

ISSN 2588-0454
ISSNe 2588-0462

URAL RADIO ENGINEERING JOURNAL



VOL. 4, № 2
2020



Ural Radio Engineering Journal

2020, Vol. 4, 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



Ural Radio Engineering Journal

2020, Т. 4, № 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

2020, Vol. 4, 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

Yuriy B. Gimpilevich, Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

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

Nalik T. Isemenbergenov, 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

Eugenij Ochin, Maritime University of Szczecin, Szczecin, Poland

Kirill M. Zeyde, 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

Ural Radio Engineering Journal

2020, Т. 4, № 2

Главный редактор

Князев Сергей Тихонович, Уральский федеральный университет,
Екатеринбург, Россия

Редакционный совет

Абрамов Игорь Иванович, Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, 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

Клемте 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

Зейде Кирилл Михайлович, 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**2020, Vol. 4, No. 2****CONTENTS**

<i>Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Ignatkov K. A., Shaydurov K. D. The Influence of Concomitant AM on the Formation of FM Autodyne Radars</i>	127
<i>Ochin E. Brief Analysis of GNSS and LNSS Vulnerabilities with the Focus on Spoofing for the Marine Autonomous Surface and Undersea Vehicles</i>	167
<i>Chechetkin V. A., Shabunin S. N. Radio Electronics Development Trends (review of the International Conference)</i>	188
<i>Sosnovsky A. V. InSAR data processing in digital elevation models creating tasks: state-of-art and issues</i>	198
<i>Publication Requirements for Articles Submitted to <i>Ural Radio Engineering Journal</i></i>	234
<i>Publication Ethics</i>	240
<i>Article Submission Guidelines</i>	248

Ural Radio Engineering Journal**2020, Т. 4, № 2****СОДЕРЖАНИЕ**

<i>Носков В. Я., Богатырев Е. В., Игнатков К. А., Шайдуров К. Д. Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией.....</i>	127
<i>Очин Е. Ф. Краткий анализ уязвимостей GNSS и LNSS с акцентом на спуфинг морских надводных и подводных автономных аппаратов (На англ. яз.).....</i>	167
<i>Чечеткин В. А., Шабунин С. Н. Тенденции развития радиоэлектроники (обзор международной конференции). 188</i>	
<i>Сосновский А. В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы.....</i>	198
<i>Требования к статьям, публикуемым в журнале Ural Radio Engineering Journal</i>	237
<i>Публикационная этика</i>	244
<i>Правила оформления статьи</i>	248

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.2.001

УДК 621.373.12; 621.396.962.2

Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией

В. Я. Носков¹ , Е. В. Богатырев² , К. А. Игнатков¹,
К. Д. Шайдуров¹

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

² Сибирский федеральный университет, Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79

 noskov@oko-ek.ru, bogatyrev-sfu@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты исследований особенностей формирования сигналов автодинных систем ближней радиолокации с комбинированной амплитудно-частотной модуляцией. Получены выражения для расчета автодинных сигналов одноконтурного генератора с произвольным законом одновременной модуляции амплитуды и частоты в общем случае произвольного соотношения времени запаздывания отраженного излучения и периода модулирующей функции. Выполнены расчеты характеристик амплитудной селекции и их сечений, а также временных и спектральных диаграмм автодинных сигналов для случая модуляции амплитуды и частоты по гармоническому закону. При этом рассмотрены случаи, когда время запаздывания отраженного излучения значительно меньше продолжительности периода модуляции, а также при их соизмеримых значениях. Экспериментальные исследования выполнены с применением генератора на диоде Ганна 8-миллиметрового диапазона длин волн. Исследованы варианты электрического управления по частоте при помощи варикапа и по цепи смещения диода Ганна. Полученные результаты исследований генераторных модулей позволили сформулировать требования к параметрам и характеристикам создаваемых гибридно-интегральных схем и модулей с частотной модуляцией и наметить пути их дальнейшего совершенствования.

Ключевые слова

автодин, автодинный сигнал, автодинный отклик, радиолокатор ближнего действия, амплитудная модуляция, частотная модуляция, генератор на диоде Ганна

Для цитирования

Носков В. Я., Богатырев Е. В., Игнатков К. А., Шайдуров К. Д. Влияние сопутствующей амплитудной модуляции на формирование сигналов автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):127–166. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.001.

The Influence of Concomitant AM on the Formation of FM Autodyne Radars Signals

V. Ya. Noskov¹ , E. V. Bogatyrev² , K. A. Ignatkov¹,
K. D. Shaydurov¹

¹ Ural Federal University named after the first President of Russia
B. N. Yeltsin, 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia

² Siberian Federal University, 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia
 noskov@oko-ek.ru, bogatyrev-sfu@mail.ru

Abstract

The paper presents the results of studies of the features of the formation of signals from autodyne short-range radar systems with combined amplitude-frequency modulation. Expressions are obtained for calculating the autodyne signals of a single-loop oscillator with the arbitrary law of simultaneous amplitude and frequency modulation in the general case of the arbitrary ratio of the delay time of the reflected radiation and the period of the modulating function. The calculations of the characteristics of the amplitude selection and their cross sections, as well as the time and spectral diagrams of autodyne signals for the case of modulation of the amplitude and frequency according to the harmonic law, have been performed. In this situation, the cases are considered when the delay time of the reflected radiation is much shorter than the duration of the modulation period, as well as when their values are comparable. Experimental studies were carried out using an oscillator based on a Gunn diode in the 8-mm wavelength range. Variants of electrical frequency control using a varicap and a bias circuit of the Gunn diode are investigated. The obtained results of the research of the generator modules made it possible to formulate the requirements for the parameters and characteristics of the created hybrid-integrated circuits and frequency modulation modules and outline the ways for their further improvement.

Keywords

autodyne, autodyne signal, autodyne response, short-range radar, amplitude modulation, frequency modulation, Gunn-diode oscillator

For citation

Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Ignatkov K. A., Shaydurov K. D. The Influence of Concomitant AM on the Formation of FM Autodyne Radars Signals. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):127–166. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.001.

Статья посвящена светлой памяти профессора Сергея Михайловича Смольского, внесшего основополагающий вклад в развитие теории и техники автодинных систем ближней радиолокации при непрерывном излучении радиоволн с частотной модуляцией

1. Введение

При решении задач дистанционного контроля параметров движения на транспорте в системах безопасности, робототехнике и научных исследованиях широкое применение находят системы ближней радиолокации (СБРЛ) [1–5]. Они используются также в качестве бесконтактных радиоволновых датчиков для определения параметров материалов и технологических процессов, вибраций и перемещений в промышленности, для оперативной и бесконтактной диагностики работы турбоагрегатов, а также характеристик жизнедеятельности при медицинских и физиологических исследованиях и многое другое [6–11].

По принципу построения приемопередающего устройства СБРЛ делятся на гомодинные и автодинные [2; 12]. В первом типе систем обычно используются отдельные передатчик зондирующего излучения и приемник отраженного от цели радиосигнала. В СБРЛ автодинного типа функции передатчика и приемника одновременно совмещают в себе единственный каскад – автодин (АД), который обычно выполняется на основе автогенератора. Совмещение этих функций обеспечивает конструктивную простоту, компактность и относительно низкую стоимость СБРЛ. Достоинствами этих устройств являются также высокая чувствительность преобразования первичных данных зондирования в выходной информационный сигнал. В настоящее время автодинные, в том числе генераторно-излучающие модули с различной топологией и исполнением, выпускаются в виде монолитных и гибридно-интегральных схем [13; 14].

Принцип действия АД основан на сложном нелинейном процессе в генераторах, который принято называть автодинным эффектом. Этот эффект проявляется в изменениях параметров колебаний автогенератора под воздействием отраженного от цели излучения. Он наблюдается во всех типах генераторов как непрерывного излучения, так и с различными видами модуляции и во всем диапазоне как радио, так и оптических частот [15]. Изменениям подвергаются не только высокочастотные параметры колебаний (амплитуда, частота, фаза и выходная мощность), но и постоянные токи и напряжения в схеме генератора [16]. Регистрация этих изменений в виде автодинных сигналов и их обработка обеспечивают возможность практически безы-

нерционного получения необходимой информации о кинематических, внешних и внутренних характеристиках цели, а также среды распространения электромагнитного излучения и параметрах антенных систем.

При анализе АД раздельное рассмотрение функций передатчика и приемника невозможно, поскольку собственно автодинный генератор и цель образуют единую автоколебательную систему, в которой расстояние между ними, в общем случае переменное, является одним из параметров. По указанным признакам АД относятся к классу автопараметрических систем с запаздывающей обратной связью [17; 18]. Успешное решение задач анализа этих систем лежит в плоскости методов теории нелинейных колебаний.

Для расширения функциональных возможностей и улучшения технических параметров в автодинных СБРЛ используются различные виды модуляции излучения: амплитудная, частотная, импульсная и фазовая. Среди них наибольшее распространение получила частотная модуляция (ЧМ) [19–25]. Применение ЧМ и соответствующая обработка сигналов обеспечивают повышение надежности работы СБРЛ в сложных метеоусловиях, селекцию на заданных расстояниях цели на фоне отражений от пассивных помех, подстилающей поверхности и других. Анализу особенностей формирования сигналов АД с FM посвящено большое число публикаций, в которых для описания из работы используются различные математические модели автодинного генератора и представления функций воздействия отраженного от цели излучения.

При этом необходимо отметить, что основополагающий вклад в развитие теории и техники автодинных СБРЛ с ЧМ был привнесен доктором технических наук, профессором Сергеем Михайловичем Смольским [19; 22].

Сергей Михайлович Смольский поступил в Московский энергетический институт (МЭИ) на радиотехнический факультет в 1964 году и с отличием окончил его в 1970 году по специальности радиофизика. Будучи студентом, работал младшим научным сотрудником и активно участвовал в научной работе кафедры радиопредающих устройств. Одна из его работ, выполненная на 4-м курсе, была награждена золотой медалью Всесоюзного конкурса лучших студенческих работ.



Профессор Сергей
Михайлович Смольский
(02.01.1946 – 29.04.2020).

Professor Sergei
Mikhailovich Smolskiy
(02 January, 1946 –
29 April, 2020).

После окончания института Сергей Смольский сразу поступил в аспирантуру МЭИ, в которой за отличную успеваемость и активную общественную деятельность он получал ленинскую стипендию. Успешно защитив кандидатскую диссертацию в 1974 году, Сергей Михайлович остался работать в МЭИ сначала в должности научного сотрудника, начальника лаборатории, затем начальника научно-исследовательского отдела. В 1980 году был утвержден в ученом звании старшего научного сотрудника, а в 1990-м – ученом звании доцента.

На протяжении 70-х и 80-х годов Сергей Михайлович принимал активное участие в организации и проведении различных всесоюзных студенческих школ-конференций по радиотехнике и электронике, а также популярных в то время всесоюзных школ-совещаний молодых ученых по стабилизации частоты и прецизионной радиотехнике, автоколебательным и автодинным системам. Входил в редакционные коллегии издававшихся в свое время научно-технических сборников различных вузов Москвы, Омска, Воронежа, Рязани, Севастополя и других. Был внештатным рецензентом статей по многим направлениям в научных журналах «Радиотехника», «Электросвязь», «Известия вузов. Радиоэлектроника», «Известия вузов. Радиофизика», участвовал в подготовке заказных научных обзоров и биографических материалов. Надо понимать, что в указанный период Сергей Михайлович являлся исполнителем и научным руководителем многих научно-исследовательских работ, которые выполнялись по договорам с промышленностью, по постановлениям Совета Министров СССР, по плану госбюджетных работ, а также по международным соглашениям.

С 1987 года Сергей Михайлович перешел работать заместителем директора по научной работе, а затем, с 1990-го по 2000 год, – проректором МЭИ по международным связям. Неоднократно выступал с докладами и лекциями в зарубежных университетах Голландии, Мексики, Колумбии, Аргентины, Ирана, Индии, ЮАР. В 1993 году Сергей Михайлович защитил докторскую диссертацию на тему: «Радиолокационные системы ближнего действия на основе управляемых автогенераторов». В своей диссертации он развел и обобщил на случай систем с переменными параметрами известный в теории нелинейных колебаний метод С. И. Евтиянова. Им подготовлено девять аспирантов и два докторанта, успешно защитивших диссертации не только по автодинным системам, но и другим направлениям радиоэлектроники.

В 1995 году Сергей Михайлович был избран заведующим кафедрой радиоприемных устройств МЭИ. После реорганизации ряда кафедр в 2010 году перешел в качестве профессора на новую кафедру, названную «Формирования и обработка радиосигналов», а также стал заместителем директора Института радиотехники и электроники Национального исследовательского университета «МЭИ» по международным вопросам и координации образовательных международных образовательных программ МЭИ.

Сергей Михайлович опубликовал более 300 научных статей, вышедших в том числе и в зарубежных научных изданиях. Переведено и издано с его соавторством около двух десятков монографий и учебных пособий в нашей стране и за рубежом, ряд монографий посвящено СБРЛ с ЧМ. Сергей Михайлович широко известен среди специалистов в области теории нелинейных колебаний, теории автоколебательных систем, систем ближней радиолокации, устройств формирования ра-

диосигналов с прецизионными свойствами, устройств передачи и обработки информации.

За успехи в научной работе Сергей Михайлович неоднократно награждался грамотами, дипломами и премиями. По итогам многолетних научных и практических исследований по заданиям Министерства машиностроения СССР отмечен почетным знаком «Отличник Министерства машиностроения СССР». По результатам научных исследований для ракетно-космической отрасли в 2000 году был награжден почетной медалью имени С. М. Рязанского академии космонавтики. За организацию научного сотрудничества с университетами Республики Польша решением президента Польши в 2000 году Сергей Михайлович награжден орденом Рыцарского креста «За заслуги перед Польшей». В 2003 году приказом министра связи СССР отмечен значком «Почетный радиостроитель». В 2007 году распоряжением президента России присвоено почетное звание «Заслуженный работник высшей школы».

Сергей Михайлович был почетным доктором Университета Сан-Хуан (Аргентина с 1997 года) и Каджеш-Насер-Тузи Университета (Исламская Республика Иран с 1995 года). Был членом Международного института электро- и радиоинженеров (IEEE) по секциям «Образование», «Обработка сигналов», «Теория цепей», действительным членом Международной академии информатизации, Международной академии наук высшей школы, Международной электротехнической академии.

Сергей Михайлович был весьма незаурядной личностью. Ее масштаб проявлялся и в способности выполнять одновременно много различных дел, и в способности предлагать очень крупные проекты, и в готовности брать на себя ответственность за их реализацию. С ним хотелось работать вместе, потому что он сразу располагал к себе, внушал доверие к своей деятельной и одаренной натуре. Вместе с тем С. М. Смольский – человек энциклопедического ума. Общение с Сергеем Михайловичем всегда расширяло кругозор, заставляло посмотреть на проблему с разных сторон. Нельзя не отметить исключительную доброжелательность Сергея Михайловича, его готовность прийти на помощь, поддержать. Сергей Михайлович обладал отличным чувством юмора и быстротой реакции. Он был всегда крайне деликатен в общении, никогда не позволял себе чем-либо обидеть собеседника.

* * *

Тем не менее, несмотря на наличие более чем десятка вышедших только за последние пять лет публикаций по автодинным СБРЛ с ЧМ [26–35], в известной нам литературе влияние сопутствующей амплитудной модуляции (АМ) на формирование сигналов АД с ЧМ не рассматривалось. Обычно в рамках принятых к анализу моделей предполагалось, что сопутствующая процесс ЧМ амплитудная модуляция мала и не оказывает заметного влияния на выходные характеристики СБРЛ [21–25]. Тем не менее очевидно, что знания о свойствах сигналов АД с ЧМ в условиях присутствия АМ в общем случае востребованы для создания перспективных СБРЛ и выполнение соответствующих исследований являются актуальными.

В связи с этим цель настоящей статьи – восполнить указанный пробел, выполнить исследования АД с комбинированной амплитудной и частотной модуляцией (АЧМ). При этом практический интерес представляет разработка математической модели для общего случая, когда период модуляции и время запаздывания отраженного излучения находятся в произвольном соотношении. Далее на основе полученной модели АД рассмотреть особенности формирования сигналов при гармоническом законе модуляции в зависимости от параметров модуляции генератора и расстояния до объекта локации.

2. Математическая модель автодина с АЧМ

Эквивалентная схема АД с ЧМ приведена на рис. 1 [31; 35]. Основные компоненты этой схемы приведены к сечению полной проводимости активного элемента (АЭ). Средняя за период колебаний проводимость АЭ $Y_{\text{АЭ}}$ в общем случае является комплексной и зависящей от текущих значений амплитуды A и частоты ω колебаний: $Y_{\text{АЭ}} = G_{\text{АЭ}} + jB_{\text{АЭ}}$, где $G_{\text{АЭ}} \equiv G_{\text{АЭ}}(A, \omega)$, $B_{\text{АЭ}} \equiv B_{\text{АЭ}}(A, \omega)$ – резистивная и реактивная проводимости АЭ соответственно. Резонатор АД представлен эквивалентным колебательным контуром, который содержит индуктивность $L_{\text{рез}}$, проводимость собственных потерь $G_{\text{рез}}$ и емкость $C_{\text{рез}}$. При этом емкость $C_{\text{рез}}$ и проводимость $G_{\text{рез}}$ представляют собой совокупность емкостей и проводимостей потерь собственно резонатора и варикапа, предназначенного для электронной перестройки частоты генератора.

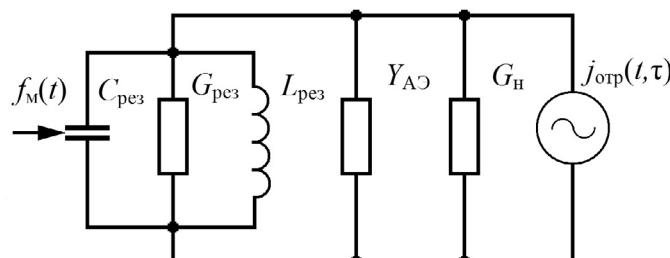


Рис. 1. Эквивалентная схема автодина с ЧМ

Fig. 1. Equivalent circuit of autodyne with FM

Параллельно колебательному контуру подключен также зависимый источник тока $j_{\text{отр}}(t, \tau)$, отображающий воздействие на генератор принятого антенной собственного отраженного от цели излучения, запаздывающего относительно текущего времени t на время $\tau = 2l/c$, где l – расстояние до цели; c – скорость распространения излучения. Проводимость G_{h} является нагрузкой генератора.

Пользуясь законами Кирхгофа, для эквивалентной схемы рис. 1 нами были составлены дифференциальные уравнения для мгновенных значений токов и напряжений. Затем, используя методы медленно меняющихся амплитуд и усреднения в изложении Курокавы [36], были получены укороченные дифференциальные уравнения для амплитуды и фазы колебаний. Далее были найдены уравнения для стационарных значений амплитуды A_0 и частоты ω_0 колебаний автономного генератора. После этого в предположении малого уровня отраженного излучения по отработанной ранее методике [37] получена система линеаризованных дифференциальных уравнений для малых относительных изменений амплитуды $a = (A - A_0) / A_0$ и частоты $\chi = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ колебаний:

$$(Q_n / \omega_{pe3})(da / dt) + \alpha a + \varepsilon \chi = \Gamma(t, \tau) \eta \cos \delta(t, \tau), \quad (1)$$

$$\beta a + Q_n \chi = -\Gamma(t, \tau) \eta \sin \delta(t, \tau), \quad (2)$$

где Q_n , ω_{pe3} – нагруженная добротность и частота резонатора; α , ε , β – безразмерные параметры, определяющие приведенную крутизну инкремента, неизодромность и неизохронность генератора соответственно [37]; $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 [A(t, \tau) / A(t)]$, $\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau)$ – модуль и фаза мгновенного коэффициента отражения, приведенного к нагрузке АД; Γ_0 – коэффициент затухания излучения по амплитуде при его распространении до цели и обратно; $A(t, \tau)$, $\Psi(t, \tau)$ – амплитуды и фазы колебаний АД из предыстории системы $(t - \tau)$; $G = G_{pe3} + G_n$; $\eta = Q_n / Q_{vn}$, Q_{vn} – эффективность и внешняя добротность колебательной системы; $A(t)$, $\Psi(t)$ – амплитуда и фаза колебаний АД в текущий момент времени.

Математическая модель АД в виде системы (1) и (2), в основе которой предполагается амплитудно-фазовое запаздывание отраженного от цели излучения, справедлива также и для случая АД с АЧМ. В этой модели выражение для выходных квазигармонических колебаний, модулированных одновременно по амплитуде и частоте и излучаемых посредством антенны в направлении цели, в общем виде можно записать как:

$$u_{изл}(t) = A(t) \cos \Psi(t) = A_0 [1 + m_{AM} f_m(t)] \cos \left[\omega_0 t + \omega_0 m_{ЧМ} \int_0^t f_m(t) dt \right], \quad (3)$$

где $m_{AM} = \Delta A_{AM} / A_0$, $m_{ЧМ} = \Delta \omega_{ЧМ} / \omega_0$ – коэффициенты АМ и ЧМ колебаний; ΔA_{AM} , $\Delta \omega_{ЧМ}$ – максимальные отклонения амплитуды и частоты осцилляции от их стационарных значений A_0 и ω_0 вследствие модуляции; $f_m(t)$ – нормированная модулирующая функция.

Отраженные от цели и принятые антенной колебания $u_{\text{опт}}(t, \tau)$ запишем в следующем виде:

$$u_{\text{опт}}(t, \tau) = \Gamma_0 A(t, \tau) \cos \Psi(t, \tau) = \\ = \Gamma_0 A_0 [1 + m_{\text{AM}} f_{\text{m}}(t, \tau)] \cos \left[\omega_0(t - \tau) + \omega_0 m_{\text{ЧМ}} \int_{t-\tau}^t f_{\text{m}}(t, \tau) dt + \phi_0 \right], \quad (4)$$

где $f_{\text{m}}(t, \tau)$ – модулирующая функция отраженных колебаний; ϕ_0 – постоянный фазовый сдвиг, обусловленный отражающими свойствами цели.

Решение системы (1), (2) с учетом (3), (4) для малосигнальных автодинных изменений амплитуды $A(t)$ и частоты $\omega(t)$ автоколебаний генератора, когда $\Gamma_0 \ll 1$, в квазистатическом приближении имеет вид:

$$A(t) = A_0 \{1 + m_{\text{AM}} f_{\text{m}}(t) + \Gamma(t, \tau) K_a \cos[\delta(t, \tau) - \psi]\}, \quad (5)$$

$$\omega(t) = \omega_0 \{1 + m_{\text{ЧМ}} f_{\text{m}}(t) - \Gamma(t, \tau) L_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta]\}, \quad (6)$$

где K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты генерации [37]; $\psi = \text{arctg}(\rho)$, $\theta = \text{arctg}(\gamma)$ – углы фазового смещения автодинных изменений; $\rho = \varepsilon / Q_h$, $\gamma = \beta / \alpha$ – коэффициенты неизодромности и неизохронности генератора соответственно.

Второе слагаемое в правой части уравнения (5) повторяет закон модуляции $m_{\text{AM}} f_{\text{m}}(t)$ и определяет уровень сопутствующей, так называемой, «паразитной» АМ (ПАМ) при регистрации автодинного сигнала по изменению амплитуды колебаний. При малом уровне ПАМ влиянием этого слагаемого на формирование полезного сигнала можно пренебречь. Однако в ряде случаев, например при модуляции генератора по изменению напряжения питания, высокий уровень ПАМ может оказывать существенное и нежелательное влияние на формирование автодинного сигнала.

