urj@urfu.ru](mailto:urj@urfu.ru)  
<https://journals.urfu.ru/index.php/urj>

Формат 70x100 1/16. Тираж 500 экз. Уч.-изд. л. 7,0.  
Дата выхода в свет 20.07.2019. Заказ 326.

Отпечатано в типографии  
Издательско-полиграфического центра УрФУ  
620083, Екатеринбург, ул. Тургенева, 4  
Тел.: +7 (343) 358-93-06, 350-58-20, 350-90-13  
Факс: +7 (343) 358-93-06  
<http://print.urfu.ru>



**URAL JOURNAL**  
RADIO ENGINEERING