Выполним анализ особенностей формирования сигналов для режима непрерывного АЧМ излучения, описываемые в (5), (6) третьими членами правой части. Для выявления функций запаздывающего воздействия $f_{\text{m}}(t, \tau)$, $A(t, \tau)$ и $\Psi(t, \tau)$ в этих выражениях выполним их разложение в ряды Тейлора по малому параметру τ по сравнению с текущим временем t [38]. В результате получим:

$$f_{\text{m}}(t, \tau) = f_{\text{m}}(t) + \sum_{n=1}^N (-1)^n \frac{\tau^n}{n!} \frac{d^n f_{\text{m}}(t)}{dt^n}, \quad (7)$$

$$\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0 \frac{A(t, \tau)}{A(t)} = \Gamma_0 \left[1 - \frac{m_{\text{AM}}}{1 + a(t, \tau)} M_{\text{AM}}(t) + \frac{a_{\text{m}}}{1 + a(t, \tau)} M_{\text{АД}}(t, \tau) \right], \quad (8)$$

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau) = \omega_0 \tau + p_{\text{ФМ}}(\tau) F_{\text{ЧМ}}(t) - C_{\text{ОС}} F_{\text{АД}}(t, \tau), \quad (9)$$

где n – здесь и далее порядковый номер членов разложений; $M_{\text{AM}}(t)$, $M_{\text{АД}}(t, \tau)$ – множители, обусловленные процессом АМ и автодинными изменениями амплитуды колебаний генератора соответственно:

$$M_{\text{AM}}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^n}{n!} \cdot \frac{d^n f_{\text{M}}(t)}{dt^n}, \quad (10)$$

$$M_{\text{АД}}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} H_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau) - \psi - \Phi_n(\Omega_a \tau)]; \quad (11)$$

$F_{\text{ЧМ}}(t)$, $F_{\text{АД}}(t, \tau)$ – множители, обусловленные процессом ЧМ и автодинными изменениями частоты колебаний генератора соответственно:

$$F_{\text{ЧМ}}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{\tau^{n-1}}{n!} \cdot \frac{d^{n-1} f_{\text{M}}(t)}{dt^{n-1}}, \quad (12)$$

$$F_{\text{АД}}(t, \tau) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta(t, \tau) + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)], \quad (13)$$

$a(t, \tau) = m_{\text{AM}} f_{\text{M}}(t) + a_m \cos[\delta(t, \tau) - \psi]$; $\Omega_a = d[\delta(t, \tau)] / dt$ – мгновенная частота автодинного сигнала; $a_m = \Gamma_0 K_a$ – относительная глубина автодинных изменений амплитуды колебаний; $p_{\text{ФМ}}(\tau) = m_{\text{ЧМ}} \omega_0 \tau$ – индекс фазовой модуляции, обусловленный ЧМ; $C_{\text{ОС}} = \Delta \omega_a \tau$ – параметр внешней обратной связи (ОС) АД; $\Delta \omega_a = \Gamma_0 L_a \omega_0$ – автодинная девиация частоты колебаний; $H_n(\Omega_a \tau)$, $S_n(\Omega_a \tau)$ – коэффициенты и $\Phi_n(\Omega_a \tau)$ – их фазы:

$$H_n(\Omega_a \tau) = \frac{(\Omega_a \tau)^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega_a \tau}{2n} \right)^2}, \quad S_n(\Omega_a \tau) = \frac{(\Omega_a \tau)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{\Omega_a \tau}{2n} \right)^2}, \quad (14)$$

$$\Phi_n(\Omega_a \tau) = \arctg(\Omega_a \tau / 2n). \quad (15)$$

Из выражений (9) и (13) видно, что в отношении $\delta(t, \tau)$ трансцендентное уравнение (9) является попрежнему неявным. Для выявления (9) при условии его гладкости, когда $C_{\text{ОС}} < 1$, находим $\delta(t, \tau)$ методом последовательных приближений. Данное решение в виде фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & \delta_{(0)} - C_{\text{ОС}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(1)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \\ & - C_{\text{ОС}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(2)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau) - \dots \\ & \dots - C_{\text{ОС}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(\Omega_a \tau) \sin[\delta_{(k)} + \theta - \Phi_n(\Omega_a \tau)]] \dots]. \end{aligned} \quad (16)$$

где $\delta_{(0, 1, \dots k)} = \omega_0\tau + p_{\Phi M}(\tau)F_{\text{ЧМ}}(t)$; индексами в круглых скобках около слагаемых δ обозначен порядок приближения.

При анализе обычных АД без модуляции в (8) и (9) нужно положить $m_{\Phi M} = p_{\Phi M} = 0$. Если при этом выполняется сильное неравенство $\Omega_a\tau \ll 1$, что свойственно большинству применений СБРЛ, то из (8), (9) получим $\Gamma(t, \tau) = \Gamma_0$ и $\delta(t, \tau) = \omega\tau$ [39; 40]. Для случая анализа АД с ЧМ в этих выражениях следует приравнять нулю m_{AM} [25], а для анализа АД с АМ необходимо положить $m_{\text{ЧМ}} = 0$ [38; 41]. Таким образом, разработанная математическая модель АД является более общей, чем модели, полученные в предшествующих работах.

Ниже на основе полученной системы уравнений (5), (6) и разложений (7)–(15) с использованием программы «MatchCAD» выполнен численный анализ особенностей поведения АД с АЧМ для гармонического закона модулирующей функции. При выполнении этих вычислений приняты приближения, учитывающие реальные условия функционирования автодинных СБРЛ миллиметрового диапазона.

3. Расчет и анализ автодинных характеристик при гармонической АЧМ

Сигналы АД обычно регистрируются в цепи питания генератора (сигнал автодетектирования) или по изменению амплитуды его колебаний с помощью детекторного диода [16]. В формирование этих сигналов вносят свой вклад изменения амплитуды и фазы $\delta(t, \tau)$, обусловленные процессом модуляции и автодинными изменениями параметров генерации, а также перемещением цели. Ниже рассмотрим случай синусоидальной модуляции частоты при наличии сопутствующей ПАМ. Основными достоинствами этого вида модуляции являются простора реализации и сравнительно низкий уровень высших гармоник сигнала модуляции. В связи с этим выделение слабых сигналов на фоне основных составляющих сигнала выполняется довольно просто. Поэтому гармонический закон $f_m(t) = \sin(\Omega_m t)$ модулирующей функции, как отмечалось выше, широко используется в автодинных системах для решения многих задач ближней радиолокации.

Для нормальной работы СБРЛ с АЧМ частота Ω_m модуляции должна значительно отличаться от частоты Ω_a автодинного сигнала [2, 22]. При таких условиях спектр сигнала и спектральные составляющие, обусловленные процессом АЧМ, не перекрываются, что упрощает задачу частотной селекции полезных составляющих спектра автодинного сигнала. Случай формирования сигнала при выполнении сильного неравенства $\Omega_m \ll \Omega_a$,

когда составляющие полезного сигнала находятся в области выше частоты модуляции, рассмотрен в работе [35]. Здесь рассмотрим случай выполнения обратного неравенства $\Omega_m >> \Omega_a$, когда основные спектральные составляющие полезного сигнала группируются не только в области низких «нулевых» частот, но и в окрестности гармоник частоты Ω_m модуляции [22; 38]. При этом выясним закономерности формирования амплитуды полезного сигнала в зависимости от расстояния до цели при вариации иных параметров СБРЛ с АЧМ.

Данную зависимость принято называть характеристикой амплитудной селекции (ХАС) цели по дальности. Основными уравнениями для анализа этой характеристики в настоящих исследованиях являются выражения (5) и (7) с учетом (8) и разложений в ряды (9)–(15). В этих выражениях реальное соотношение коэффициента АМ m_{AM} и амплитуды a_m автодинного отклика таково, что обычно $m_{AM} >> a_m$ и влиянием автодинных изменений амплитуды колебаний на уровень отраженного излучения можно пренебречь. Поэтому выражение (7) для расчета ХАС можно значительно упростить, исключив из дальнейшего анализа третье слагаемое. Это выражение для относительного уровня автодинного сигнала $a_{\text{отн}}(t, \tau)$ после выполнения его нормировки имеет вид:

$$a_{\text{отн}}(t, \tau) = \frac{a(t, \tau)}{a_m} = \left[1 - \frac{m_{AM} M_{AM}(t)}{1 + m_{AM} \sin(\Omega_m t)} \right] \cos[\delta(t, \tau) - \psi], \quad (17)$$

где

$$M_{AM}(t) = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} M_n(r_{\text{нд}}) \cos[(\Omega_m t) - \Psi_n(r_{\text{нд}})], \quad (18)$$

$M_n(r_{\text{нд}})$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_{\text{нд}})$ – фазовые углы членов разложения (18) в ряд:

$$M_n(r_{\text{нд}}) = \frac{(2\pi r_{\text{нд}})^{2n-1}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{нд}}}{2n} \right)^2}, \quad \Psi_n(r_{\text{нд}}) = \text{arctg} \frac{2\pi r_{\text{нд}}}{2n}, \quad (19)$$

$r_{\text{нд}} = \Omega_m \tau / 2\pi = l / (\Lambda_m / 2)$ – нормированное расстояние до цели; $\Lambda_m = 2\pi c / \Omega_m$ – длина модулирующей волны.

Здесь входящее в (17) выражение для фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ (16) перепишем с учетом нормировки расстояния до цели в виде:

$$\begin{aligned} \delta(t, \tau) = & \delta_{(0)} - C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{\text{нд}}) \sin[\delta_{(1)} + \theta - \Phi_n(r_{\text{нд}}) - \\ & - C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{\text{нд}}) \sin[\delta_{(2)} + \theta - \Phi_n(r_{\text{нд}}) - \dots \\ & - C_{\text{OC}} \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} S_n(r_{\text{нд}}) \sin[\delta_{(k)} + \theta - \Phi_n(r_{\text{нд}})]] \dots], \end{aligned} \quad (20)$$

где $\delta_{(0, 1, 2, \dots, k)} = 2\pi\tau_{\text{нв}} + 2\pi k_{\text{ЧМ}} r_{\text{нр}} F_{\text{ЧМ}}(t)$; $\tau_{\text{нв}} = \omega_0\tau / 2\pi$ – нормированное время; $k_{\text{ЧМ}} = \Delta\omega_{\text{ЧМ}} / \Omega_{\text{м}}$ – индекс ЧМ; $S_n(r_{\text{нр}})$ – коэффициенты и $\Phi_n(r_{\text{нр}})$ – фазовые углы членов разложения (20) в ряд:

$$S_n(r_{\text{нр}}) = \frac{(2\pi r_{\text{нр}} / z)^{2(n-1)}}{(2n-1)!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2nz}\right)^2}, \quad \Phi_n(r_{\text{нр}}) = \arctg \frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2nz}; \quad (21)$$

$z = \Omega_{\text{м}} / \Omega_{\text{а}}$ – соотношение частот модуляции и автодинного сигнала;

$$F_{\text{ЧМ}}(t) = \sin(\Omega_{\text{м}} t) - \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} F_n(r_{\text{нр}}) \cos[(\Omega_{\text{м}} t) - \Theta_n(r_{\text{нр}})], \quad (22)$$

$F_n(r_{\text{нр}})$ – коэффициенты и $\Theta_n(r_{\text{нр}})$ – фазовые углы членов разложения (22):

$$F_n(r_{\text{нр}}) = \frac{(2\pi r_{\text{нр}})^{2n-1}}{2n!} \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2n+1}\right)^2}, \quad \Theta_n(r_{\text{нр}}) = \arctg \frac{2\pi r_{\text{нр}}}{2n+1}. \quad (23)$$

Из анализа (17) с учетом (18)–(23) следует, что ХАС является периодической функцией нормированного расстояния $r_{\text{нр}}$ до цели, определяемым периодом модулирующей функции $f_{\text{м}}(t)$. Поэтому далее ограничимся анализом только ее основной составляющей, заключенной в интервале $0 < r_{\text{нр}} < 1$. Кроме того, для облегчения анализа полагаем, что z представляет собой натуральный ряд чисел, причем $z \gg 1$.

Если условия работы СБРЛ таковы, что необходимо рассматривать ХАС только вблизи антennы (начальный участок ХАС), где выполняется неравенство $r_{\text{нр}} \ll 1$, то выражение (17) упрощается и имеет вид:

$$a_{\text{отн}}(t) = \left[1 - \frac{2\pi r_{\text{нр}} m_{\text{AM}} \cos(\Omega_{\text{м}} t)}{1 + m_{\text{AM}} \sin(\Omega_{\text{м}} t)} \right] \cos[2\pi k_{\text{ЧМ}} r_{\text{нр}} \sin(\Omega_{\text{м}} t)]. \quad (24)$$

Однако с увеличением расстояния до цели, где применение выражения (24) становится неприемлемым, число требуемых для расчета членов рядов в (18)–(23) быстро растет. Это значительно усложняет анализ ХАС. Например, при выполнении неравенства $r_{\text{нр}} \leq 1$, которое означает, что время запаздывания τ отраженного излучения должно составлять величину не более шестой части полупериода модулирующей функции, необходимое число первых членов разложений (18)–(23) должно быть не менее пяти. Для корректного описания ХАС на всем ее интервале $0 < r_{\text{нр}} < 1$, как показали расчеты, требуется значительно увеличить число N членов этого ряда: $N \geq 25$. В таких условиях в общем случае произвольного значения $r_{\text{нр}}$ выяснение особенностей формирования автодинных сигналов аналитическими методами

дами представляется неприемлемым, поэтому далее для достижения поставленной цели воспользуемся численным методом.

На рис. 2 приведены результаты расчетов объемных ХАС как нормированных функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{пп}})$ двух переменных: величины индекса частотной модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ (ось «модуляции») и нормированного на половину длины модулирующей волны расстояния до цели $r_{\text{пп}}$ (ось «расстояния»). Значения функций $J_m(k_{\text{ЧМ}}, r_{\text{пп}})$, отложенные по вертикальной оси, представляют собой разложение в гармонический ряд Фурье функции (17) с учетом (18)–(23) по периоду модуляции $f_m(t)$. На «нулевой» гармонике по этой оси отложены значения J_0 (строка 1). На первой гармонике частоты модуляции эта ось обозначена как J_1 (строка 2), на второй – J_2 (строка 3), третьей – J_3 (строка 4), четвертой – J_4 (строка 5). При этом ХАС, рассчитанные для различных значений коэффициента АМ, когда $m_{\text{AM}} = 0$, $m_{\text{AM}} = 0,2$ и $m_{\text{AM}} = 0,4$, соответственно представлены в столбцах *a*, *b* и *c*.

На рис. 3 и 4 приведены семейства графиков поперечного сечения ХАС по осям расстояния $r_{\text{пп}}$ и модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ соответственно, полученные для различных значений индекса ЧМ $k_{\text{ЧМ}}$, коэффициента АМ m_{AM} и параметра ОС $C_{\text{ОС}}$. Ввиду симметрии ХАС по оси $r_{\text{пп}}$ характеристики $J_m(r_{\text{пп}})$ на рис. 3 показаны для области значений $r_{\text{пп}} \in 0, 0,5$.

Для случая равномерного изменения нормированного времени $\tau_{\text{НВ}}$ на рис. 5 и 6 при величине параметра ОС $C_{\text{ОС}} = 0,5$ и индексе ЧМ $k_{\text{ЧМ}} = 2$ представлены результаты расчета временных $a_{\text{отн}}(\tau_{\text{НВ}})$ и спектральных $a_{\text{отн}}(F_{\text{НЧ}})$ диаграмм автодинного сигнала, полученные для АД с ЧМ ($m_{\text{AM}} = 0$) и АЧМ ($m_{\text{AM}} = 0,2$) соответственно (здесь $F_{\text{НЧ}} = \Omega / \Omega_{\text{м}}$ – нормированная частота). Расчеты диаграмм выполнялись для соотношения частот $z = 10$, углах смещения фаз $\theta = 1$, $\psi = 0,1$ и при различных значениях нормированного расстояния $r_{\text{пп}}$ (см. рис. 5 и 6 под литерами *a*–*d*).

Из характеристик, представленных на рис. 2, видно, что наличие АМ излучения АД вызывает некоторый рост уровня сигнала на нулевой гармонике частоты модуляции в средней части ХАС (см. рис. 2, 1-*b* и 1-*c*, а также кривые 1 на рис. 4). На гармониках модуляции это явление также заметно, если сравнить кривые 2–4 на рис. 4, полученные при отсутствии АМ (рис. 4, *a* и *c*) и ее наличии (рис. 4, *b* и *d*). Этот рост объясняется явлением регенерации сигнала в петле обратной связи «генератор – цель – генератор», когда процесс АМ колебаний и воздействие амплитуды отраженного излучения находятся в фазе. Подобное явление наблюдается, например, в измерителях малых дальностей «рециркуляционного» типа [38; 42–44]. В этих измерителях полученный приемником СБРЛ сигнал от цели на частоте

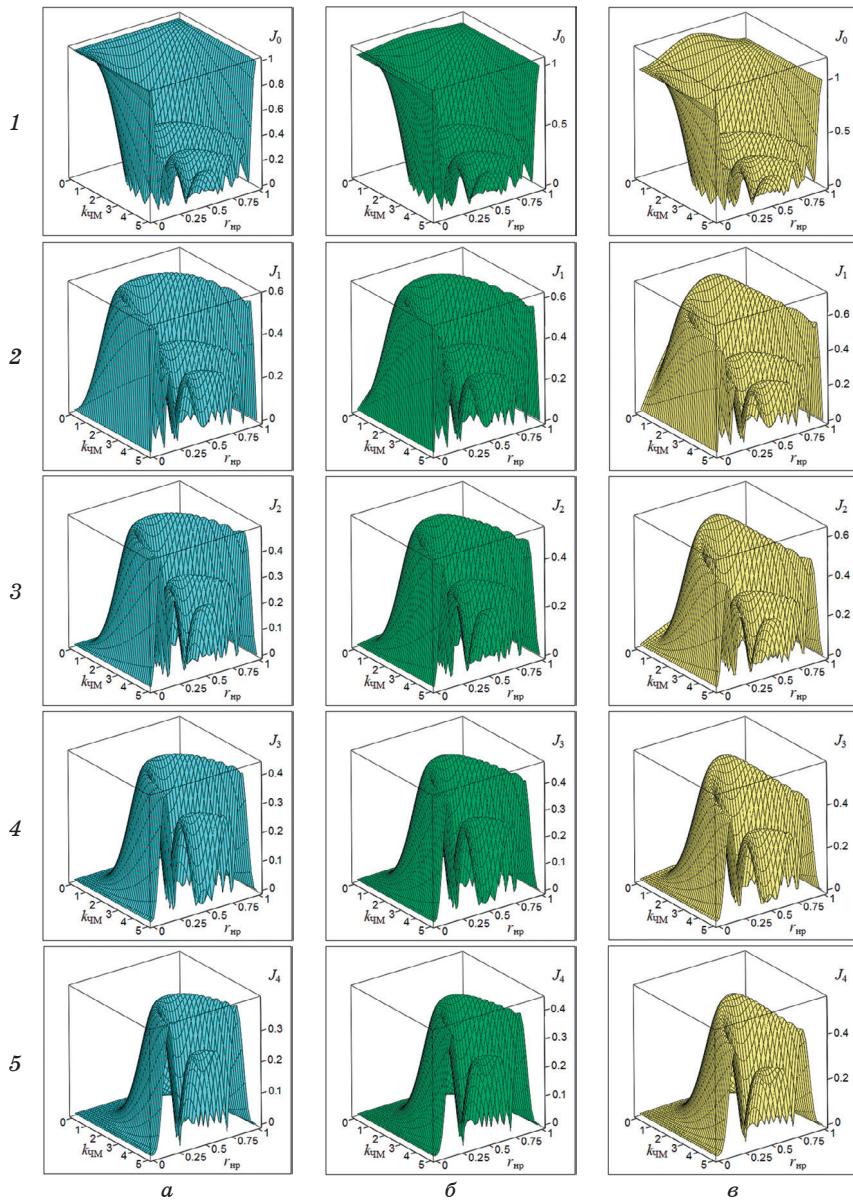


Рис. 2. Характеристики амплитудной селекции (ХАС) сигнала по изменению амплитуды колебаний АД с АЧМ на нулевой J_0 (строка 1), J_1 первой (строка 2), второй J_2 (строка 3), третьей J_3 (строка 4) и четвертой J_4 (строка 5) гармониках модуляции, рассчитанные для различных значений m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (столбец *a*), $m_{AM} = 0,2$ (*б*) и $m_{AM} = 0,4$ (*в*)

Fig. 2. Characteristics of the amplitude selection (CAS) signal on the change in the amplitude of the oscillations from AD the AMF to zero J_0 (line 1), J_1 first (line 2), second J_2 (line 3), third J_3 (line 4) and fourth J_4 (line 5) harmonics modulation, calculated for different values m_{AM} : $m_{AM} = 0$ (column *a*), $m_{AM} = 0,2$ (column *b*) and $m_{AM} = 0,4$ (column *c*)

модуляции после усиления снова подается в необходимой полярности на модулятор передатчика. Подбором параметров элементов замкнутого контура (усиления и сдвига фазы) можно добиться режима генерации на некоторой частоте, которая зависит от времени задержки отраженного излучения. По частоте генерации судят о дальности до цели.

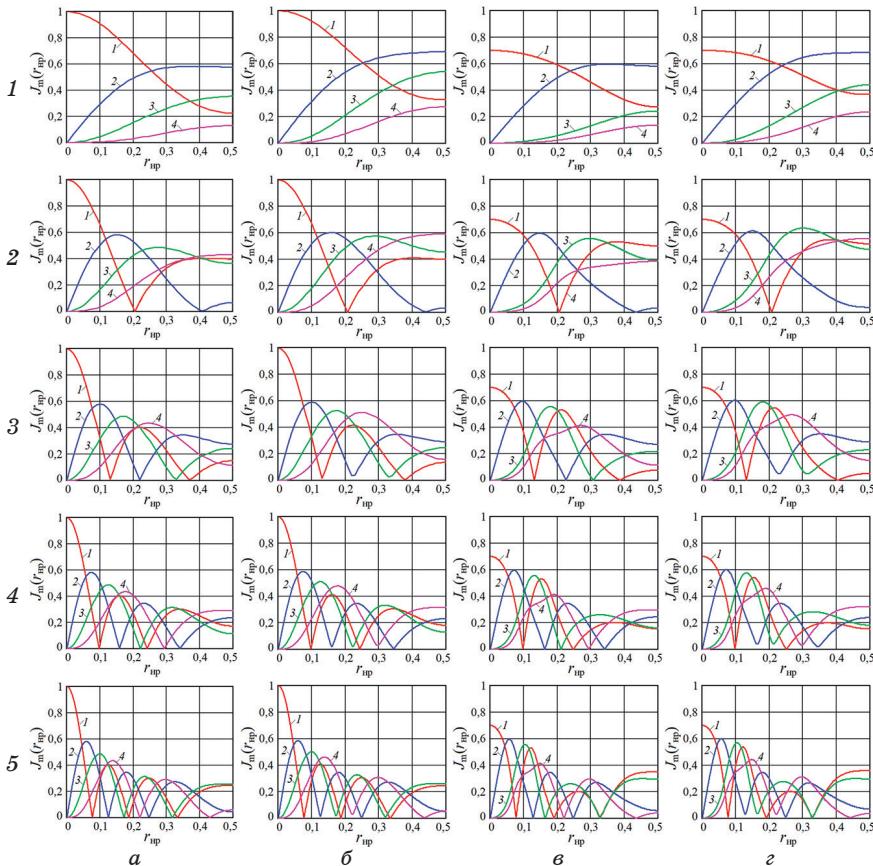


Рис. 3. Графики сечений ХАС вдоль оси r_{hp} $J_m(r_{hp})$ на нулевой J_0 (кривые 1), первой J_1 (кривые 2), второй J_2 (кривые 3) и третьей J_3 (кривые 4) гармониках модуляции, рассчитанные для случаев $k_{\text{чМ}} = 1$ (строка 1), $k_{\text{чМ}} = 2$ (строка 2), $k_{\text{чМ}} = 3$ (строка 3), $k_{\text{чМ}} = 4$ (строка 4) и $k_{\text{чМ}} = 5$ (строка 5) при различных значениях m_{AM} и C_{OC} : $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0$ (столбец a); $m_{\text{AM}} = 0,4$, $C_{\text{OC}} = 0$ (столбец δ); $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0,4$ (столбец σ); $m_{\text{AM}} = 0,4$, $C_{\text{OC}} = 0,4$ (столбец ε)

Fig. 3. Graphs of CAS cross-sections along the axis r_{hp} $J_m(r_{hp})$ at zero J_0 (curves 1), first J_1 (curves 2), second J_2 (curves 3) and third J_3 (curves 4) modulation harmonics, calculated for the cases $k_{\text{чМ}} = 1$ (line 1), $k_{\text{чМ}} = 2$ (line 2), $k_{\text{чМ}} = 3$ (line 3), $k_{\text{чМ}} = 4$ (line 4) и $k_{\text{чМ}} = 5$ (line 5) at different values m_{AM} and C_{OC} : $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0$ (column a); $m_{\text{AM}} = 0,4$, $C_{\text{OC}} = 0$ (column δ); $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0,4$ (column σ); $m_{\text{AM}} = 0,4$, $C_{\text{OC}} = 0,4$ (column ε)

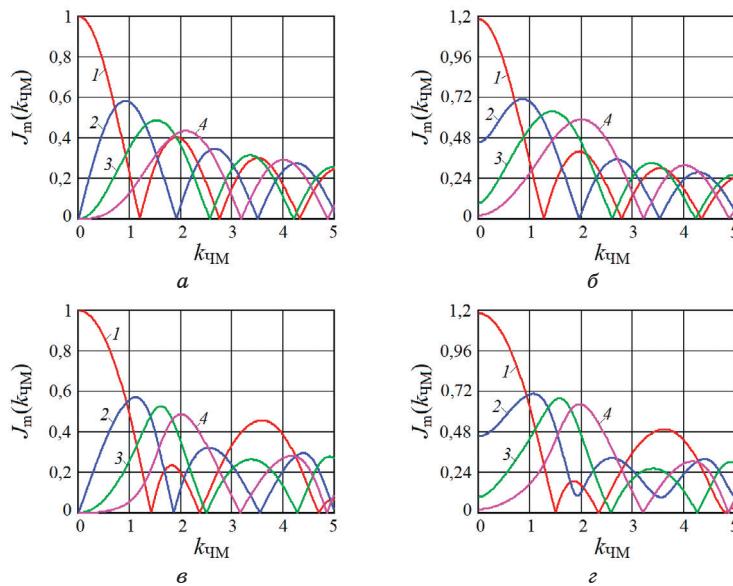


Рис. 4. Графики сечения ХАС вдоль оси индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ на нулевой J_0 (кривые 1), первой J_1 (кривые 2), второй J_2 (кривые 3) и третьей J_3 (кривые 4) гармониках модуляции, рассчитанные при $r_{\text{hp}} = 0,5$ и различных значениях m_{AM} и C_{OC} : $m_{\text{AM}} = 0, C_{\text{OC}} = 0$ (а); $m_{\text{AM}} = 0,4, C_{\text{OC}} = 0$ (б); $m_{\text{AM}} = 0, C_{\text{OC}} = 0,4$ (в); $m_{\text{AM}} = 0,4, C_{\text{OC}} = 0,4$ (г)

Fig. 4. Graphs of the CAS cross-section along the modulation index axis $k_{\text{ЧМ}}$ at zero J_0 (curves 1), first J_1 (curves 2), second J_2 (curves 3) and third J_3 (curves 4) modulation harmonics, calculated for the cases $r_{\text{hp}} = 0,5$ and at different values m_{AM} and C_{OC} : $m_{\text{AM}} = 0, C_{\text{OC}} = 0$ (а); $m_{\text{AM}} = 0,4, C_{\text{OC}} = 0$ (б); $m_{\text{AM}} = 0, C_{\text{OC}} = 0,4$ (в); $m_{\text{AM}} = 0,4, C_{\text{OC}} = 0,4$ (г)

Графики сечений ХАС вдоль оси r_{hp} , представленные на рис. 3, столбец *а*, назовем стандартными. Они соответствуют случаю, который можно назвать случаем «идеального» автодина, у которого гипотетически отсутствуют ПАМ ($m_{\text{AM}} = 0$) при ЧМ и автодинные изменения частоты ($C_{\text{OC}} = 0$) при воздействии отраженного от цели излучения. Для выяснения влияния ПАМ на вид ХАС сравним между собой графики столбцов *а* и *б* на рис. 3. Из этого сравнения видим, что наличие ПАМ вызывает изменения уровня сигнала $J_m(r_{\text{hp}})$ лишь в средней части сечения ХАС, где $0 < r_{\text{hp}} < 1$. При этом крайние значения сечения ХАС, где $r_{\text{hp}} = 0$ и $r_{\text{hp}} = 1$, остаются неизменными. Заметные изменения относительно стандартного вида сечения ХАС $J_m(r_{\text{hp}})$ наблюдаются преимущественно на нулевой $J_0(r_{\text{hp}})$ и на низших гармониках частоты модуляции. Из кривых 2–4 на графиках рис. 4 видно, что ПАМ колебаний вызывает отклик АД на гармониках $J_m(k_{\text{ЧМ}})$ модуляции даже в области значений, где $k_{\text{ЧМ}} \rightarrow 0$. Расчеты при иных значениях параметров показали, что с уве-

личением номера гармоники m и индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ влияние ПАМ на вид сечения ХАС АД с ЧМ существенно ослабевает.

Из сравнения представленных в столбцах a , b и ε графиков рис. 3 не трудно видеть, что на форму сечения ХАС значительно сильнее, чем ПАМ, оказывают влияние автодинные изменения частоты. Эти изменения, которые мы учитываем в расчетах соответствующим выбором значения параметра C_{OC} , вызывают значительные изменения не только внутри сечения ХАС, но и на ее краях. Этот вывод подтверждается также ходом одноименных кривых на графиках рис. 4.

Временные диаграммы $a_{\text{отн}}(\tau_{\text{нв}})$ отклика АД с ЧМ, как видно на рис. 5, содержат медленную и быструю составляющие. Медленная составляющая в чистом виде показана на рис. 5, a и e . Она совпадает с амплитудной характеристикой АД без модуляции [45]. На этих графиках видно, что как в начале ($r_{\text{нр}} = 0$), так и в конце ($r_{\text{нр}} = 1$) каждой ХАС автодинный отклик представлен только в виде доплеровского сигнала, но с присущими АД искажениями при $C_{\text{OC}} \neq 0$. Отклик на гармониках частоты модуляции Ω_m в этих случаях отсутствует. При смещении цели в среднюю область ХАС, где $0 < r_{\text{нр}} < 1$ происходит наложение на доплеровскую составляющую сигнала дополнительных «быстрых» осцилляций, обусловленных процессом взаимодействия отраженных ЧМ колебаний с излучаемыми, которые также промодулированы по частоте (см. рис. 5, b – g). Эти осцилляции вызывают зависимость уровня сигнала на гармониках частоты модуляции Ω_m в соответствии с функциями Бесселя (см. рис. 4, a).

Из представленных на рис. 5 спектров видно, что спектральные составляющие, полученные в АД на частотах, кратных частоте модуляции Ω_m , при движении цели распадаются на две составляющие половинной амплитуды. Данные составляющие смещены от частоты, кратной Ω_m , на величину частоты Ω_a автодинного сигнала, равной частоте Доплера. Наличие ангармонических искажений на временных диаграммах и высших гармоник частоты автодинного сигнала в его спектре (см. рис. 5) объясняется известной нелинейностью набега фазы $\delta(t, \tau)$ отраженного излучения, вызванной автодинными изменениями частоты генерации АД [15; 21; 25; 45]. Степень этих искажений сигналов определяется преимущественно величиной параметра обратной связи C_{OC} . Так, при $C_{\text{OC}} \ll 1$ автодинные изменения являются практически гармоническими, а с его увеличением – значительно отличаются от синусоиды. Степень этих искажений также зависит от внутренних параметров генератора, таких как добротность колебательной системы, знаки и величины параметров неизохронности (через угол θ) и неизодромности (через угол ψ) генератора.

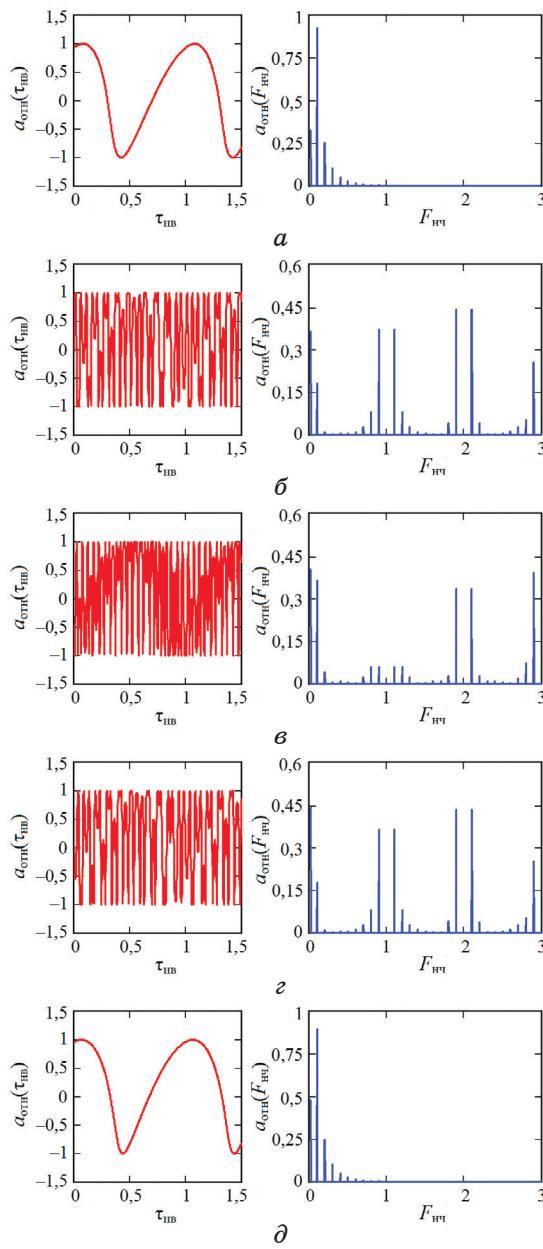


Рис. 5. Временные $a_{\text{орт}}(\tau_{\text{нв}})$ и спектральные $a_{\text{орт}}(F_{\text{нв}})$ диаграммы автодинного сигнала рассчитанные для осциллятора с ЧМ при $k_{\text{ЧМ}} = 2$, $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0,5$ и различных значениях $r_{\text{нв}}$: $r_{\text{нв}} = 0$ (а); $r_{\text{нв}} = 0,25$ (б); $r_{\text{нв}} = 0,5$ (в); $r_{\text{нв}} = 0,75$ (г); $r_{\text{нв}} = 1$ (д)

Fig. 5. Time $a_{\text{орт}}(\tau_{\text{нв}})$ and spectral $a_{\text{орт}}(F_{\text{нв}})$ diagrams of the autodyne signal calculated for the oscillator with FM at $k_{\text{ЧМ}} = 2$, $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0,5$ and different values $r_{\text{нв}}$: $r_{\text{нв}} = 0$ (a); $r_{\text{нв}} = 0,25$ (б); $r_{\text{нв}} = 0,5$ (в); $r_{\text{нв}} = 0,75$ (г); $r_{\text{нв}} = 1$ (д)

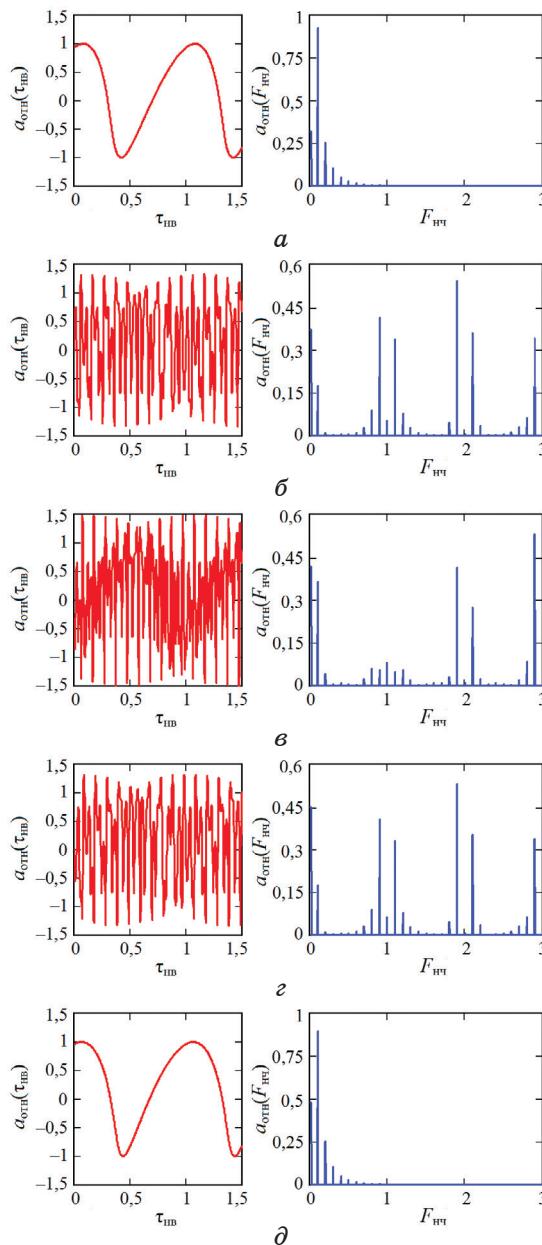


Рис. 6. Временные $a_{\text{орт}}(\tau_{\text{HB}})$ и спектральные $a_{\text{орт}}(F_{\text{HB}})$ диаграммы автодинного сигнала рассчитанные для осциллятора с АЧМ при $k_{\text{ЧМ}} = 2$, $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0,5$ и различных значений r_{hp} : $r_{\text{hp}} = 0$ (а); $r_{\text{hp}} = 0,25$ (б); $r_{\text{hp}} = 0,5$ (в); $r_{\text{hp}} = 0,75$ (г); $r_{\text{hp}} = 1$ (д)

Fig. 6. Time $a_{\text{орт}}(\tau_{\text{HB}})$ and spectral $a_{\text{орт}}(F_{\text{HB}})$ diagrams of the autodyne signals calculated for the oscillator with AFM at $k_{\text{ЧМ}} = 2$, $m_{\text{AM}} = 0$, $C_{\text{OC}} = 0,5$ and different values r_{hp} : $r_{\text{hp}} = 0$ (а); $r_{\text{hp}} = 0,25$ (б); $r_{\text{hp}} = 0,5$ (в); $r_{\text{hp}} = 0,75$ (г); $r_{\text{hp}} = 1$ (д)

В целом, как видно на временных и спектральных диаграммах рис. 5 и 6, формирование автодинного отклика на выходе АД с АЧМ происходит аналогично, как в случае АД с ЧМ. Например, в начале ($r_{\text{нр}} = 0$) и в конце ($r_{\text{нр}} = 1$) каждой ХАС автодинный отклик представлен в виде доплеровского сигнала, а отклик на гармониках частоты Ω_m модуляции отсутствует. Основные отличия в формировании сигналов на выходе АД с АЧМ имеют место в средней части ХАС, где $0 < r_{\text{нр}} < 1$. Здесь формирование сигналов как в области доплеровских частот, так и на гармониках модуляции обусловлено не только процессом ЧМ колебаний АД, но и процессом АМ. При этом вклад АМ на временных диаграммах рис. 6, б–д выглядит в виде пичков (выбросов), выходящих за пределы амплитуды сигнала, при ЧМ. Очевидно, что за счет этих пичков происходит дополнительное перераспределение энергии спектральных составляющих сигнала и появление гармоник на частотах, кратных частоте Ω_m модуляции. Кроме того, это перераспределение вызывает заметную асимметрию спектра сигналов на гармониках частоты модуляции, а также изменения в поведении уровня сигнала на гармониках частоты модуляции Ω_m , которое становится отличным от поведения функций Бесселя (см. рис. 4, б–д).

Как видно на рис. 2 и 3, ХАС автодинного отклика на определенных расстояниях $r_{\text{нр}}$ от СБРЛ имеют «мертвые» зоны по дальности, где наблюдается подавление сигналов, отраженных от целей. Одна из таких зон находится в непосредственной близости от СБРЛ, где $r_{\text{нр}} = 0$. В этой зоне появление сравнительно мелких отражающих объектов, например насекомых, капель дождя и других, вызывает появление мощных отраженных сигналов, которые в ряде применений нарушают нормальную работу СБРЛ. В данном случае наличие мертвой зоны вблизи антенны СБРЛ с ЧМ при выделении сигналов на гармониках частоты модуляции является весьма важным и полезным свойством этих систем, обеспечивающим их повышенную помехоустойчивость.

4. Результаты экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований использовался генераторный модуль «Тигель-08М» 8-миллиметрового диапазона (см. рис. 7, а), изготовленный по гибридно-интегральной технологии на основе двуххмезового диода Ганна [13]. На подложке этого модуля в щелевой резонатор параллельно (по СВЧ) установлены чипы планарного диода Ганна и варикапа, связанные по цепям смещения (показаны на рис. 7, б цифрами «1» и «2» соответственно). Варикап предназначен для управления частотой генерации модуля. Выделение автодинного сигнала производилось в цепи

смещения диода Ганна с помощью специальной схемы блока регистрации, преобразующего изменения среднего значения тока в напряжение [16]. Напряжение смещения на диоде Ганна было выбрано $U_0 = 3,9$ В, ток потребления составлял 0,2 А. Частота генерации модуля 37,5 ГГц, его выходная мощность 15 мВт.

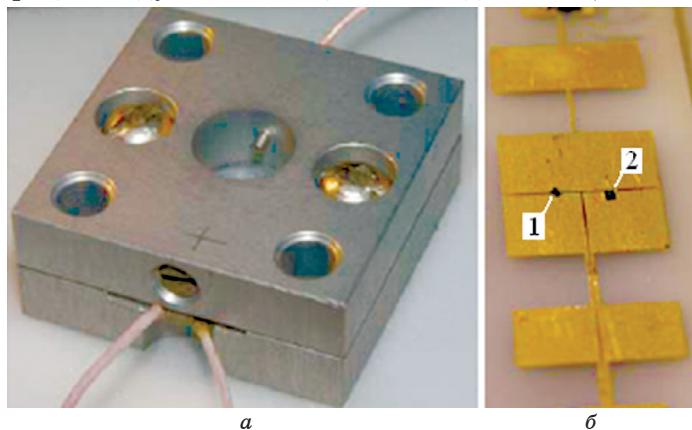
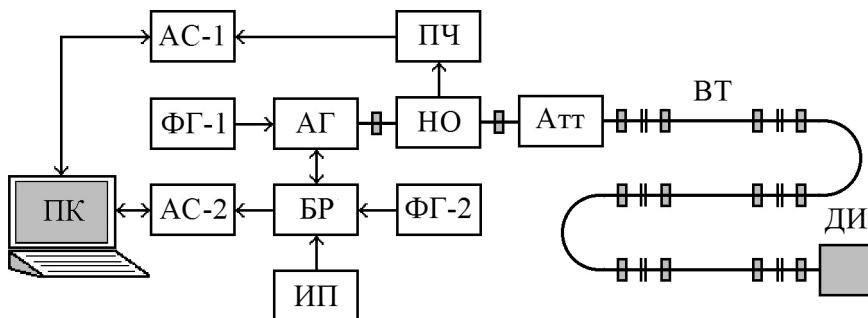


Рис. 7. Внешний вид модуля «Тигель-08М» (а) и топология диодной подложки (б)

Fig. 7. External view of the module “Tigel-08M” (a) and topology of the diode insertion (б)

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 8. Исследуемый автодинный генератор АГ связан с доплеровским имитатором ДИ [45] волноводным трактом ВТ, в котором находятся также направленный ответвитель НО и переменный аттенюатор Атт. Волноводный тракт ВТ требуемой протяженности предназначен для моделирования запаздывания отраженного излучения, а аттенюатор Атт – затухания, распространяющегося в пространстве до цели и обратно излучения. Боковое плечо направленного ответвителя НО подключено к входу переносчика частоты ПЧ, выход которого соединен с входом первого анализатора спектра АС-1.

Напряжение от источника питания ИП на исследуемый генератор АГ поступает через блок регистрации БР. Синусоидальное напряжение частотой 10 МГц по первому варианту модуляции частоты генерации автодинного генератора АГ поступает от функционального генератора ФГ-1 на варикап АГ. По второму варианту этот же функциональный генератор, указанный как ФГ-2, подключается к блоку регистрации БР для модуляции частоты автодинного генератора АГ по цепи питания. Выходной сигнал этого блока подается на вход второго анализатора спектра АС-2. Оба анализатора спектра типа USB-SA44B связаны с персональным компьютером ПК через USB-кабели.



Расшифровка аббревиатур – Abbreviations meaning

АГ	Автодинный генератор Autodyne oscillator	ПК	Персональный компьютер Personal computer
Атт	Аттенюатор Attenuator	ИП	Источник питания Power supply
НО	Направленный ответвитель Directional coupler	БР	Блок регистрации Registration unit
ДИ	Доплеровский имитатор Doppler simulator	AC-1	Анализатор спектра – 1 Spectrum analyzers – 1
ПЧ	Переносчик частоты Frequency converter	AC-2	Анализатор спектра – 2 Spectrum analyzers – 2
ФГ-1,2	Функциональный генератор Functional generator	ВТ	Волноводный тракт Waveguide path

Рис. 8. Функциональная схема экспериментальной установки

Fig. 8. Block diagram experimental setup

В экспериментах были реализованы следующие условия: длина волноводного тракта ВТ сечением $7,2 \times 3,4 \text{ мм}^2$ между генератором АГ и имитатором ДИ (см. рис. 8) равнялась $l_b = 9,6 \text{ м}$, т. е. время запаздывания отраженного излучения в волноводе, рассчитанное по формуле $\tau = 2l_b / c \sqrt{1 - (\lambda / \lambda_{kp})^2}$, где λ_{kp} – критическая длина волны волновода, составляло $\tau = 75 \times 10^{-9} \text{ с}$. Данное расстояние примерно соответствует при выбранной частоте модуляции 10 МГц середине ХАС, где $r_{np} = 0,5$. Переменным аттенюатором Att в тракте в зависимости от условий эксперимента устанавливалась величина коэффициента отражения Γ_0 , при которой автодинная девиация частоты составляла $\Delta\omega_a = 2\pi \times 0,84 \times 10^6$, $\Delta\omega_a = 2\pi \times 0,42 \times 10^6$ или $\Delta\omega_a = 2\pi \times 0,05 \times 10^6$, что соответствует расчетным значениям параметра обратной связи $C_{oc} = 0,4$, $C_{oc} = 0,2$ или $C_{oc} = 0,02$. Величина девиации частоты $\Delta\omega_a$ оценивалась с помощью анализатора спектра AC-1 при работающем имитаторе ДИ по ширине спектра СВЧ-излучения генератора АГ в режиме без модуляции.

На рис. 9–11 представлены графики относительных уровней сигнала на нулевой J_0 , первой J_1 , второй J_2 и третьей J_3 гармониках модуляции в зависимости от величины индекса модуля-

ции $k_{\text{чМ}}$, полученные при различных условиях экспериментов. Величина этого индекса изменялась от значения $k_{\text{чМ}} = 0,2$ до $k_{\text{чМ}} = 4$ с шагом 0,2. Кривые 1 на рис. 9 получены для случая модуляции частоты генерации с помощью варикапа, при этом ПАМ излучения практически отсутствует ($m_{\text{AM}} = 0$). Кривые 2 на этом же рисунке получены для случая модуляции по цепи питания, при этом коэффициент $m_{\text{AM}} = 0,46$.

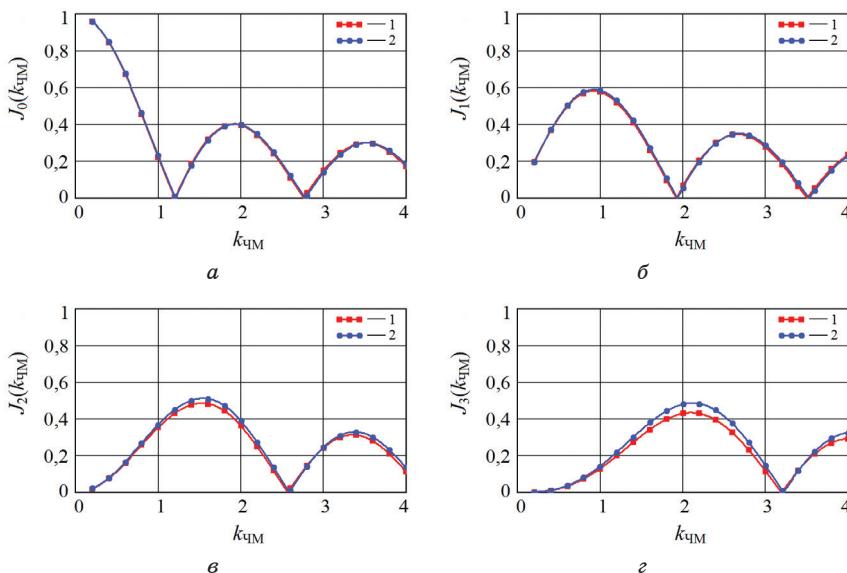


Рис. 9. Экспериментальные графики зависимостей относительной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{чМ}}$, полученные при $l_b = 9,6$, $C_{\text{OC}} = 0,02$ и различных значениях m_{AM} : $m_{\text{AM}} = 0$ (кривые 1), $m_{\text{AM}} = 0,46$ (кривые 2)

Fig. 9. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (a), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the modulation index $k_{\text{чМ}}$, obtained at $l_b = 9,6$, $C_{\text{OC}} = 0,02$ and various values m_{AM} : $m_{\text{AM}} = 0$ (curves 1), $m_{\text{AM}} = 0,46$ (curves 2)

На рис. 10 представлены графики относительных уровней сигнала на гармониках при модуляции частоты генерации с помощью варикапа ($m_{\text{AM}} = 0$) для различных значений C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{OC}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{OC}} = 0,2$ (кривая 3). Аналогичные графики представлены на рис. 11, но при модуляции СВЧ излучения модуля «Тигель-08М» по цепи питания, когда имеет место ПАМ ($m_{\text{AM}} = 0,46$).

Графики зависимостей относительных амплитуд сигнала на указанных выше гармониках модуляции от длины волноводного тракта l_b представлены на рис. 12. Длина волноводного трак-

та изменялась от 0,4 до 9,6 м с шагом 0,4 м. Графики получены при величине индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}} = 4$ для различных значений C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (кривые 1) и $C_{\text{OC}} = 0,4$ (кривые 2).

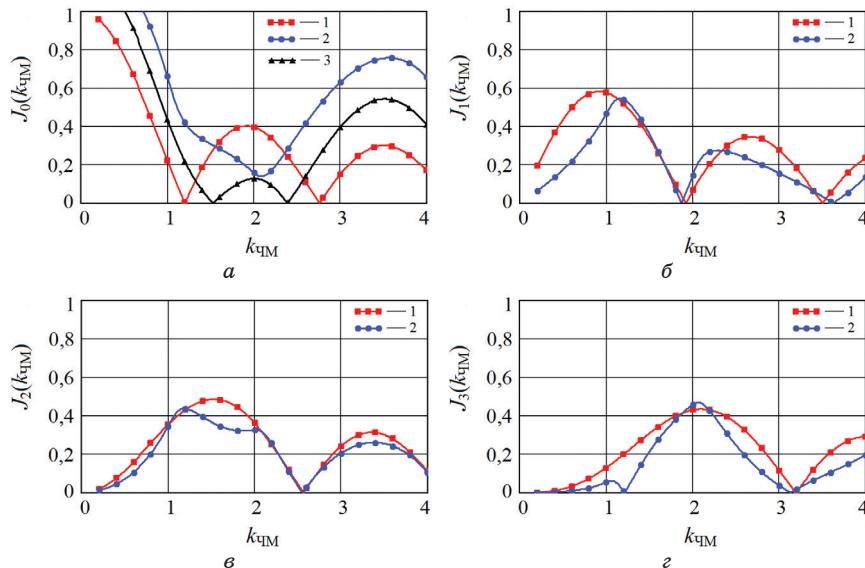


Рис. 10. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$, полученные при $l_{\text{в}} = 9,6$, $m_{\text{AM}} = 0$ и различных значениях C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (кривые 1), $C_{\text{OC}} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{\text{OC}} = 0,2$ (кривая 3)

Fig. 10. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (a), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the modulation index $k_{\text{ЧМ}}$, obtained at $l_{\text{в}} = 9,6$, $m_{\text{AM}} = 0$ and various values C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (curves 1), $C_{\text{OC}} = 0,4$ (curves 2) and $C_{\text{OC}} = 0,2$ (curves 3)

На рис. 13, а представлен спектр СВЧ-колебаний модуля «Тигель-08М», полученный с помощью анализатора спектра АС-1 при гармонической модуляции напряжения смещения на варикапе. Величина индекса $k_{\text{ЧМ}} = 4$, частота модуляции равна 10 МГц. Спектр СВЧ-колебаний этого же модуля при модуляции напряжения питания диода Ганна при прежних значениях индекса и частоты модуляции представлен на рис. 13, б. Асимметрия спектра в последнем случае указывает на наличие сопутствующей АМ с величиной коэффициента m_{AM} около 0,46.

При указанных здесь условиях эксперимента с помощью анализатора спектра АС-2 (см. рис. 8) нами были получены спектры автодинных сигналов на выходе блока регистрации БР для

случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе и на диоде Ганна, представленные на рис. 14, *а* и *б* соответственно. При этом скорость движения отражателя имитатора ДИ поддерживалась постоянной, при которой частота автодинного сигнала составляла 10 кГц. На спектрах представлены области нулевой и первых трех гармоник частоты модуляции.

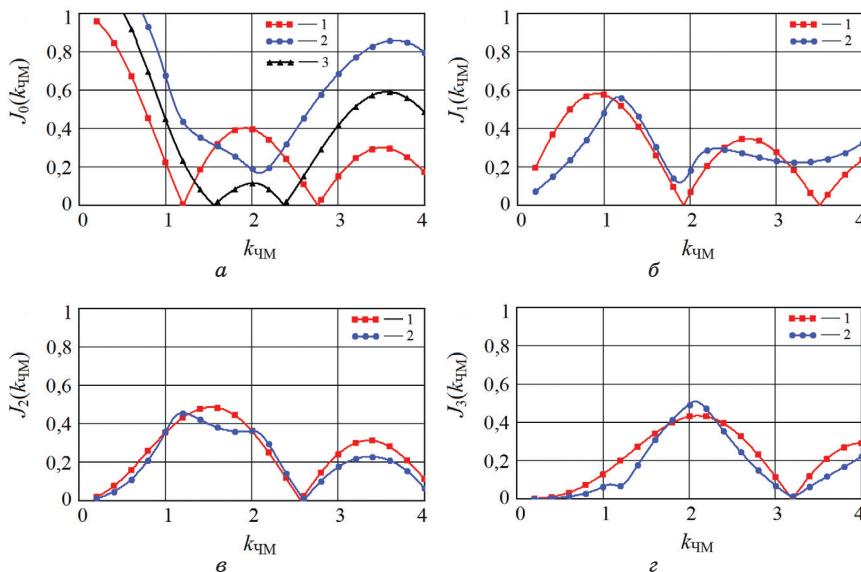


Рис. 11. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (*а*), первой J_1 (*б*), второй J_2 (*в*) и третьей J_3 (*г*) гармониках модуляции от величины индекса модуляции $k_{\chi M}$, полученные при $l_b = 9,6$, $m_{AM} = 0,46$ и различных значениях C_{OC} : $C_{OC} = 0,02$ (кривые 1), $C_{OC} = 0,4$ (кривые 2) и $C_{OC} = 0,2$ (кривая 3)

Fig. 11. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (*а*), first J_1 (*б*), second J_2 (*в*) and third J_3 (*г*) modulation harmonics on the modulation index $k_{\chi M}$, obtained at $l_b = 9,6$, $m_{AM} = 0,46$ and various values C_{OC} : $C_{OC} = 0,02$ (curves 1), $C_{OC} = 0,4$ (curves 2) and $C_{OC} = 0,2$ (curves 3)

Из спектров на рис. 14 видно, что уровень первой гармоники ПАМ значительно превышает уровень гармоник более высокого порядка. Существенные отличия вида спектра исследуемых способов модуляции генераторных модулей состоят в асимметрии спектров в окрестности гармоник частоты модуляции в случае модуляции генераторного модуля по цепи питания, у которого уровень сопутствующей АМ излучения значительно больше, чем в случае модуляции по изменению смещения на варикапе (см. рис. 14, *б*).

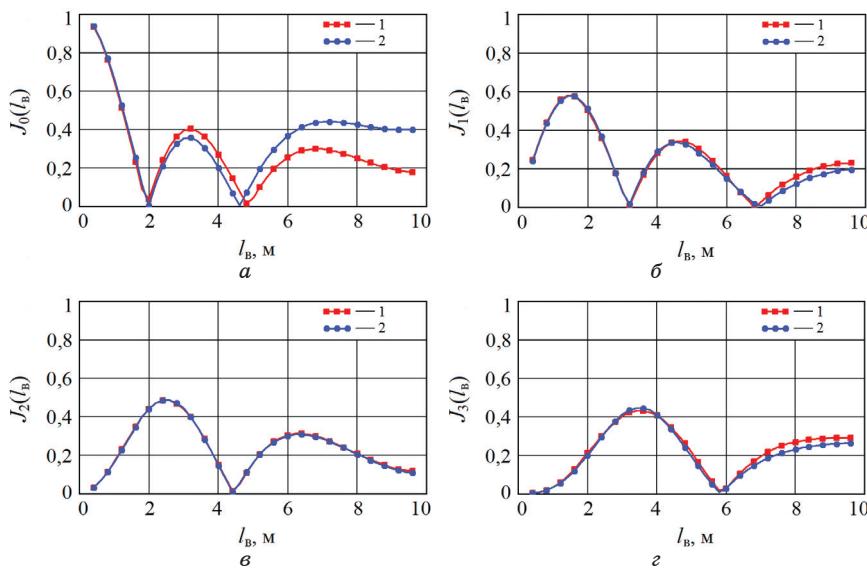


Рис. 12. Экспериментальные графики зависимостей нормированной амплитуды сигнала на нулевой J_0 (а), первой J_1 (б), второй J_2 (в) и третьей J_3 (г) гармониках модуляции от длины волноводного тракта l_B , полученные при $k_{\text{ЧМ}} = 4$ и различных значениях C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (кривые 1) и $C_{\text{OC}} = 0,4$ (кривые 2)

Fig. 12. Experimental graphs of the dependences of the relative signal amplitude at the zero J_0 (a), first J_1 (б), second J_2 (в) and third J_3 (г) modulation harmonics on the length of the waveguide path l_B , obtained at $k_{\text{ЧМ}} = 4$ and different values C_{OC} : $C_{\text{OC}} = 0,02$ (curves 1) and $C_{\text{OC}} = 0,4$ (curves 2)

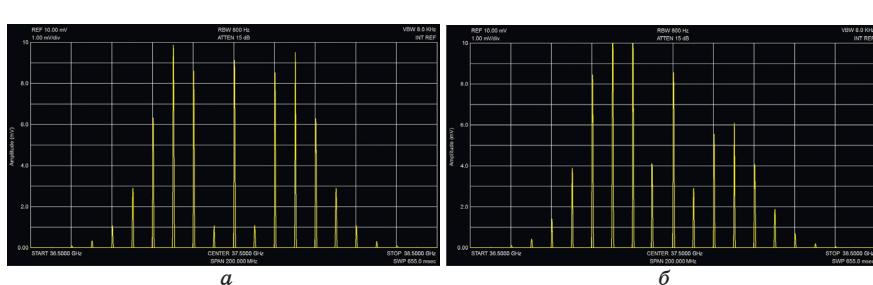


Рис. 13. Спектры колебаний на выходе СВЧ модуля «Тигель-08М», полученные при модуляции напряжения смещения на варикапе (а) и смещения на диоде Ганна (б)

Fig. 13. Oscillation spectra at the output of the “Tigel-08M” microwave module obtained by modulating the bias voltage across the varicap (а) and bias across the Gunn diode (б)

Наличие высших гармоник частоты Доплера в указанных областях спектра на рис. 14 обусловлено ангармоническими искажениями сигналов. Эти искажения, как известно [45], наблю-

даются в условиях, когда величина параметра обратной связи C_{OC} соизмерима с единицей. В случае уменьшения величины этого параметра, например увеличением затухания аттенюатора Атт на 10–20 дБ, высшие гармоники частоты Доплера практически исчезают, и автодинный сигнал при этом становится синусоидальным. Из сравнения рассчитанных выше спектральных диаграмм, представленных на рис. 5 и 6, и экспериментальных спектров, приведенных на рис. 14, видно их качественное соответствие.

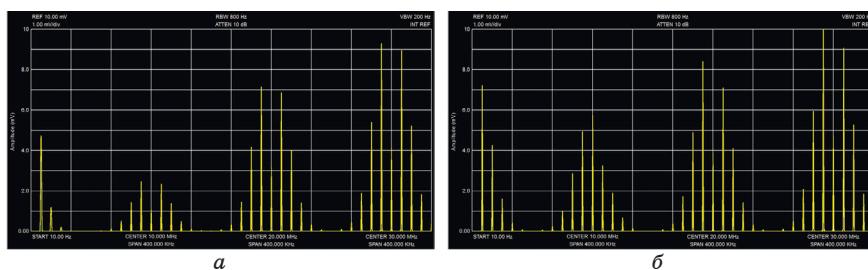


Рис. 14. Спектры автодинного сигнала на выходе блока регистрации БР, полученные для случаев модуляции модуля «Тигель-08М» по изменению напряжения смещения на варикапе (а) и смещения на диоде Ганна (б)

Fig. 14. Spectra of the autodyne signal at the output of the BR registration unit, obtained for the cases of modulation of the “Tigel-08M” module by changing the bias voltage across the varicap (a) and the bias across the Gunn diode (b)

Из сравнения кривых 1 и 2 на рис. 9, *а–г* видно, что полученные зависимости уровня автодинного сигнала для случаев модуляции частоты генерации с помощью варикапа и по цепи питания практически не отличаются между собой. Эти графики полностью соответствуют рассчитанным выше графикам сечения ХАС вдоль оси индекса модуляции $k_{\text{ЧМ}}$ на различных гармониках модуляции (см. рис. 4, *а*), полученным для гипотетического случая отсутствия ПАМ. Отличия «теоретических» кривых рис. 4, *б* и экспериментальных, представленных кривыми 2 на рис. 9, объясняются тем, что в реальном генераторе связь между уровнем ПАМ и амплитудой модулирующей функции прямая. Этот фактор не учитывался в исходных данных при расчетах и построениях кривых рис. 4, *б*. Аналогично объясняются причины отличий в поведении графиков рис. 4, *г* и рис. 10 и 11, полученных для случаев, когда параметр $C_{OC} \neq 0$.

Еще одно отличие результатов численного моделирования и экспериментальных данных видно из поведения графиков сечения ХАС вдоль оси нормированного расстояния $r_{\text{нр}}$ до цели, представленных на рис. 3, *а–г* (см. строка 4) и графиков рис. 12,

полученных при изменении длины l_b волноводного тракта. Это отличие также объясняется прямой пропорциональностью, но в данном случае зависимости величины параметра обратной связи C_{oc} от расстояния до цели, что следует из смысла расшифровок к выражениям (7)–(9). В целом экспериментальные графики качественно подтвердили результаты расчетов основных характеристик АД с АЧМ при гармоническом законе модуляции.

Таким образом, полученные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанной математической модели в отношении влияния на формирование сигналов АД с ЧМ сопутствующей ПАМ.

5. Заключение

Разработана математическая модель автодинного генератора, учитывающая одновременную амплитудную и частотную модуляцию излучения и обеспечивающая возможность расчета характеристик амплитудной селекции цели на различных гармониках модуляции. Модель учитывает также форму и спектр автодинного сигнала для общего случая произвольного соотношения времени запаздывания отраженного от цели излучения и периода модулирующей функции. Согласно разработанной модели автодина выполнены расчеты его характеристик для случая гармонического закона модуляции и экспериментальные исследования генератора на диоде Ганна. При этом установлено влияние сопутствующей амплитудной модуляции, а также величины параметра внешней обратной связи на формирование сигналов автодинной СБРЛ с ЧМ. Основные результаты исследований сводятся к следующим.

На краях зоны амплитудной селекции цели автодинный отклик генератора как при ЧМ, так и при АЧМ наблюдается только на нулевой гармонике модуляции, т. е. в области доплеровских частот. В средней части зоны амплитудной селекции в генераторе с ЧМ (без ПАМ) формирование автодинного отклика при малой величине параметра C_{oc} внешней обратной связи, когда $C_{oc} \ll 1$, аналогично формированию сигнала в гомодинных СБРЛ с ЧМ. Формирование сигналов в этой части зоны селекции происходит как на нулевой гармонике, так и на гармониках более высокого порядка. При этом амплитуды огибающей сигналов при гармонической ЧМ формируются в соответствии с функциями Бесселя. Наличие ПАМ излучения генератора вызывает некоторые изменения в амплитудные значения сигналов, причем при малых значениях коэффициента АМ, когда $m_{AM} \leq 0,5$, влиянием ПАМ можно пренебречь. Однако с приближением величины коэффициента АМ к единице такое пренебрежение

жение становится недопустимым, поскольку амплитуда отклика на всех гармониках частоты Ω_m модуляции, включая нулевую, резко возрастает. Влияние ПАМ на формирование ХАС в автодинной СБРЛ с ЧМ значительно уменьшается с ростом номера гармоники, на которой производится выделение сигнала.

Попутно установлено, что особенно сильное влияние на формирование характеристик амплитудной селекции цели оказывает величина параметра C_{oc} внешней обратной связи автодинной системы «генератор – цель». При выполнении сильного неравенства, когда $C_{oc} \ll 1$, формируемые сигналы имеют гармонический вид, а ХАС полностью совпадают с характеристиками гомодинных СБРЛ с ЧМ. Однако в случае приближения величины параметра C_{oc} к единице имеют место сильные изменения спектрального состава автодинного отклика. Эти изменения приводят к искажению формы ХАС на всех гармониках, включая нулевую гармонику, что может явиться причиной нарушения нормальной работы СБРЛ со спектральной обработкой сигналов. Поэтому при создании перспективных автодинных приемопередающих модулей для СБРЛ с ЧМ необходимо учитывать отмеченные обстоятельства. Прежде всего должны приниматься меры по снижению уровня ПАМ и причин искажения сигналов из-за автодинных изменений частоты. Кроме того, модули должны обеспечить требуемую линейность закона ЧМ в широкой полосе и повторяемость модуляционных характеристик в условиях серийного производства.

Таким образом, из анализа результатов выполненных исследований и перечисленных требований следует, что весьма перспективным направлением создания монолитных и гибридно-монолитных автодинов миллиметрового диапазона, намеченным в последние десятилетия и требующим своего дальнейшего развития, является использование 3-молового полупроводникового многофункционального чипа [13; 25]. Данный чип представляет собой многоэлементную мезапланарную ганновскую структуру. В ней одна боковая меза выполняет функции варикапа, обеспечивающего снижение уровня ПАМ, а вторая боковая – функции амплитудного детектора, выделяющего полезный сигнал. При этом центральная меза при включении чипа в копланарную линию передачи является активной, реализующей функции генераторного диода Ганна.

Другое решение данной проблемы возможно путем создания автодинных модулей со стабилизацией частоты генератора, например с помощью управляемого по частоте высокодобротного резонатора [46]. В качестве колебательной системы таких автодинов представляется интересным использование интегрирован-

ных с активным элементом АД высокодобротных резонансных структур, выполненных в виде распределенных отражателей Брэгга, которые применительно к созданию СВЧ генераторно-излучающих модулей ранее были исследованы, например, в работах [47; 48]. Принцип действия этих отражателей основан на интерференции волн внутри волновода с гофрированными стенками. Двумерные отражатели этого волновода создают распределенную обратную связь внутри резонатора, тем самым обеспечивая одномодовый режим генерации и высокую пространственную когерентность излучения. Данная структура, широко используемая в настоящее время в полупроводниковых лазерах, обеспечивает, с одной стороны, стабилизацию частоты генерации благодаря ее высокой частотной селективности и с другой – возможность параметрического «электронного» управления частотой генерации. Последнее свойство отражателей Брэгга, заявленное патентом [49] применительно к СВЧ-генераторам, может использоваться в автодинных модулях для СБРЛ с ЧМ.

Кроме того, объединение АД и антенны в одном корпусе миクロсхемы позволяет создать еще один перспективный тип генераторно-излучающих автодинных модулей, которые, обладая пониженной стоимостью из-за отсутствия волноводных элементов конструкции, значительно расширяют область применения и возможности в реализации различных СБРЛ, в том числе в виде фазированных антенных решеток [50; 51].

Благодарности

Настоящая статья подготовлена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-052 от 13 декабря 2019).

Acknowledgments

This article was prepared with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-11-2019-052 of December 13, 2019).

Литература

1. Page C. H., Astin A. V. Survey of proximity fuze development. *American Journal of Physics*. 1947;15(2):95–110. DOI: 10.1119/1.1990930.
2. Коган И. М. *Ближняя радиолокация. Теоретические основы*. М.: Советское радио; 1973.
3. Yanovsky F. J. Millimeter-Wave Radar: Principles and Applications. In: Xiao S.-Q., Zhou M.-T., Zhang Y. (eds.) *Millimeter wave technology in wireless Pan, Lan and Man*. New York: CRC; 2008. Chapter 10, pp. 305–375.
4. Charvat G. L. *Small and Short-Range Radar Systems*. CRC Press; 2014.

5. Костенко А. А., Хлопов Г. И. *Когерентные системы ближней и сверхближней радиолокации миллиметрового диапазона*. Харьков: Контраст; 2015.
6. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler Radar Physiological Sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016. DOI: 10.1002/9781119078418.
7. Changzhi Li, Jenshan Lin. *Microwave noncontact motion sensing and analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2014. DOI: 10.1002/9781118742556.
8. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012.
9. Kim S., Nguyen C. A Displacement Measurement Technique Using Millimeter-Wave Interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812575.
10. Атаянц Б. А., Давыдочкин В. М., Езерский В. В., Паршин В. С., Смольский С. М. *Прецизионные системы ближней частотной радиолокации промышленного применения*. М.: Радиотехника. 2012.
11. Носков В. Я., Богатырев Е. В., Игнатков К. А. Принцип построения бортового радиолокационного датчика для обнаружения быстродвижущихся целей. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2019;(12):16–22. DOI: 10.18127/j20700784-201912-03.
12. Smolskiy S. M., Generalov M. K. Homodyne and autodyne configurations of short-range radar systems. *Telecommun. Sciences*. 2010;1(1):14–23. Available at: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/29985>
13. Второпин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 1. Конструкторско-технологические достижения. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2006;(12):3–30. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/2218>
14. Utagawa H., Matsui T. Microwave/millimeter wave sensor apparatus. *Patent US8212718B2*, March 31, 2008.
15. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скриполь Ан. В. *Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов*. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та; 2003.
16. Носков В. Я., Смольский С. М., Игнатков К. А., Мишин Д. Я., Чупахин А. П. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 11. Основы реализации автодинов. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2019;(2):5–33. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/article/22689>
17. Damgov V. N. *Nonlinear and parametric phenomena. Theory and Applications in Radiophysical and Mechanical Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2004.
18. Landa P. S. *Nonlinear Oscillations and Waves in Dynamical Systems*. Springer-Science+ Business Media, B.V.; 1996.
19. Смольский С. М., Соловьев М. А. Малосигнальная теория транзисторного автодина с частотной модуляцией. *Радиопередающие и радиоприемные устройства. Труды МЭИ*. 1977;(317):12–14.

20. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
21. Закарлюк Н. М. Спектр автодинного отклика генератора с частотной модуляцией. В: *Применение радиоволн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов*. Харьков: ИРЭ АН Украины; 1991. С. 56–65.
22. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA, USA: Artech House; 2003.
23. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Анализ автодинного эффекта генераторов с линейной частотной модуляцией. *Известия вузов. Физика*. 2008;51(6):54–60. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11135288>
24. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
25. Воторопин С. Д., Носков В. Я., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 5. Исследования автодинов с частотной модуляцией. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2009;(3):3–50. Режим доступа: <http://81.177.3.94/article/5917>
26. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Mathematical Model of FM Autodyne Radar. In: *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016*. A-25, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538000.
27. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Main Expressions for Analysis of Signals and Noise of Autodyne FM Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016*. A-9, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538019.
28. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Peculiarities of Signal and Noise Characteristics of FMCW Autodyne Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16), Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016*. A-10, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7537984.
29. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. V., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparatuobuduv*. 2016;(67):50–57. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.50-57.
30. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016;75(17):1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.

31. Носков В. Я., Васильев А. С., Ермак Г. П., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Флуктуационные характеристики автодинных радиолокаторов с частотной модуляцией. *Изв. вузов. Радиоэлектроника.* 2017;60(3):154–165. DOI: 10.20535/S0021347017030049.
32. Kryzhanovskyi V. S., Ermak G. P., Vasiliev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Smolskiy S. M. Signals From a Moving Object of Autodyne Radars with Linear Frequency Modulation. *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), Kyiv, Ukraine, August 29–31, 2017.* P. 93–98. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075036.
33. Ermak G. P., Vasiliev A. S., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Moving object signal peculiarities of an autodyne radar with symmetric saw-tooth FM law. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, September 11–15, 2017.* P. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095378.
34. Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П. Анализ сигналов от движущегося объекта автодинных локаторов с линейными видами модуляции частоты. *Уральский радиотехнический журнал.* 2017;1(1):25–54. DOI 10.15826/urej.2017.1.1.002.
35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Sensors with Sinusoidal Frequency Modulation. *Radioengineering,* 2017;26(4):1182–1190. DOI: 10.13164/re.2017.1182.
36. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE.* 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293.
37. Носков В. Я., Игнатков К. А. О применимости квазистатического метода анализа автодинных систем. *Известия вузов. Радиоэлектроника.* 2014;57(3):44–56. DOI: 10.20535/S0021347014030054.
38. Носков В. Я., Смольский С. М., Игнатков К. А. Влияние сопутствующей модуляции частоты колебаний амплитудно-модулированного генератора на формирование автодинных сигналов. *Уральский радиотехнический журнал.* 2020;4(1):51–83. DOI: 10.15826/urej.2020.4.1.004.
39. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 1971;19(12):906–910. DOI: 10.1109/TMTT.1971.6373339.
40. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929.
41. Носков В. Я., Смольский С. М. Автодинный эффект в генераторах с амплитудной модуляцией. *Радиотехника.* 2011;(2):21–36. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/8545>
42. Woodyard J. R. Radio system for distance and velocity measurement. *Pat. US2424263,* February 23, 1943.
43. Шаров Ю. В., Кислов О. А. Об одном способе измерения малых дальностей. *Радиоприемные устройства.* 1972;(110):63–67.

44. Разгоняев Ю. В. Об определении расстояния до движущегося объекта рециркуляционным методом. *Методы и устройства формирования и обработки сигналов*. 1979;(418):21–24.
45. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Зависимость автодинных характеристик от внутренних параметров СВЧ генераторов. *Радиотехника*. 2012;(6):24–46. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/11174>
46. Носков В. Я., Игнатков К. А., Смольский С. М. Современные гибридно-интегральные автодинные генераторы микроволнового и миллиметрового диапазонов и их применение. Часть 8. Автодины со стабилизацией частоты внешним высокодобротным резонатором. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2013;(12):3–42. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/14008>
47. Song B.-S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(12):1019–1022. DOI: 10.1109/TMTT.1979.1129783.
48. Барташевский Е. Л., Борулько В. Ф., Иванилов В. Е., Тимофеев С. В. Исследование генераторно-излучающих модулей на зеркальном диэлектрическом волноводе с брэгговским резонатором. *Радиотехника*. 1992;(5-6):81–85. Режим доступа: <http://radiotec.ru/article/23616>
49. Хан А. В., Воторопин С. Д., Хан В. А., Прохоровниченко Л. П. Полупроводниковый прибор с междолинным переносом электронов. *Патент RU2361324*, заявлено 15.02.2008.
50. Shiroma G. S., Miyamoto R. Y., Shiroma W. A. A 16-Element Two-Dimensional Active Self-Steering Array Using Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2003;MTT-51(12):2476–2482. DOI: 10.1109/TMTT.2003.819779.
51. Chang K., York R. A., Hall P. S., Itoh T. Active Integrated Antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(3):937–944. DOI: 10.1109/22.989976.

References

1. Page C. H., Astin A. V. Survey of proximity fuze development. *American Journal of Physics*. 1947;15(2):95–110. DOI: 10.1119/1.1990930.
2. Kogan I. M. *Near Radar. Theoretical Basis*. Moskow: Soviet radio; 1973. (In Russ.)
3. Yanovsky F. J. Millimeter-Wave Radar: Principles and Applications. In: Xiao S.-Q., Zhou M.-T., Zhang Y. (eds.) *Millimeter wave technology in wireless Pan, Lan and Man*. New York: CRC; 2008. Chapter 10, pp. 305–375.
4. Charvat G. L. *Small and Short-Range Radar Systems*. CRC Press; 2014.
5. Kostenko A. A., Khlopov G. I. *Coherent Systems of Short-Range and Ultra-Short-Range Radars of Millimeter Wavelength Range*. Kharkiv, Ukraine: Kontrast; 2015. (In Russ.)
6. Boric-Lubecke O., Droitcour A. D., Lubecke V. M., Park B.-K., Singh A. (eds.) *Doppler Radar Physiological Sensing*. New York: John Wiley & Sons; 2016. DOI: 10.1002/9781119078418.

7. Changzhi Li, Jenshan Lin. *Microwave noncontact motion sensing and analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken; 2014. DOI: 10.1002/9781118742556.
8. Nguyen C., Kim S. *Theory, Analysis and Design of RF Interferometric Sensors*. Springer Science+Business Media; 2012.
9. Kim S., Nguyen C. A Displacement Measurement Technique Using Millimeter-Wave Interferometry. *IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques*. 2003;51(6):1724–1728. DOI: 10.1109/TMTT.2003.812575.
10. Atayants B. A., Davydochkin V. M., Ezersky V. V., Parshin V. S., Smolskiy S. M. *Precision Short-Range Radar Systems for Industrial Applications*. Moscow: Radiotekhnika; 2012. (In Russ.)
11. Noskov V. Ya., Bogatyrev E. V., Ignatkov K. A. The principle of constructing an airborne radar sensor for detecting fast-moving targets. *Successes of Modern Electronic Engineering*. 2019;(12):16–22. (In Russ.) DOI: 10.18127/j20700784-201912-03.
12. Smolskiy S. M., Generalov M. K. Homodyne and autodyne configurations of short-range radar systems. *Telecommun. Sciences*. 2010;1(1):14–23. Available at: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/29985>
13. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integrated autodyne oscillators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 1. Technological achievements. *Successes of Modern Electronic Engineering*. 2006;(12):3–30. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/2218>
14. Utagawa H., Matsui T. Microwave/millimeter wave sensor apparatus. *Patent US8212718B2*, March 31, 2008.
15. Usanov D. A., Scripal Al. V., Scripal An. V. *Physics of Semiconductor RF and Optical Autodynes*. Saratov: Saratov University; 2003. (In Russ.)
16. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A., Mishin D. Ya., Chupahin A. P. Modern hybrid-integrated autodyne generators of microwave and millimeter ranges and their application. Part 11. Fundamentals of Autodyne Implementation. *Advances in Modern Radio Electronics*. 2019;(2):5–33. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/article/22689>
17. Damgov V. N. *Nonlinear and parametric phenomena. Theory and Applications in Radiophysical and Mechanical Systems*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.; 2004.
18. Landa P. S. *Nonlinear Oscillations and Waves in Dynamical Systems*. Springer-Science+ Business Media, B.V.; 1996.
19. Smolskiy S. M., Soloviev M. A. Small-signal theory of transistor autodyne with frequency modulation. *Radio Transmitting and Receiving Devices. MEI Proceedings*. 1977;(317):12–14. (In Russ.)
20. Jefford P. A., Howes M. S. Modulation schemes in low-cost microwave field sensor. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1985;31(8):613–624. DOI: 10.1109/TMTT.1983.1131559.
21. Zakarlyuk N. M. Autodyne response spectrum of a frequency modulated generator. *Apply Millimeter and Submillimeter Radio Waves*. Kharkiv: IRE Academy of Sciences of Ukraine. 1991:56–65. (In Russ.)

22. Komarov I. V., Smolskiy S. M. *Fundamentals of Short-Range FM Radar*. Norwood, MA, USA: Artech House; 2003.
23. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. An Analysis of the Autodyne Effect of Oscillators with Linear Frequency Modulation. *Russian Physics Journal*. 2008;51(6):610–618. DOI: 10.1007/s11182-008-9083-5.
24. Varavin A. V., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Popov I. V. Autodyne Gunn-diode transceiver with internal signal detection for short-range linear FM radar sensor. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2010;69(5):451–458. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v69.i5.80.
25. Votoropin S. D., Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integral autodyne microwave and millimeter wave oscillators and their application. Part 5. Investigations of frequency modulated autodyne. *Advances in Modern Radio Electronics*. 2009;(3):3–50. (In Russ.) Available at: <http://81.177.3.94/article/5917>
26. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Mathematical Model of FM Autodyne Radar. In: *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Submillimeter Waves (MSMW'16)*, Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. A-25, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538000.
27. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Main Expressions for Analysis of Signals and Noise of Autodyne FM Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)*, Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. A-9, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7538019.
28. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Ermak G. P., Vasiliev A. S. Peculiarities of Signal and Noise Characteristics of FMCW Autodyne Radar. *9-th International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'16)*, Kharkov, Ukraine, June 20–24, 2016. A-10, pp. 1–4. DOI: 10.1109/MSMW.2016.7537984.
29. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. V., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Peculiarities of signal formation of the autodyne short-range radar with linear frequency modulation. *Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekh. radioaparatobuduv.* 2016;(67):50–57. DOI: 10.20535/RADAP.2016.67.50-57.
30. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Radars with Frequency Modulation According to Symmetric Saw-Tooth Law. *Telecommunication and Radio Engineering*. 2016;75(17):1551–1566. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i17.40.
31. Noskov V. Ya., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Fluctuation Features of Autodyne Radar with Frequency Modulation. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2017;60(3):123–131. DOI: 10.20535/S0021347017030049.
32. Kryzhanovskyi V. S., Ermak G. P., Vasiliev A. S., Varavin A. V., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Smolskiy S. M. Signals From a Moving Object of Autodyne Radars with Linear Frequency

Modulation. *IEEE Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS), Kyiv, Ukraine, August 29–31, 2017*, pp. 93–98. DOI: 10.1109/MRRS.2017.8075036.

33. Ermak G. P., Vasiliev A. S., Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. Moving object signal peculiarities of an autodyne radar with symmetric saw-tooth FM law. *International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), Odessa, Ukraine, September 11–15, 2017*, pp. 1–4. DOI: 10.1109/UkrMiCo.2017.8095378.

34. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P. Moving Object Signal Analysis of Autodyne Radars with Linear Types of Frequency Modulation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2017;1(1):25–54. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2017.1.1.002.

35. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Chupahin A. P., Vasiliev A. S., Ermak G. P., Smolskiy S. M. Signals of Autodyne Sensors with Sinusoidal Frequency Modulation. *Radioengineering*, 2017;26(4):1182–1190. DOI: 10.13164/re.2017.1182.

36. Kurokawa K. Injection locking of microwave solid-state oscillators. *Proceedings of the IEEE*. 1973;61(10):1386–1410. DOI: 10.1109/PROC.1973.9293.

37. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A. About applicability of quasi-static method of autodyne systems analysis. *Radioelectronics and Communications Systems*. 2014;57(3):139–148. (In Russ.) DOI: 10.3103/S0735272714030054.

38. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M., Ignatkov K. A. Influence of attended FM of the AM oscillator on the autodyne signal formation. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(1):51–83. (In Russ.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.1.004.

39. Nagano S., Akaiwa Y. Behavior of Gunn diode oscillator with a moving reflector as a self-excited mixer and a load variation detector. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1971;19(12):906–910. DOI: 10.1109/TMTT.1971.6373339.

40. Takayama Y. Doppler signal detection with negative resistance diode oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973;21(2):89–94. DOI: 10.1109/TMTT.1973.1127929.

41. Noskov V. Ya., Smolskiy S. M. Autodyne effect in oscillators with amplitude modulation. *Radiotekhnika*. 2011;(2):21–36. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/8545>

42. Woodyard J. R. *Radio system for distance and velocity measurement. Pat. US2424263*, February 23, 1943.

43. Sharov Yu. V., Kislov O. A. About one method of measuring short ranges. *Radio Receivers*. 1972;(110):63–67. (In Russ.)

44. Razgonyaev Yu. V. On determining the distance to a moving object by the recirculation method. *Methods and Devices for the Formation and Processing of Signals*. 1979;(418):21–24. (In Russ.)

45. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Autodyne characteristic dependence on the UHF oscillator's inherent parameters. *Radio Engineering*. 2012;(6):24–46. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/11174>

46. Noskov V. Ya., Ignatkov K. A., Smolskiy S. M. Modern hybrid-integral autodyne microwave and millimeter wave oscillators and their application. Part 8. Autodyne with frequency stabilization by an external high-quality resonator. *Advances in Modern Radio Electronics*. 2013;(12):3–42. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/14008>
47. Song B.-S., Itoh T. Distributed Bragg Reflection Dielectric Waveguide Oscillators. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1979;27(12):1019–1022. DOI: 10.1109/TMTT.1979.1129783.
48. Bartashevskiy E. L., Borulko V. F., Ivanilov V. E., Timofeev S. V. Investigation of generator-emitting modules based on a mirror dielectric waveguide with a Bragg resonator. *Radio Engineering*. 1992;(5-6):81–85. (In Russ.) Available at: <http://radiotec.ru/article/23616>
49. Khan A. V., Votoropin S. D., Khan V. A., Prokhorovnichenko L. P. Semiconductor device with intervalley electron transfer. Patent RU2361324, February 15, 2008. (In Russ.)
50. Shiroma G. S., Miyamoto R. Y., Shiroma W. A. A 16-Element Two-Dimensional Active Self-Steering Array Using Self-Oscillating Mixers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2003;MTT-51(12):2476–2482. DOI: 10.1109/TMTT.2003.819779.
51. Chang K., York R. A., Hall P. S., Itoh T. Active Integrated Antennas. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 2002;50(3):937–944. DOI: 10.1109/22.989976.

Информация об авторах

Носков Владислав Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Богатырев Евгений Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники Сибирского федерального университета; Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

Игнатков Кирилл Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектроники и телекоммуникаций, заместитель директора по науке Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина; Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32.

Шайдуров Кирилл Дмитриевич, старший преподаватель департамента Радиоэлектроники и связи Института 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

Vladislav Ya. Noskov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications of the Institute

of Radio Electronics and Information Technologies – RTF Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Evgenny V. Bogatyrev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Engineering, Siberian Federal University; 79 Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russia.

Kirill A. Ignatkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Deputy Director for Science, Institute of Radio Electronics and Information Technology – RTF of the Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Kirill D. Shaydurov, Senior Lecturer of the Department of Radio Electronics and Communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies – RTF, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin; 32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia.

Поступила / Received: 21.06.2020

Принята в печать / Accepted: 20.07.2020

Оригинальная статья / Original Paper

DOI 10.15826/urej.2020.4.2.002

УДК 528.13

Brief Analysis of GNSS and LNSS Vulnerabilities with the Focus on Spoofing for the Marine Autonomous Surface and Undersea Vehicles

E. OchinMaritime University of Szczecin, Faculty of Navigation,
1-2 Wały Chrobrego Str., Szczecin, 70-500, Poland E.Ochin@AM.Szczecin.pl**Abstract**

Positioning and navigation problems have proven to be well-developed in all areas of the Earth (on the surface of the lithosphere and hydrosphere, in the atmosphere, troposphere and stratosphere), except the hydrosphere. This article is devoted to the problem of a analysis of the state of the underwater positioning and navigation and practically the undeveloped problem of the underwater navigation safety. Here we restrict ourselves to analyzing the possibility of transferring the well-established GNSS technology to the underwater world. Unfortunately, GNSS signals attenuate very quickly in water, thus all GNSS-like technologies are of the local nature, based on the transformation of the electromagnetic wave of GNSS signals into an acoustic wave. Therefore, we use the term LNSS (Local Navigation Satellite Systems) to refer to this underwater technology.

Keywords

GNSS, LNSS, Local Navigation Satellite Systems, Undersea LNSS, Jamming, Meaconing, Spoofing, Self-Spoofing, Spoofing Detection

For citation

Ochin E. Brief Analysis of GNSS and LNSS Vulnerabilities with the Focus on Spoofing for the Marine Autonomous Surface and Undersea Vehicles. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):167–187. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.002.

Краткий анализ уязвимостей GNSS и LNSS с акцентом на спуфинг морских надводных и подводных автономных аппаратов

Е. Ф. ОчинЩецинский морской университет,
Республика Польша, 70-500, г. Щецин, ул. Валы Хроброго, 1-2 E.Ochin@AM.Szczecin.pl**Аннотация**

Проблемы позиционирования и навигации хорошо зарекомендовали себя во всех областях Земли (на поверхности литосферы и гидросфера).

ры, в атмосфере, тропосфере и стратосфере), за исключением гидросферы. Данная статья посвящена проблеме анализа состояния подводного позиционирования и навигации и практически неразвитой проблеме безопасности подводного плавания. Здесь мы ограничиваемся анализом возможности передачи устоявшейся технологии GNSS в подводный мир. К сожалению, сигналы GNSS очень быстро затухают в воде, поэтому все технологии, подобные GNSS, носят локальный характер и основаны на преобразовании электромагнитной волны сигналов GNSS в акустическую волну. Поэтому мы используем термин LNSS (Локальные навигационные спутниковые системы) для обозначения этой подводной технологии.

Ключевые слова

ГНСС, ЛНСС, локальные навигационные спутниковые системы, подводная ЛНСС, джамминг, меконинг, спуфинг, самоспуфинг, обнаружение спуфинга

Для цитирования

Очин Е. Ф. Краткий анализ уязвимостей GNSS и LNSS с акцентом на спуфинг морских надводных и подводных автономных аппаратов. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):167–187. (На англ. яз.) DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.002.

1. Introduction

GNSS [1–7] is the common name for the four Global Navigation Satellite Systems GPS (USA), GLONASS (USSR, RF), BeyDou-2 (PRC), GALILEO (EU), the main purpose of which is the ground and air positioning, navigation and timing on land, in the sea and underwater of mobile vehicles at anytime, anywhere in the world.

RNSS is the common name for two Regional Navigation Satellite Systems

- NavIC (NAVigation with Indian Constellation), Government of India,
- QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), Government of Japan, whose main purpose is the same as the GNSS goal.

Until 2016, NavIC was called IRNSS – Indian Regional Navigation Satellite System. NavIC is an autonomous system designed to cover the Indian region and 1500 km around the Indian mainland. The system consists of 7 satellites.

QZSS operated by QZS System Service Inc. QZSS complements GPS to improve coverage in the East Asia and Oceania. The system consists of 4 satellites and will be expanded up to 7 ones for autonomous capability by 2023.

GNSS pinpoint latitude, longitude and altitude to about a meter of accuracy and provide nanosecond precise time anywhere on the Earth.

GNSS is a dual-use system: a standard civil location service (SPS) and a military precise positioning service (PPS). The access to PPS is controlled using cryptography and other information security methods. Since the material in this article is designated for the civil community, we will only consider SPS and when considering GNSS goals, we will mainly focus on GNSS positioning as the main goal of GNSS, without which it's pointless to discuss the GNSS navigation and timing.

GNSSs are composed of three different complementary segments, as shown in Fig. 1:

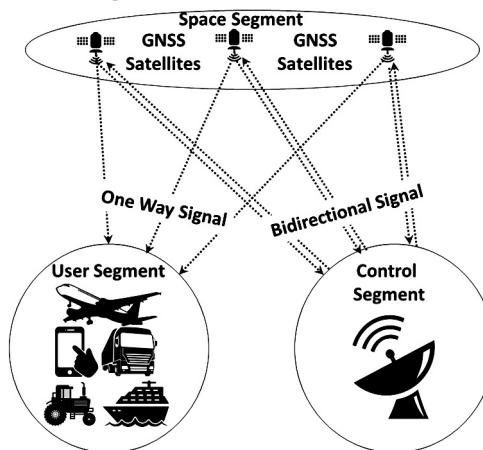


Fig. 1. GNSS consists of three segments: the Space Segment, the Control (or Ground) Segment, and the User Segment

Рис. 1. GNSS состоит из трех сегментов: космический сегмент, управляющий сегмент и пользовательский сегмент

The Space Segment, consisting of navigation satellites, is a combination of sources of radio navigation signals that simultaneously transmit a significant amount of overhead information. The main functions of each satellite are the generation and emission of radio signals necessary for navigational determinations of consumers and the control of onboard satellite systems.

The Control Segment tracks and maintains the satellites in space. The control segment monitors the satellite health and it maintains the satellite orbits as desired. Furthermore, the control segment updates the satellite clock corrections and ephemerides, among other parameters, encapsulated in the navigation message. The control segment includes a cosmodrome, a command and measurement complex and a control center. The spaceport provides the launch of satellites into the required orbits during the initial deployment of the navigation system, as well as the periodic replenishment of satellites as they fail or resource exhaustion.

The User Segment combines all user installations and their supporting equipment. A custom installation typically consists of an antenna, a GNSS receiver, a processor, a computer, and I/O devices. The field of view, measures the propagation time of these signals and Doppler frequency shifts, converts them to **pseudorange** and pseudo range variation rates and determines the spatial position and speed while setting the GNSS time.

To solve navigation problems, a specialized built-in computer is provided in the consumer equipment. The variety of existing consumer equipment meets the needs of land, sea, aviation, space etc. consumers (Table 1).

Table 1. The GNSS application on land, above water, in the air and (most importantly and almost not developed) underwater (sorted alphabetically)

Таблица 1. Применение GNSS на суше, над водой, в воздухе и (что наиболее важно и почти не разработано) под водой (отсортировано по алфавиту)

	Agriculture		Power grids (hydro, heat, wind, solar)
	Armament		Search and Rescue
	Building		Space navigation
	Banking systems (Online trading, Stock and Mobile markets, ATMs)		Transport (Aviation, Cars, Trains Sea vessels)
	Communication systems		Search and Rescue
	Geodesy and cartography		Underwater LNSS (GNSS-like) navigation
	Personal navigation		

Positioning and navigation problems have proven to be well-developed in all areas of the Earth (on the surface of the lithosphere and hydrosphere, in the atmosphere, troposphere and stratosphere), except the hydrosphere. This article is devoted to the problem of a brief analysis of the state of underwater positioning and under-

water navigation and practically the undeveloped problem of the underwater navigation safety. Here we restrict ourselves to analyzing the possibility of transferring the well-established GNSS technology to the underwater world. Unfortunately, GNSS signals attenuate very quickly in water, therefore all GNSS-like [8] technologies are of the local nature, based on the retransmission of the electromagnetic wave of GNSS signals into the acoustic wave

Hence, hereinafter we will use the term LNSS (Local Navigation Satellite Systems) to refer to this technology.

2. GNSS Vulnerabilities

When using GNSS, vehicle information protection is required. GNSS is vulnerable to Interference, Jamming, spoofing and self-spoofing attacks (Fig. 2).

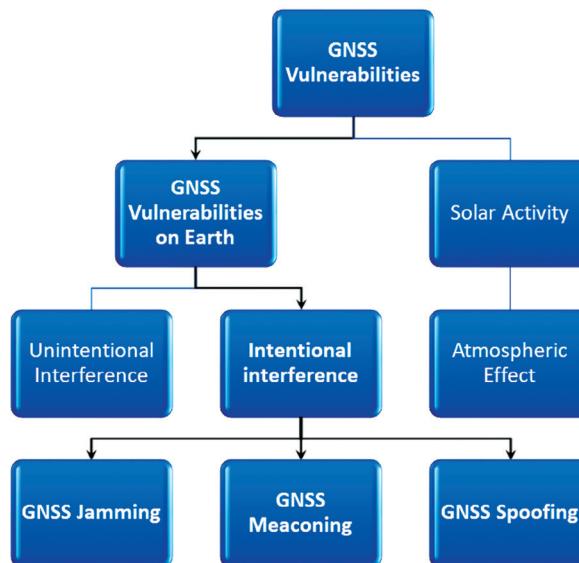


Fig. 2. The main GNSS Vulnerabilities

Рис. 2. Основные уязвимости GNSS

Here we do not consider the influence of Solar Activity and the related Atmospheric Effect on the GNSS accuracy, and do not consider the Unintentional Interference (Industrial Electromagnetic Interference, Multipath and Jamming). We focus on the Intentional Interference, including

1. GNSS Jamming Attacks.
2. GNSS Meaconing Attacks¹.

¹ Meaconing can be considered as a special case of spoofing, however, in the literature it is usually allocated in a separate class due to the historical features of the use of this technology in electronic warfare.

3. GNSS Spoofing Attacks.

4. GNSS Self-Spoofing Attacks [9].

The problem of dealing with jamming is well-developed. The most difficult type of attacks is spoofing. The spoofer can transmit false signals from a distance of several tens or hundreds of meters from the victim. The spoofing can be divided into simple, intermediate, or complex attacks in terms of their effectiveness. In this article, we briefly look at Interference and Jamming, as well as the algorithms for detecting meaconing and Spoofing based on one or two receivers. We also overview briefly the issues of anti-meaconing and anti-spoofing.

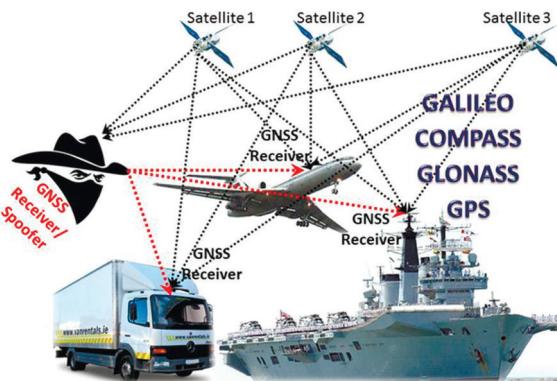


Fig. 3. GNSS Spoofing. Spoofing interferes with the structure of GNSS transmission and deliberate modification of the receiver's route. This is a terrorist, information attack involving the use of original data from a reliable source of information to fraudulent customer security by sending distorted or false data in its place

Рис. 3. Спуфинг GNSS. Спуфинг изменяет структуру передачи данных GNSS и преднамеренно модифицирует маршрут пользователя. Это террористическая информационная атака, включающая использование оригинальных данных из надежного источника информации для преодоления безопасности клиентов путем отправки на их место искаженных или ложных данных

GNSS signals have low power, which means that a weak source of interference can cause the receiver to fail or create dangerously misleading information. So far, the biggest concern for GNSS has been its possible jamming by masking the satellite signal with noise. The complete loss of GNSS is fairly easy to detect, but barely noticeable movements due to jamming can seem like spoofing, which can be very difficult to detect.

Spoofing is more insidious: a false signal from a ground station that simply knocks down the satellite receiver. For simplicity, jamming leads to the death of the receiver, and forgery – to the fact that the receiver is lying. However, as explained below, this state-

ment is not technically correct, but it provides a broad overview of what the main difference between interference and spoofing is.

2.1. Why GNSS is relatively easily affected by vulnerabilities

The qualitative analysis shows that the radiation energy of the satellite's transmitting antenna significantly decreases when approaching the Navigator's receiving antenna (Fig. 4).

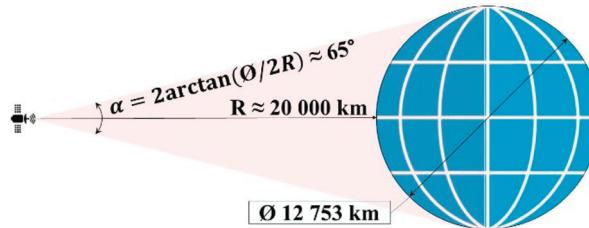


Fig. 4. The radiation flux density decreases with the distance from the satellite

Рис. 4. Плотность потока излучения уменьшается с удалением от спутника

The energy that electromagnetic waves carry over time is distributed over a larger and larger surface (Fig. 5). The quantitative analysis shows that the energy transmitted through the surface of a single site (shown in blue in Fig. 5) per unit time, i.e., the radiation flux density, decreases with distance from the source as

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t} \frac{1}{R^2} \quad (1)$$

consequently, the study flux density decreases inversely with the square of the distance to the satellite's antenna.

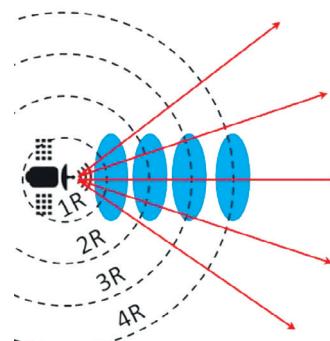


Fig. 5. The radiation flux density decreases with distance from the satellite in inverse proportion to the square of the distance to the satellite's antenna

Рис. 5. Плотность потока излучения уменьшается с расстоянием от спутника обратно пропорционально квадрату расстояния до антенны спутника

If we take into account that the GNSS orbits are at altitudes of about 20,000 km, then equation (1) can be written as

$$I = \frac{\Delta W}{S\Delta t} = \frac{\Delta W}{4\pi\Delta t} \frac{1}{400,000,000,000,000,000} \quad (2)$$

This means that the radiation flux density upon reaching the navigator's antenna decreased 400 trillion times! From here we make an exceptional first important conclusion.

With the help of a primitive jammer at the cost of tens of dollars, any uneducated terrorist can suppress the GNSS operation within a radius of several tens of meters. If you need to increase the range of the jammer to several tens of kilometers, you will have to pay several thousand dollars, unless, of course, military jammers are sold to you.

2.2. Why {GNSS + INS} partially block vulnerabilities

The exceptional second important conclusion is as follows. To ensure the safe piloting of autonomous vehicles, GNSS should be viewed as an aid to positioning and navigation. Wherever possible, we should equip our unmanned vehicles with INS, etc.

An inertial navigation system is a navigation device that uses motion sensors to continuously track the position, orientation, and speed of a vehicle without the need of external links.

The application of microelectromechanical systems (MEMS) in INS is of particular significance for commercial unmanned vehicles.

Several types of INS have been developed for maritime, air and land applications. A number of ground moving objects have odometrical coordinate systems based on counting the number of revolutions of a standard wheel. The information on the covered distance is obtained by the odometer, and information on the direction is obtained by the gyroscope. If the tool starts from a known position, then the information about the distance and direction can be used to determine the position at any time. Being an environment-independent system, INS provides the same high accuracy as GNSS, but for a short time after initialization. Moreover, INS provides high-speed data updates comparable to GNSS. The main disadvantage of INS is that they accumulate an invalid positioning error over long time intervals.

The combination of GNSS and INS overcomes the limitations of both systems.

Concluding the introduction, we would like to pay attention to Fig. 6, which shows the main focus of this article.



Fig. 6. Two closely related classes of GNSS problems

Рис. 6. Два тесно связанных класса проблем GNSS

The devil is not so terrible as he is painted – it's about jamming and spoofing. If the “Spoofing Detection” subsystem has detected an attack, the processor will switch the navigation to the INS subsystem and if the GNSS “signal loss time” and the corresponding accumulated error are valid for these INS, then it will return to GNSS navigation.

3. Classification of Marine Unmanned Vehicle

Unmanned Vehicles appeared in the late 80s. DARPA¹ pioneered this technology. To broaden its horizons, DARPA created the biennial AUV conference. However, even at present, the terminology associated with the design and use of marine unmanned vehicles (MUV) still requires significant systematization, therefore in this article we use the following basic abbreviations, designations, terms and their definitions (Fig. 7 and Table 2), which the author has collected and systematized from various sources (111, etc.).

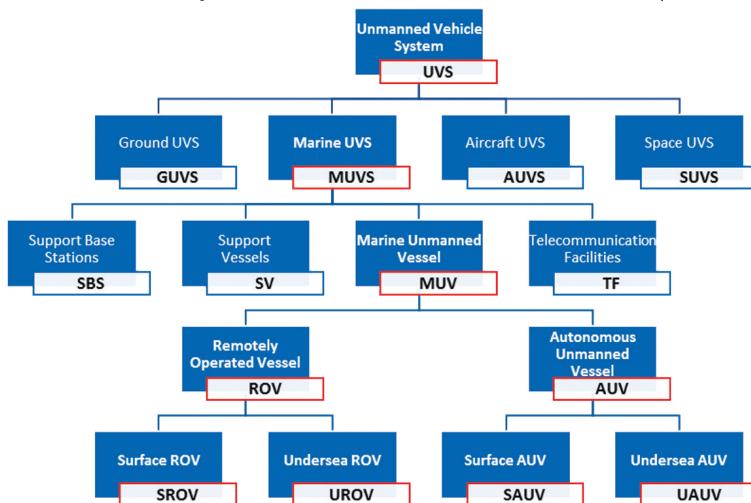


Fig. 7. Classification of Marine Unmanned Vehicles

Рис. 7. Классификация морских беспилотных аппаратов

¹ <https://www.darpa.mil/> (Accessed: 17 July 2020)

Table 2. Main abbreviations, designations, terms and their definitions**Таблица 2. Основные сокращения, обозначения, термины и их определения**

Object	Description
Marine Unmanned Vessel System (MUVS)	The infrastructure for providing the mission for marine unmanned vehicles, representing the combination of marine unmanned vessels, manned support vehicles, support base stations, telecommunications facilities, etc.
Support Base Station (SBS)	The Support Base Station (SBS) is the ground and /or surface part of MUVS, ensuring the execution of the mission for marine unmanned vessels.
Marine Unmanned Vessels (MUV)	Marine Unmanned Vessels (MUV) is a surface or submarine vessel that does not have a command on board and is capable of performing MisUV autonomously using an on-board computer and/or via remote control of a dispatcher or dispatch computer.
The Given Route (GR) of a UV	The Given Route (GR) of a MUV is the route of a MUV on the water surface and/or underwater from one 3D point of the sea to another 3D point of the sea through open areas of the sea and/or narrowness (straits, channels, rivers and lakes). The GR forms the SBS.
The Mission of a UV (MisUV)	The Mission of a UV (MisUV) is the precise preprogrammed trajectories of a MUV on the water surface and/or underwater from one 3D point of the sea to another 3D point of the sea through open areas of the sea and/or narrowness (Straits, channels, rivers and lakes). The MUV forms the SBS as pre-planning of all MUV courses based on the study of the navigation situation along the mission using lots, large-scale sea maps, bathymetric data, meteorological bulletins, etc.
The navigation padding of the MUV	The navigation padding is a continuous control of the MUV movement using an onboard computer with maximum proximity to the MisUV during the entire mission.
Remotely Operated Vessel (ROV)	Remotely Operated Vessel (ROV) is a MUV that is capable of performing MisUV via remote control of a dispatcher or dispatch.
Surface ROV (SROV)	Surface Remotely Operated Vessel (SROV) is a surface ROV that is capable of performing MisUV via remote control of a dispatcher or dispatch computer and maneuvers in two dimensions.
Undersea ROV (UROV)	Surface Remotely Operated Vessel (SROV) is an undersea ROV that is capable of performing MisUV by remote control of a dispatcher or dispatch computer and maneuvers in three dimensions.
Autonomous Undersea Vessel (AUV)	Autonomous Undersea Vessel (AUV) is a MUV that is capable of performing MisUV autonomously using an on-board computer and maneuvers in three dimensions.
Surface AUV (SAUV)	Surface Autonomous Undersea Vessel (SAUV) is a surface AUV that is capable of performing MisUV autonomously using an on-board computer and maneuvers in two dimensions.
Undersea AUV (UAUV)	Undersea Autonomous Undersea Vessel (SAUV) is an undersea AUV that is capable of performing MisUV autonomously using an on-board computer and maneuvers in three dimensions.

Among the many UVSs (Fig. 7) in this article, we limit ourselves to considering only the Marine Unmanned Vehicle System (MUVS). Table 2 helps to understand the abbreviations, designations and terms.

The main problem of the classification is that, on the one hand, it is important to preserve the well-established abbreviations, designations, terms and their definitions, and on the other hand, it is important to adhere to the general principles of object classification. Hopefully, we managed to find a middle ground in this difficult search.

4. Underwater navigation

Omitting many important historical and engineering details, we consider the basic technologies of underwater LNSS positioning and LNSS navigation.

The simplest satellite positioning technology is the LNSS based on the popup tethered GNSS antenna (Fig. 8a). This technology is used to refine the $\{x, y\}$ coordinates (the $\{z\}$ coordinate is calculated based on a water pressure sensor and knowledge of the sea level altitude). The navigation problem is solved with the antenna towing or the Inertial Navigation System (INS).

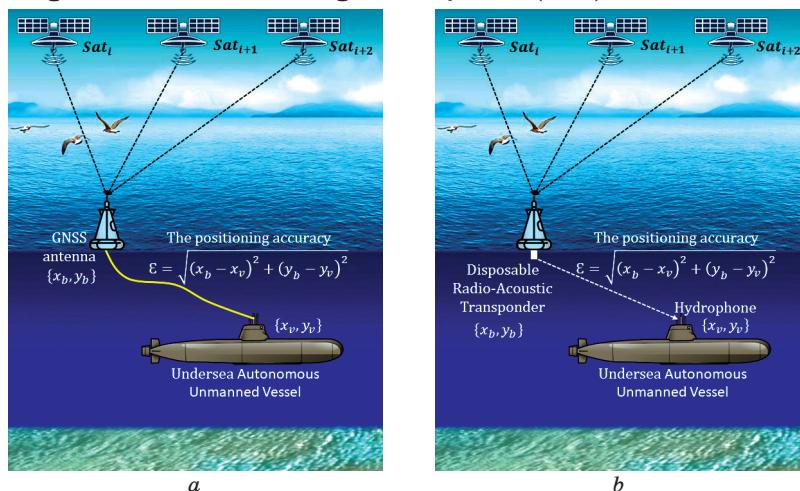


Fig. 8. LNSS Position: a – based on popup tethered GNSS antenna, b – based on tethered Disposable Radio-Acoustic Transponder

Рис. 8. LNSS-позиционирование: а – на основе всплывающей привязанной антенны GNSS, б – на основе привязанного одноразового радиоакустического транспондера

At greater depths, the use of the cable becomes difficult and one has to use the LNSS technology based on Tethered Disposable Radio-Acoustic Transponder (Fig. 8b). The Transponder can be

tethered from an UAUV or installed from a ship or aircraft. In this case, navigation is only possible with INS¹.

The underwater navigation [8; 10–12] has become widespread as a complex of technologies, which in the literature are usually described together – Short Baseline (SBL) (Fig. 9a), Ultra-Short Baseline (USBL) (Fig. 9b), and Long Baseline (LBL) (Fig. 9c). These three technologies have a lot in common, but, of course, they differ significantly.

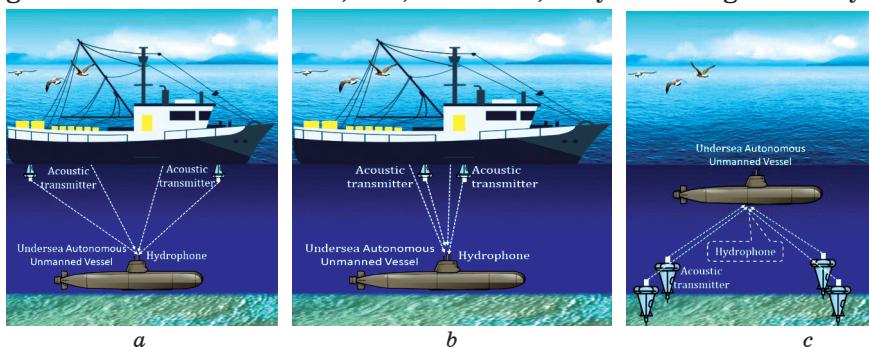


Fig. 9. a – Short Baseline (SBL), b – Ultra-Short Baseline (USBL), c – Long Baseline (LBL). The positions of each acoustic transmitter are specified in geographic coordinates using GNSS or (for SBL and USBL) in relative coordinates, for example, relative to the center of the support vessel as {0,0,0}

Рис. 9. а – Короткая базовая линия (SBL), б – Ультра-короткая базовая линия (USBL), с – Длинная базовая линия (LBL).

Положение каждого акустического передатчика указывается в географических координатах с использованием GNSS или (для SBL и USBL) в относительных координатах, например, относительно центра судна поддержки как {0,0,0}

They are similar in the following parameters. Here, the trilateration method, well studied in geodesy, is used. Determining the location of the $\{x, y\}$ of undersea UAUV is based on measuring the distances (ranges) from the acoustic transmitters to the hydrophone of the Vessel in terms of the speed and propagation time of acoustic waves. If the range of up to three acoustic transmitters is measured and their coordinates are known the coordinates of the vessel's position may be determined. Due to the different accuracy of the “clocks” on the acoustic transmitters and in the hydrophone and some other reasons, the distances determined by the acoustic transmitters may be defined with an error. This erroneous distance is called “pseudo-range”. If we omit the

¹ An inertial navigation system (INS) is a navigation device that uses a computer, motion sensors (accelerometers) and rotation sensors (gyroscopes) to continuously calculate by dead reckoning the position, the orientation, and the velocity (direction and speed of movement) of a moving object without the need for external references.

problem of error analysis, then we can write a system of equations connecting the coordinates of acoustic transmitters and UAUV

$$\begin{cases} (x_1 - x_v)^2 + (y_1 - y_v)^2 = D_1^2 \\ (x_2 - x_v)^2 + (y_2 - y_v)^2 = D_2^2, \\ (x_3 - x_v)^2 + (y_3 - y_v)^2 = D_3^2 \end{cases}, \quad (3)$$

where D_i , $i = \overline{1,3}$ – the measured distances up to three (Fig. 8) acoustic transmitter, $\{x_i, y_i\}$ $i = \overline{1,3}$ – the known coordinates of three acoustic transmitters, $\{x_v, y_v\}$ – the unknown coordinates of UAUV.

The solution to the system of equations (1) is the calculated coordinates of UAUV (4):

$$\begin{cases} x_v = \frac{(y_2 - y_1)(D_2^2 - D_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2) - (y_3 - y_2)(D_1^2 - D_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2)}{2((y_3 - y_2)(x_1 - x_2) - (y_2 - y_1)(x_2 - x_3))} \\ y_v = \frac{(x_2 - x_1)(D_2^2 - D_3^2 - y_2^2 + y_3^2 - x_2^2 + x_3^2) - (x_3 - x_2)(D_1^2 - D_2^2 - y_1^2 + y_2^2 - x_1^2 + x_2^2)}{2((x_3 - x_2)(y_1 - y_2) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3))} \end{cases} \quad (4)$$

The coordinates $\{x_v, y_v, z_v\}$ of UAUV are estimated if the depth's calculation is added to the geographic coordinates using measured water pressure, i.e. $\{z_v\} = f(\text{water pressure})$.

Without binding to GNSS, if the origin is as $\{x_v, y_v, z_v\} = \{0, 0, 0\}$, i.e. bind to some point of the supply vessel, then the natural depth of immersion is $\{z_v\} = 0$ at time $t = 0$.

Many hydroacoustic synchronous rangefinder navigation systems are also known. Examples include the Norwegian HiPAP from Kongsberg, the French GAPS from IXBLUE, as well as the huge contribution to these technologies by the American Teledyne, the German EvoLogics.de, the English Sonardyne, of course American DARPA (Fig. 10) and many others.

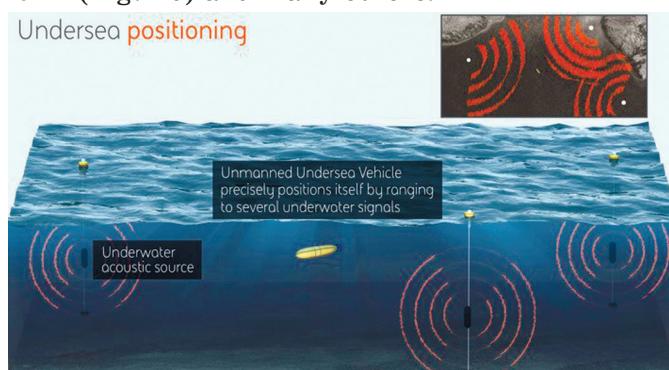


Fig. 10. DARPA program plunges into underwater positioning systems
From <https://newatlas.com/darpa-underwater-navigation/43472/>
(Accessed: 17 July 2020)

Рис. 10. Программа DARPA по системам подводного позиционирования
Источник <https://newatlas.com/darpa-underwater-navigation/43472/>
(Доступ: 17 июля 2020 г.)

5. GNSS-equipped Intelligent Buoys (GIB)

GIB provides real-time absolute coordinates, speed and trajectory of the movement of submarines, divers, remotely controlled underwater vehicles, autonomous manned and unmanned underwater vehicles. Based on the GIB, LNSSs are implemented, which can be classified as LBL acoustic positioners. GNSS-equipped Intelligent Buoys can be drifting or moored. The number of GIBs is determined by the size of the controlled area and the positioning accuracy.

We consider one of the many options for constructing an LNSS based on the GIB, indicated in Fig. 11 as the Disposable Radio-Acoustic Transponders.

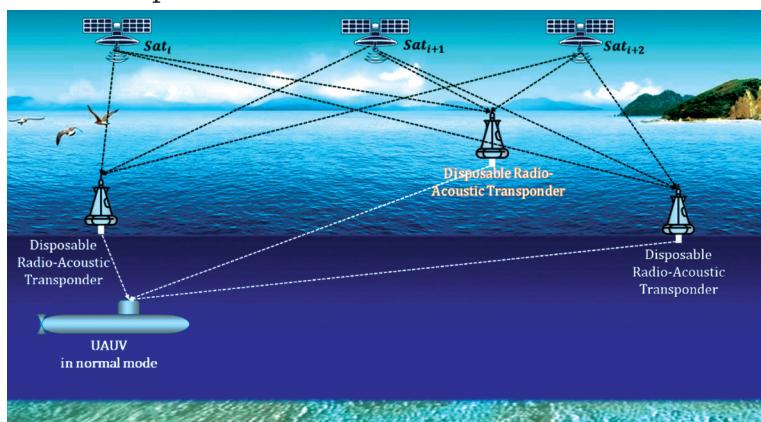


Fig. 11. LNSS Navigation based on three Disposable Radio-Acoustic Transponders of type GIB (Disposable Radio-Acoustic Transponders)

Рис. 11. LNSS-навигация на основе трех одноразовых радиоакустических транспондеров типа GIB (одноразовые радиоакустические транспондеры)

The navigation satellite is a transmitting radio station with known $\{x, y, z\}$ coordinates, which emits directional radio signals. The radio receiver of a GIB measures Δt – the **Time of Arrival** (TOA or ToA, and also ToF – the time of flight) of the radio signal from the satellite to the radio receiver and determines the distance to it $\rho = c \cdot \Delta t$, where c is the speed of electromagnetic waves propagation, approximately equal to the speed of light $c \approx 300,000$ km/s.

In the general case for N satellites (the positioning accuracy increases with the increase in the number of the “visible” satellites)

$$\{\rho_i = \sqrt{(x_i - x_v)^2 + (y_i - y_v)^2 + (z_i - z_v)^2} - \Delta\rho\}, i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

where x_i, y_i, z_i – the known coordinates of the i -th satellite that the i -th satellite transmitted to the vehicle; x_v, y_v, z_v – the unknown coordinates of the vehicle V ; ρ_i – measured pseudorange from the

i-th satellite to the vehicle V with the unknown error $\Delta\rho$, which is the same for all satellites; N – the number of “visible” navigation satellites.

To solve the system of equations (5), relatively complex iterative algorithms are used to calculate $\{x_v, y_v, \Delta\rho\}$, consideration of which is beyond the scope of this article.

Suppose LNSS Navigation is built on three UAUV of the GIB type. In this case it can be shown that the system of equations (6)

$$\begin{cases} (x_1 - x_v)^2 + (y_1 - y_v)^2 = D_1^2 \\ (x_2 - x_v)^2 + (y_2 - y_v)^2 = D_2^2, \\ (x_3 - x_v)^2 + (y_3 - y_v)^2 = D_3^2 \end{cases} \quad (6)$$

where $D_i, i = \overline{1,3}$ – measured distances up to three (Fig. 8) GIB, $\{x_i, y_i\}, i = \overline{1,3}$ – known coordinates of three GIBs, $\{x_v, y_v\}$ – unknown coordinates of UAUV.

The solution to the system of equations (6) is the calculated coordinates UAUV (7):

$$\begin{cases} x_v = \frac{(y_2 - y_1)(D_2^2 - D_3^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2) - (y_3 - y_2)(D_1^2 - D_2^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2)}{2((y_3 - y_2)(x_1 - x_2) - (y_2 - y_1)(x_2 - x_3))} \\ y_v = \frac{(x_2 - x_1)(D_2^2 - D_3^2 - y_2^2 + y_3^2 - x_2^2 + x_3^2) - (x_3 - x_2)(D_1^2 - D_2^2 - y_1^2 + y_2^2 - x_1^2 + x_2^2)}{2((x_3 - x_2)(y_1 - y_2) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3))} \end{cases} \quad (7)$$

The coordinates $\{x_v, y_v, z_v\}$ of UAUV are estimated by adding the depth calculation to geographic coordinates using measured water pressure, i.e. $\{z_v\} = f(\text{water pressure})$.

6. Underwater spoofing

Omitting many extremely important engineering details, let's move on to the main topic of this article – the safety issue of LNSS underwater navigation [13–24].

The spoof (Fig. 12) enters the UAUV area of responsibility quietly, “listens” to GIBs, calculates its own coordinates $\{x_s, y_s, 0\}$. In underwater mode, the spoof calculates its depth $\{z_s\} = f(\text{water pressure})$ and gets its coordinates $\{x_s, y_s, z_s\}$. Listening to UAUV noises, the spoof determines the bearing and distance to UAUV and estimates the target coordinates $\{\tilde{x}_v, \tilde{y}_v, \tilde{z}_v\}$.

Next, the spoof processor solves the inverse problem (8)

$$\begin{cases} (x_1 - \tilde{x}_v + \Delta_x)^2 + (y_1 - \tilde{y}_v + \Delta_y)^2 = (D_1 + d_1)^2 \\ (x_2 - \tilde{x}_v + \Delta_x)^2 + (y_2 - \tilde{y}_v + \Delta_y)^2 = (D_2 + d_2)^2, \\ (x_3 - \tilde{x}_v + \Delta_x)^2 + (y_3 - \tilde{y}_v + \Delta_y)^2 = (D_3 + d_3)^2 \end{cases} \quad (8)$$

where $\{\Delta_x, \Delta_y\}$ – the desired UAUV offset that can be achieved by introducing appropriate delays Δt_i for the GIB signals (9)

$$\begin{cases} \Delta t_1 = d_1 / c \\ \Delta t_2 = d_2 / c, \\ \Delta t_3 = d_3 / c \end{cases} \quad (9)$$

where c is the speed of sound in water (for the given frequency).

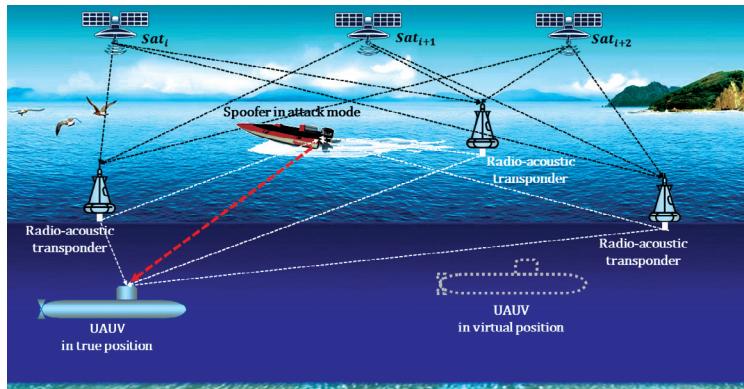


Fig. 12. The Spoofing of LNSS Navigation based on three Disposable Radio-Acoustic Transponders of type GIB

Рис. 12. Спуфинг LNSS-навигации на основе трех одноразовых радиоакустических транспондеров типа GIB

Further, the spoofer uses acoustic radiation directed at the UAUV of increased power compared to the power of acoustic signals from the GIBs. As a result, UAUV “switches” from real GIB signals to fake spoofer signals and solves the already “fake” system of equations (7)

$$\begin{cases} (x_1 - x_v)^2 + (y_1 - y_v)^2 = (D_1 + d_1)^2 \\ (x_2 - x_v)^2 + (y_2 - y_v)^2 = (D_2 + d_2)^2, \\ (x_3 - x_v)^2 + (y_3 - y_v)^2 = (D_3 + d_3)^2 \end{cases} \quad (10)$$

where $\{D_i + d_i\}$, $i = \overline{1,3}$ – measured distances up to three (Fig. 8) “false” GIBs, $\{x_i, y_i\}$ $i = \overline{1,3}$ – known (unmodified by the spoofer) coordinates of the three GIBs, $\{x_v, y_v\}$ – unknown coordinates of UAUV.

The solution to the system of equations (10) is the calculated “false” coordinates UAUV (11).

$$\begin{cases} x_v = \frac{(y_2 - y_1)((D_2 + d_2)^2 - (D_3 + d_3)^2 - x_2^2 + x_3^2 - y_2^2 + y_3^2) - (y_3 - y_2)((D_1 + d_1)^2 - (D_2 + d_2)^2 - x_1^2 + x_2^2 - y_1^2 + y_2^2)}{2((y_3 - y_2)(x_1 - x_2) - (y_2 - y_1)(x_2 - x_3))} \\ y_v = \frac{(x_2 - x_1)((D_2 + d_2)^2 - (D_3 + d_3)^2 - y_2^2 + y_3^2 - x_2^2 + x_3^2) - (x_3 - x_2)((D_1 + d_1)^2 - (D_2 + d_2)^2 - y_1^2 + y_2^2 - x_1^2 + x_2^2)}{2((x_3 - x_2)(y_1 - y_2) - (x_2 - x_1)(y_2 - y_3))} \end{cases} \quad (11)$$

The further development of the spoofing strategy depends on many factors. Here we stop in believe that the main idea of the under-

water LNSS vulnerability in the form of an underwater spoofing attack is clear to the reader.

7. Spoofing detection

If the spoofing detector is stationary and UAUV is moving in a certain direction at the speed V , then the spoofing detector, located on board the UAUV, at the time t' determines its coordinates $\{x'_v, y'_v\}$ in accordance with (3) and (4), adds the calculated depth using the measured water pressure, i.e. $\{z'_v\} = f(\text{water pressure})$ and gets the coordinates $\{x'_v, y'_v, z'_v\}$ of UAUV. After some time the spoofing detector repeats the determination of its coordinates $\{x''_v, y''_v, z''_v\}$.

7.1. The spacing between two positions of UAUV in navigation mode

The measured distance Δd between the hydrophone at the times t' and t'' (12)

$$\Delta d = \sqrt{(x'_v - x''_v)^2 + (y'_v - y''_v)^2 + (z'_v - z''_v)^2}. \quad (12)$$

This Δd must be commensurate with the distance Δd covered by the vehicle over time Δt , i.e.:

$$\Delta d \approx V(t'' - t'). \quad (13)$$

7.2. The spacing between two positions of UAUV in spoofing mode

The measured distance Δd between the hydrophone at the times t' and t'' (14)

$$\Delta d = \sqrt{(x'_v - x''_v)^2 + (y'_v - y''_v)^2 + (z'_v - z''_v)^2} \approx 0, \quad (41)$$

since all the hydrophones in the spoofing zone calculate the same false coordinates and should be commensurable with the distance Δd travelled by the vehicle over time $(t'' - t')$ over time $(t'' - t')$, i.e.:

$$\Delta d \ll V(t'' - t'). \quad (15)$$

7.3. The decisive rule

Comparing equations (9) and (12), the decisive rule for detecting spoofing can be written as (16):

$$\text{if } \Delta d \ll V(t'' - t') \text{ then go to Spoofing.} \quad (16)$$

The main disadvantage of this spoofing detection method is the spoofing dead zone $\{V < V_{\min}\}$, i.e. if UAUV stands still or moves at a low speed less than some experimentally determined speed V_{\min} , then spoofing cannot be detected. To overcome this disadvantage, it is necessary to have two hydrophones on the UAUV hull, spaced as far as possible D_{1-2} (for example, at the stern and at the stem).

In this case, UAUV can stand still or move at any speed. The spoofing detector determines its coordinates using the first hydro-

phone $\{x'_v, y'_v\}$ in accordance with (3) and (4), adds the calculated depth using the measured water pressure, i.e. $\{z'_v\} = f(\text{water pressure})$ and gets the coordinates of $\{x'_v, y'_v, z'_v\}$ UAUV. At the same time, the spoofing detector determines its coordinates using the second hydrophone $\{x''_v, y''_v\}$ in accordance with (3) and (4), adds the calculated depth using the measured water pressure, i.e. $\{z''_v\} = f(\text{water pressure})$ and gets the coordinates $\{x''_v, y''_v, z''_v\}$ of UAUV.

The measured distance between hydrophones should be commensurate with the actual distance between hydrophones in normal UAUV operation (17)

$$\Delta d = \sqrt{(x'_v - x''_v)^2 + (y'_v - y''_v)^2 + (z'_v - z''_v)^2} \approx D_{1-2} \quad (17)$$

and approximately equal to zero in spoofing attack mode (15)

$$\Delta d = \sqrt{(x'_v - x''_v)^2 + (y'_v - y''_v)^2 + (z'_v - z''_v)^2} \approx 0. \quad (18)$$

Comparing equations (17) and (18), the decisive rule for detecting spoofing can be written as (16):

$$\text{if } \Delta d \approx 0 \text{ then go to Spoofing.} \quad (19)$$

where “ \approx ” refers to the definition of some area of uncertainty Δd_{\min} , determined on the basis of statistical studies at the design stage of a real detection system.

8. Simulation of the underwater LNSS

Initially, when the UAUV is launched from a support vessel, it travels down a spiral path before reaching operating depth (Fig. 13). At this point it is necessary to localize the UAUV to help calibrate the INS (if the UAUV has such equipment). Then UAUV performs the assigned mission and returns to the base.

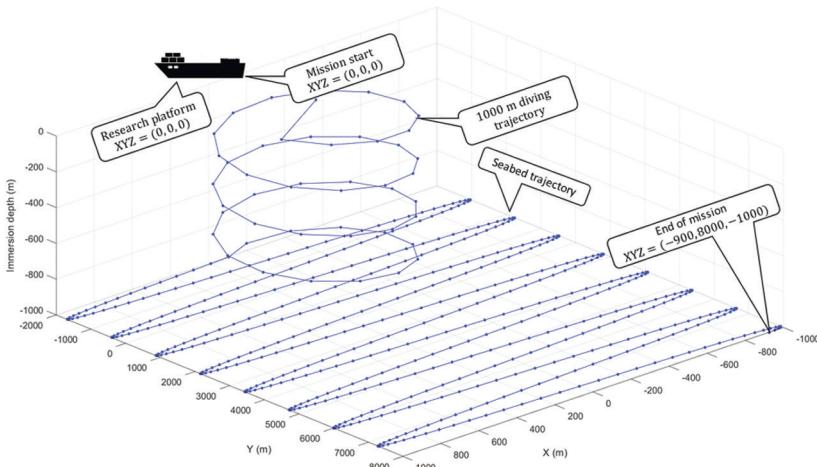


Fig. 13. Subsea LNSS Simulation

Рис. 13. Моделирование подводной LNSS

The basic techniques, which are used to solve the problem of spoofing detection above water, can also be used under water. Since conduction of physical experiments underwater is incomparably more complex task than surface experiments, at this stage of research we tested the principles of underwater spoofing detection using a simulation approach. We are planning to devote the next article “The Modelling and Simulation of the Undersea LNSS Vulnerabilities” to the problems of modelling UAUV trajectories in complex, including under-ice conditions.

9. Conclusion

The trend towards the melting of Arctic ice has led to the prospect of creating new sea routes and perhaps more important potential access to natural resources under the Arctic Ocean. Many countries have shown unusual activity in collecting bathymetric data to determine their sovereign Arctic territory.

Therefore, in conditions of fierce competition in the development of the Earth's hydrosphere, it is necessary not only to design the UAUV, but also to ensure safe sea diving.

References

1. *Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics.* Available at: www.GPS.gov (Accessed: 17 July 2020)
2. Yang Y., Mao Y., Sun B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. *Satellite Navigation.* 2020;1:1. DOI: 10.1186/s43020-019-0006-0.
3. *BeiDou's road to global service. GPS World.* 6 December 2016. Available at: <https://www.gpsworld.com/directions-2017-beidous-road-to-global-service/> (Accessed: 17 July 2020)
4. *European Space Agency's Galileo website.* Available at: <https://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo> (Accessed: 17 July 2020)
5. *Indian Regional Navigation Satellite System/NavIC.* Available at: <https://www.isro.gov.in> (Accessed: 17 July 2020)
6. *Quasi-Zenith Satellite System.* Available at: <https://qzss.go.jp> (Accessed: 17 July 2020)
7. Datta A. *Multi-constellation GNSS receivers becoming a standard.* Available at: <https://www.geospatialworld.net/blogs/multi-constellation-gnss-receivers-norm/> (Accessed: 17 July 2020)
8. Nacini F. *JANUS creates a new era for digital underwater communications.* Available at: <https://robohub.org/janus-creates-a-new-era-for-digital-underwater-communications/> (Accessed: 17 July 2020)
9. Caparra G., Ceccato S., Laurenti N., Cramer J. Feasibility and Limitations of Self-Spoofing Attacks on GNSS Signals with Message Authentication. In: *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018)* (pp. 1–12). 2018.

GNSS+ 2017), Portland, Oregon, September 2017, pp. 3968–3984. DOI: 10.33012/2017.15402.

10. Stutters L., Liu H., Tiltman C., Brown D. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*. 2008;38(4):581–589. 10.1109/TSMCC.2008.919147.

11. Miller P., Farrell J., Zhao Y., Djapic V. Autonomous underwater vehicle navigation. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*. 2010;35(3):663–678. DOI: 10.1109/JOE.2010.2052691.

12. Webster S. E., Eustice R. M., Singh H., Whitcomb L. L. Advances in single-beacon one-way-travel-time acoustic navigation for underwater vehicles. *The International Journal of Robotics Research*. 2012;31(8):935–950. DOI: 10.1177/0278364912446166.

13. Dobryakova L., Ochin E. On the application of GNSS signal repeater as a spoofer (GNSS signal repeater = Meaconing). *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 2014;(40):53–57. Available at: http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-27082d5c-1bbf-405f-b164-96d0e7e91dd5/c/Dobryakova_Ochin_112-8.pdf (Accessed: 18 July 2020)

14. Dobryakova L., Lemieszewski L., Ochin E. The vulnerability of unmanned vehicles to terrorist attacks such as Global Navigation Satellite System Spoofing. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2016;(46):181–188. DOI: 10.17402/135.

15. Dobryakova L., Lemieszewski L., Ochin E. Protecting vehicles vulnerable to terrorist attacks, such as GNSS Jamming, by electromagnetic interference shielding of antenna. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 2017;(50). DOI: DOI: 10.17402/219.

16. Ochin E. Detection of Spoofing using Differential GNSS. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 2017;(50). DOI: 10.17402/217.

17. Ochin E. GPS/GNSS spoofing and the real-time single-antenna-based spoofing detection system. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 2017;(52):145–153. DOI: 10.17402/256.

18. Ochin E. GNSS and DGNSS Spoofing Detection. *Ural Radio Engineering Journal*. 2017;1(1):55–79. DOI: 10.15826/urej.2017.1.1.003.

19. Dobryakova L., Lemieszewski L., Ochin E. Protecting of vehicles with help of anti-jamming and anti-spoofing by shielding of GNSS antenna. In: *REIT 2017 Autumn, Submission 31*. Available at: <http://reit-rtf.ru/2017b.html> (Accessed: 18 July 2020)

20. Dobryakova L. A., Lemieszewski L. S., Ochin E. F. Global Navigation Satellite Systems attacks and a cloud-based spoofing detection for unmanned ships. *Ural Radio Engineering Journal*. 2017;2(2):40–56. DOI: 10.15826/urej.2018.2.2.003.

21. L Dobryakova., Lemieszewski L., Ochin E. GNSS Spoofing Detection Using Static or Rotating Single-Antenna of a Static or Moving Victim. *IEEE Access*. 2018;6:79074–79081. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2879718.

22. Dobryakova L., Lemieszewski L., Ochin E. Cloud-based GNSS navigation spoofing detection. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 2019;(57):29–37. DOI: 10.17402/323.

23. Ochin E. Spoofing detection for underwater acoustic GNSS-like positioning systems. *Scientific Journals Maritime University of Szczecin*. 2019;(57):38–46. DOI: 10.17402/324.

24. Abramowski T., Bilewski M., Dobryakova L., Ochin E., Uriasz J., Zalewski P. Safety of GNSS-Like Underwater Positioning Systems. *Preprints*. 2019:2019090052. DOI: 10.20944/preprints201909.0052.v1.

Information about the author

Evgeny Ochin received the M.S. degree in 1969, the Ph.D. degree in 1974, and the Ph.D. Hub. degree in 1997 in ITMO University (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Russia). From 1974 to 2004, he was an assisted professor and professor in the department of computer technology and vice-rector on scientific work at ITMO University. From 1996 to 2001, he was vice-rector on informatization of Baltic State Technical University “Voenmeh” D.F. Ustinov. From 2002 to 2008, he was director of the Institute “Architecture of Computers and Telecommunications” and head of the department “Computer networks” of Szczecin Technological University, Poland. From 2008 to 2019, he is a professor at the Maritime University in Szczecin, Faculty of Navigation, Department of Marine Information Technology, where he continues to work as Professor Emeritus. Evgeny Ochin is the author of 4 books, more than 160 articles, and more than 20 inventions. His research interests include CS&IT, the safety of satellite navigation on land, sea, and air, including anti-jamming and GNSS anti-spoofing, based on the inertial navigation system.

Информация об авторе

Очин Евгений получил звание инженера в 1969 г., к.т.н. в 1974 г. и д.т.н. в 1997 г. в Университете ИТМО (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики). С 1974 по 2004 г. был доцентом и профессором на кафедре компьютерных технологий и проректором по научной работе в Университете ИТМО. С 1996 по 2001 г. был проректором по информатизации Балтийского государственного технического университета «Военмех» Д.Ф. Устинов. С 2002 по 2008 г. он был директором Института «Архитектура компьютеров и телекоммуникаций» и зав. каф. «Компьютерные сети» Щецинского технологического университета, Польша. С 2008 по 2019 г. является профессором Морского университета в Щецине, факультет навигации, кафедра морских информационных технологий, где и продолжает работать в качестве заслуженного профессора. Автор 4 книг, более 160 статей и более 20 изобретений. Его исследовательские интересы включают CS&IT, безопасность спутниковой навигации на суше, на море и в воздухе, включая защиту от помех и спуфинга ГНСС на основе инерциальной навигационной системы.

Поступила / Received: 11.07.2020

Принята в печать / Accepted: 25.07.2020

Обзорная статья / Review

DOI 10.15826/urej.2020.4.2.003

УДК 537.87, 621.391, 621.37

Тенденции развития радиоэлектроники (обзор международной конференции)

В. А. Чечеткин , **С. Н. Шабунин**Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32 v.a.chechetkin@urfu.ru**Аннотация**

Данная статья посвящена обзору тенденций развития радиоэлектроники, которые были обозначены в ходе проведения Международной конференции *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology* в мае 2020 г. в Екатеринбурге. Проводится анализ тематик конференции в секции радиоэлектроники, связанных с перспективными телекоммуникационными технологиями, в том числе касающихся разработки антенно-фидерных устройств, измерения электрофизических параметров материалов и т.д.

Ключевые слова

радиоэлектроника, телекоммуникации, антенны, электрофизические параметры материалов, электромагнетизм

Для цитированияЧечеткин В. А., Шабунин С. Н. Тенденции развития радиоэлектроники (обзор международной конференции). *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):188–197. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.003.

Radio Electronics Development Trends (review of the International Conference)

V. A. Chechetkin , **S. N. Shabunin**Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia v.a.chechetkin@urfu.ru**Abstract**

This article is devoted to the overview of the trends in the development of radio electronics, which were identified during the International conference *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology* in May, 2020 in Yekaterinburg. We analyze the topics of the conference in the radio electronics section related to promising telecommunication technologies, including those related to the development of antennas, microwave devices, electrophysical parameters of materials, etc.

Keywords

radio electronics, telecommunications, antennas, electrophysical parameters of materials, electromagnetics

For citation

Chechetkin V. A., Shabunin S. N. Radio Electronics Development Trends (review of the International Conference). *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):188–197. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.003.

Введение

Рост вычислительных мощностей и освоение новых частотных диапазонов для коммерческих разработок обуславливает новый виток в развитии радиоэлектроники, когда на первый план выходят не только прикладные разработки в уже известных областях, но и фундаментальные исследования в малоизученных. С удешевлением и развитием компонентной базы электронные устройства проникают в различные области, такие как электроэнергетика, торговля, строительство и т. д.

Под эгидой Международной некоммерческой организации «Институт инженеров электротехники и электроники – IEEE» во всем мире ежегодно проводятся десятки конференций, посвященных исследованиям в области радиоэлектроники, энергетики, информационных технологий и биомедицинской инженерии. Кроме того, данная организация является разработчиком многих стандартов, используемых повсеместно, среди которых можно отметить:

- IEEE 754 – описывает формат представления чисел с плавающей точкой;
- IEEE 802 – семейство стандартов сетей (в том числе Ethernet, WiFi, Bluetooth, WiMax);
- IEEE 1284 – стандарт параллельного интерфейса для подключения периферийных устройств к персональным компьютерам (LPT);
- IEEE 1394 – стандарт последовательного интерфейса для обмена информацией между электронными устройствами (FireWire).

Первая Международная конференция *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology* прошла в 2018 г. в Екатеринбурге на базе Института радиоэлектроники и информационных технологий – РТФ Уральского Федерального Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (УрФУ). С тех пор конференция проводится ежегодно и собирает участников из многих городов России (Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Челябинск, Томск, Красноярск, Новосибирск и многих других), а также из

других стран, таких как Республика Сербия, Южно-Африканская Республика, Республика Казахстан, Республика Индия, Йеменская Республика и других. Сборник трудов конференции USBEREIT 2019 был проиндексирован не только в научометрической базе Scopus, но и в Web of Science. Традиционно на конференции представляются доклады по трем секциям – биомедицинская инженерия, радиоэлектроника и информационные технологии.

Обзор тематик

В 2020 г. впервые конференция была проведена в дистанционном формате, что позволило собрать абсолютно всех докладчиков на единой площадке, а также провести вещание для всех желающих в режиме потокового видео [1]. С пленарными докладами в секции радиоэлектроники выступили профессор белградского университета (University of Belgrade), директор лаборатории сербской Академии инженерных наук (Serbian Academy of Engineering Sciences) Branka Jokanovich, Республика Сербия, а также Khan Faisal Amirullah – представитель Института технологии из индийского города Тхана (A.P. Shah Institute of Technology, Thana).

Первый пленарный доклад был посвящен разработке антенных систем, которые отвечают требованиям систем связи и радиолокации следующего поколения. Представлены разработки печатных антенн разных частотных диапазонов. Антенная решетка диапазона 17 ГГц состоит из 420 одинаковых микрополосковых патч антенн, имеет ширину главного лепестка 2 градуса, усиление 19,5 дБ, ширину рабочей полосы частот 400 МГц, а также низкий уровень боковых лепестков (–22 дБ в Н-плоскости), что достигается путем применения модифицированных делителей мощности в диаграммообразующей схеме и специального амплитудного распределения, при котором центральные элементы имеют равную амплитуду возбуждения, а остальные – экспоненциально спадающую к краям. Применение пятиугольных диполей в качестве излучающих элементов решетки вместо прямоугольных дает возможность применить амплитудное распределение Дольфа-Чебышева, поскольку пятиугольные элементы могут быть спроектированы с большей вариацией по входному импедансу. Кроме того, были продемонстрированы различные топологии фазосдвигающих элементов с использованием метаматериалов для антенн диапазона 6 ГГц с частотным сканированием, что позволяет получить требуемую характеристику качания в заданном диапазоне частот без существенного ухудшения других полевых характеристик антенны.

В [2] приведены результаты исследования элементов управления лучом для многоэлементных фазированных антенн решеток. Рассматриваются вопросы минимизации тока управления фазовращателями, а также изменения коэффициента направленного действия в зависимости от фазовой ошибки. На рис. 1 показано распределение потребляемого фазовращателями тока. Построение диаграммообразующей схемы на основе матрицы Батлера описывается в [3]. Представленное устройство позволяет сформировать до 4 независимых лучей для антенной решетки на частоте 1 ГГц. Отличительной особенностью устройства являются его малые размеры, поскольку для построения был использован метод замены микрополосковых линий на фильтры нижних частот, что позволило достичь снижения размеров на 60,6 % по сравнению с обычной топологией. Несмотря на уменьшение габаритных размеров, рабочая полоса частот уменьшилась всего на 5 %.

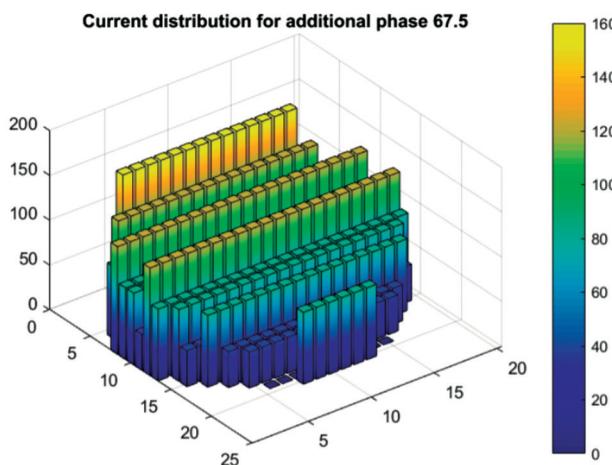


Рис. 1. Распределение потребляемого фазовращателями тока [2]

Fig. 1. The phase shifters current distribution [2]

Исследованию антенн для радаров посвящена работа [4], в которой проводится анализ излучения антенны вытекающей волны в ближней зоне для Допплеровского измерителя параметров движения относительно подстилающей поверхности. В аналитическом виде представлены формулы для нахождения напряженности поля, а также результаты расчета в виде амплитудного и фазового распределения для Ка-диапазона, на основании которых сделан вывод о возможности использования данной антенной системы в микроволновых радарах для ближней зоны. Для ряда микроволновых антенн важным вопросом является исследование возбуждения поверхностных волн, которые могут

быть как нежелательным явлением, так и использоваться для создания направленного излучения. Чтобы определить амплитуды и диаграммы направленности поверхностных волн, в [5] используется решение на основе функций Грина при разложении поля на LE и LM волны. Данная методика позволяет рассчитать требуемые параметры для любых параметров диэлектрических подложек и укрытий в широком диапазоне частот, что позволяет проектировать эффективные возбудители поверхностных волн для дифракционных антенн и антенн вытекающей волны.

С увеличением рабочей частоты радиоэлектронных устройств все более строгие требования предъявляются к электрофизическим параметрам используемых материалов. Для измерения этих параметров требуются как разработка новых измерительных установок, так и методик измерения и расчета характеристик.

При разработке новых материалов не всегда есть возможность получить образец для измерений требуемых размеров, который бы заполнил собой всю измерительную линию передачи. Данной проблеме посвящено исследование [6], в котором авторами представлены результаты измерения электродинамических параметров моноферрита NiZn в коаксиальной линии передачи для частотного диапазона от 8 до 12 ГГц. Исследование образцов длиной от 0,06 до 1,08 длин волн показало, что для точного определения характеристик длина должна быть равна или превышать длину волны в середине частотного диапазона измерений.

В [7] представлены результаты разработки блока для локальных измерений магнитных характеристик тонких ферромагнитных пленок, который позволяет определять величину и направление анизотропии поля пленки. Кроме блок-схемы и описания установки, представлены результаты измерения анизотропии поля образца Ni80Fe20. Предложенное устройство позволяет осуществлять неразрушающий контроль качества и измерять магнитные характеристики тонких ферромагнитных пленок. Также для тонких пленок Ni80Fe20 представлены результаты измерения характеристик с использованием резонансного и нерезонансного метода [8]. Резонансная измерительная ячейка включала в себя микрополосковую линию, сосредоточенную емкость и амплитудный детектор, в то время как нерезонансная ячейка состояла из короткозамкнутой микрополосковой линии. Сравнение результатов для двух методов показало различие не более 5%.

Особое внимание исследователей уделяется возможности использования магнитных полей в различных устройствах. Например, [9] описывает практическое значение, методы улучшения качества, результаты изготовления и практических испыта-

ний навигационной системы, цифровой магнитный компас которой разработан как с использованием магнитных датчиков, таки спутниковых систем позиционирования ГЛОНАСС и GPS. Структурная схема полученного устройства показана на рис. 2. Авторы указывают, что без использования комбинации магнитных и позиционных сигналов в компасе выходная ошибка может достигать минус 7,5 градусов. В то время как при использовании данных сигналов совместно (при условии, что выходной сигнал обрабатывается для устранения шума с помощью фильтра Калмана) цифровой магнитный компас имеет погрешность менее 1,1 градуса.

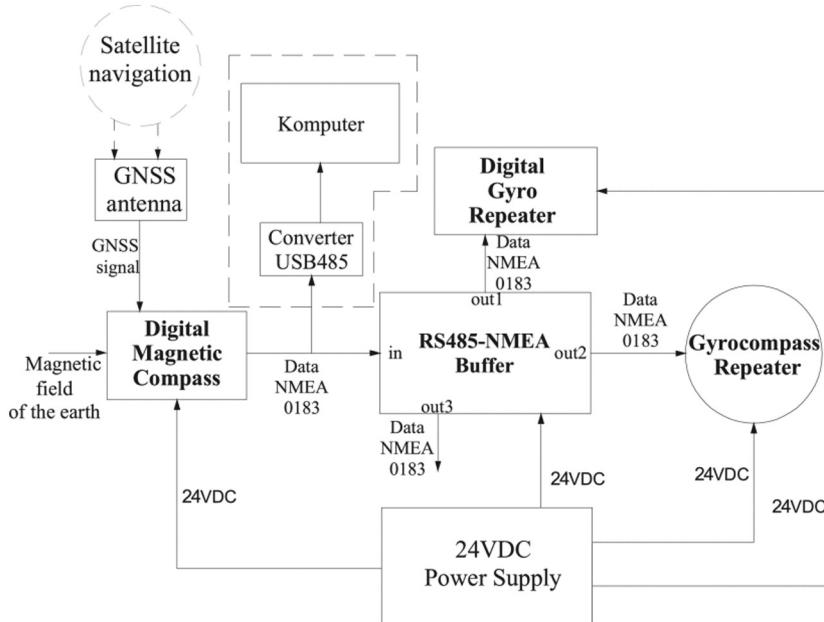


Рис. 2. Структурная схема цифрового магнитного компаса [9]

Fig. 2. Digital magnetic compass structure [9]

В [10] представлены результаты исследования магнитометрического средства обнаружения. Показана разработанная математическая модель формирования сигнала, которая позволяет рассчитать полезные сигналы на выходе преобразователя при прямолинейном движении объекта, расположенного под случаем углом к прямой оси преобразователя, из случайной исходной точки. Программно-аппаратный комплекс был разработан для анализа сигналов и характеристик перспективных средств обнаружения, который позволяет имитировать работу блока принятия решений и оценки предполагаемой характеристики обнаружения.

Второй пленарный доклад был посвящен обзору технологий мобильной связи от первого до пятого поколения. Были приведены данные сравнительного анализа сетей, обозначены проблемы, с которыми столкнутся исследователи и разработчики при внедрении новых поколений беспроводной связи. Некоторые доклады конференции были посвящены перспективным системам связи 5G, которые еще только начинают внедряться во всем мире. Можно выделить два основных направления в работе со стандартами нового поколения: разработка устройств, которые могут обеспечить требуемую производительность в заданном частотном диапазоне, а также исследование работы сетей для организации бесперебойной работы при большом количестве абонентов и переменном трафике.

В [11] приводится конструкция микрополосковой антенны, в характеристике которой сформированы полосы заграждения для обеспечения совместимости со спутниковым диапазоном связи. Одиночный излучатель имеет широкую диаграмму направленности, а коэффициент усиления равен примерно 7 дБ. Антенна занимает небольшую площадь (13x13 мм) и имеет низкий профиль, что позволяет объединять их в антенные решетки для увеличения коэффициента усиления и контроля характеристик диаграммы направленности. Результаты исследования вероятностно-временных характеристик МАС-уровня сетей 5G приводятся в [12]. Авторы используют подход, предложенный профессором А. Мархасиным, на основе метода интенсивностей нагрузок для определения характеристик средней задержки пакетов и нормализованной скорости передачи данных в зависимости от интенсивности входной нагрузки для различных параметров протокола, таких как формат кадра и приоритет.

Большое внимание в представленных докладах уделяется практическому применению предложенных технических решений и разработок. Так, для определения наличия метана в воздухе шахт предлагается использовать изменение фазы СВЧ-сигнала при прохождении внутри волновода определенной длины, заполненного воздухом шахты [13]. При изменении концентрации метана в воздухе изменяется диэлектрическая проницаемость газовоздушной смеси, заполняющей волновод, что сказывается на фазе СВЧ-сигнала и позволяет определить критический уровень примесей. Поскольку изменение диэлектрической проницаемости происходит в небольших пределах, то для получения различимого фазового сдвига СВЧ-сигнал несколько раз проходит через газовоздушную смесь в волноводе.

В [14] предлагается алгоритм определения состояния термопар, основанный на измерении их сопротивления. Приводятся

экспериментальные данные для термопары хромель-алюмель. Испытательная установка включает в себя оборудование для точного измерения сопротивления термопары, а также позволяет вызвать износ термопары путем применения тепловых ударов. Экспериментальные результаты подтвердили связь между сопротивлением термопары и изменением состояния термопары в рабочем состоянии. Предлагаемый алгоритм для мониторинга состояния термопары обеспечил точность определения изношенной термопары до 80 %.

Обзорная статья [15] посвящена рассмотрению методов не-разрушающего контроля для определения качества различных фруктов и овощей, таких как измерение диэлектрической проницаемости, спектроскопия, применение ультразвука, измерение импеданса или Допплеровского сдвига частоты. В статье проанализировано 40 источников, а информация систематизирована в нескольких таблицах по применяемым методам, типам исследуемых фруктов и качественным характеристикам, которые были определены.

Заключение

Ежегодная Международная конференция *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology* привлекает к участию исследователей из самых разных областей радиоэлектроники, в том числе исследующих и разрабатывающих микроволновые устройства и антенны, телекоммуникационные сети, построение радиотехнических систем и прикладных алгоритмов. В результате обсуждения докладов и обмена мнениями участников конференции появляются новые научные группы и совместные проекты, направленные на решение актуальных научных и технических задач. В данной статье проводится обзор только секции радиоэлектроники, однако конференция USBEREIT-2020 также привлекла большое число ученых со всего мира в секции, касающиеся биомедицинской инженерии и информационных технологий.

Список литературы / References

1. 2020 *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Available at: <https://usbereit.ieeesiberia.org/> (Accessed: 18 February 2020).
2. Shabunin S., Trifonov D., Bartolić J. Research on Optimization of the Phase Shifter Control Current in Antenna Arrays with Electronic Beamforming and Estimation of Directivity Decreasing. In: 2020 *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 334–336. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117640.

3. Letavin D. A., Shabunin S. N. Construction of a 4x4 Butler Microstrip Matrix with Reduced Dimensions. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0257–0260. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117690.
4. Noskov V. Y., Shaidurov K. D. Near-Field Modelling of the Leaky-Wave Antenna. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0277–0280. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117779.
5. Shabunin S., Taha A. M., Chechetkin V. The Solution of a Problem of Effective Excitation of Surface Waves Using Green's Functions at Decomposition on LE, LM Waves. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 337–340. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117800.
6. Klygach D., Vakhitov M., Khashimov A., Zhivulin V., Vinnik D., Sherstyuk D. Determination of the Optimal Sample Size for Measurement in a Coaxial Transmission Line. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0322–0325. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117619.
7. Kleshnina S., Belyaev B., Boev N., Izotov A., Burmitskikh A., Gorchakovskiy A. Unit for Measuring the Magnetic Characteristics of Thin Ferromagnetic Films. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0326–0329. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117609.
8. Burmitskikh A. V., Belyaev B. A., Boev N. M., Kleshnina S. A. Measuring the Imaginary Part of the Complex Magnetic Permeability of Thin Films Using Resonant and Non-resonant Automated Measuring Systems. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 1–4. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117770.
9. Hau V. X., Ivanov V. E. Research, Design, Manufacture and Quality Improvement of a Digital Magnetic Compass System for Marine Vessels. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0313–0317. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117772.
10. Zakharkin G., Dukhan E. System Analysis of the Prospective Characteristics of the Helical Magnometric Detection Tool. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0345–0348. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117679.
11. Kadyrova G., Abdurakhmanova G., Voronkov G., Grakhova E., Filatov P. Microstrip Patch Antenna with Band Rejection Design for V2X Technology based on 5G Networks. In: *2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology*

(USBEREIT). Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 273–276. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117713.

12. Drozdova V., Akhpashev R. The Usage of Load Intensity Balance Approach for 5G MAC Protocol Characteristics Investigation. In: 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 292–294. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117725.

13. Shirokov I., Shirokova E., Podgornov R. New Approach to Determination of Changes of Air Composition in Mines. In: 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0330–0333. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117724.

14. Fedosov I. I. Thermocouple Condition Monitoring Using Thermocouple Resistance. Experimental Study. In: 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0349–0352. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117727.

15. Semenov V., Mitelman Y. Non-destructive Fruit Quality Control Using Radioelectronics: a Review. In: 2020 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, 14–15 May 2020, pp. 0281–0284. DOI: 10.1109/USBEREIT48449.2020.9117644.

Информация об авторах

Чечеткин Виктор Алексеевич, младший научный сотрудник департамента Радиоэлектроники и связи Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, v.a.chechetkin@urfu.ru (Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32).

Шабунин Сергей Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой радиоэлектроники и телекоммуникаций Института радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32).

Information about the authors

Victor A. Chechetkin, Junior Researcher of the Department of Radio Electronics and Communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, v.a.chechetkin@urfu.ru (32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia).

Sergey N. Shabunin, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Radio Electronics and Telecommunications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, (32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia).

Поступила / Received: 18.07.2020

Принята в печать / Accepted: 30.07.2020

Обзорная статья / Review

DOI 10.15826/urej.2020.4.2.004

УДК 528.852

Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы

А. В. СосновскийУральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32 sav83@e1.ru**Аннотация**

Представлена ретроспектива и обзор современного состояния технологий интерферометрической обработки радиолокационных данных, получаемых космическими радиоэлектронными системами дистанционного зондирования Земли, в задачах построения цифровых моделей рельефа. Рассмотрены вопросы моделирования интерферометрической обработки радиолокационных данных и практических способов ее реализации, а также ошибок способы оценивания точности восстановления абсолютной фазы и рельефа местности.

Ключевые слова

интерферометрическая обработка данных РСА, подавление фазового шума, развертывание фазы, анализ точности

Для цитирования

Сосновский А. В. Интерферометрическая обработка данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой при создании цифровых моделей рельефа земной поверхности: состояние и проблемы. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):198–233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.

InSAR data processing in digital elevation models creating tasks: state-of-art and issues

A. V. SosnovskyUral Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin,
32 Mira Str., Ekaterinburg, 620002, Russia sav83@e1.ru**Abstract**

The paper presents a retrospective review and current state-of-art of radar data interferometric processing techniques (InSAR) in space-based radio-electronic systems of the remote sensing of the Earth in the tasks

of digital elevation models (DEM) constructing. History of InSAR systems development and trends in the development of data processing methods are considered. It is shown, that InSAR systems take their origin from radio astronomic tasks, related to the Moon and planets' surface investigations, carried out by the USA and the USSR in 1960th. Since 1980th the InSAR techniques are widely used for the Earth remote sensing tasks (digital elevation models creation, surface displacements detection, recognition of vegetation features, etc.), but the problems of absolute phase restoration inhibit the wide utilization of such systems in the Earth monitoring and mapping tasks, because the accuracy of digital elevation models obtained by such systems remains disputable.

The mathematical model and principles of interferometric processing of data from satellite synthetic aperture radar are reviewed in conjunction with problems of absolute phase restoration errors measurement. We demonstrate, that despite the existing diversity of interferometric algorithms (i.e. phase noise filtration algorithms, phase unwrapping algorithms), the existing ways of accuracy assessment of the obtained result implies an end-to-end DEM validation, which complicates the comparative study of InSAR processing algorithms efficiency analysis. So, the author's proposals for such analysis, based on reference DEM backward geocoding and error functions analysis, are reviewed. This approach allows identifying optimal values and combinations of parameters for interferometric algorithms at each processing stage, and it is applicable for remote sensing radar data obtained by different radar systems in different imaging modes.

Keywords

InSAR data processing, phase noise filtration, phase unwrapping, accuracy analysis

For citation

Sosnovsky A. V. InSAR data processing in digital elevation models creating tasks: state-of-art and issues. *Ural Radio Engineering Journal*. 2020;4(2):198–233. DOI: 10.15826/urej.2020.4.2.004.

Введение

Одной из основных тенденций развития современных радиолокационных систем космического наблюдения наряду с реализацией режимов сверхвысокого пространственного разрешения и съемки в полном поляризационном базисе стало широкое применение интерферометрической обработки съемочных данных (технологии InSAR и DInSAR) для получения информации о рельефе местности и его изменениях. Суть метода космической радиолокационной интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных съемкой одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо одной антенной на двух витках орбиты. Он сочетает высокую точность фазового метода измерения дальности

с высокой разрешающей способностью космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (PCA).

Цифровые модели рельефа и карты смещений рельефа широко используются при создании и обновлении высотной основы цифровых топографических карт различных масштабов, при экологическом мониторинге зон проведения работ по добыче полезных ископаемых, контроле состояния транспортных коммуникаций. Интерферометрические режимы радиолокационной съемки позволяют получать извлекать информацию о рельефе местности (высоты и смещения) в почти автоматическом режиме обработки данных, что делает ее очень привлекательной для использования в данных задачах. Широкое применение при решении различных задач космического мониторинга земной поверхности находит цифровая модель рельефа SRTM с периодом пространственной дискретизации в 30–90 м, построенная с использованием интерферометрической съемки радиолокатором с жесткой базой SIR-C в 2000 г. Дальнейшее развитие спутниковых радиолокационных космических систем высокого и сверхвысокого пространственного разрешения (аппараты TerraSAR-X, COSMO-SkyMed, ALOS PALSAR, SARlupe, YaoGan, Sentinel-1, Кондор-Э) позволило расширить область применения интерферометрической съемки в задачах мониторинга смещений рельефа земной поверхности, особенно в районах интенсивного строительства и районах проведения работ по добыче полезных ископаемых.

Вместе с тем, поскольку на каждом этапе интерферометрической обработки используются многочисленные эмпирические алгоритмы и методы, важной остается задача выбора наиболее эффективных алгоритмов с точки зрения конечного результата. Открытыми остаются также вопросы получения экспериментальных оценок точности формируемых цифровых моделей рельефа при использовании различных алгоритмов интерферометрической обработки. Таким образом, целью настоящей статьи является обзор современного состояния области интерферометрической обработки космических радиолокационных данных дистанционного зондирования Земли, а также методов и подходов к оцениванию точности цифровых моделей рельефа, получаемых такими системами.

История и тенденции развития космических интерферометрических систем радиолокационного зондирования Земли

История применения радиолокационных методов исследования Земли и космического пространства берет начало в середи-

не 1940-х гг., когда Райл (впоследствии удостоенный нобелевской премии) и Ванберг впервые применили двухэлементный радиоинтерферометр с изменяющей базой (при несущей частоте $f_0 = 175$ МГц) для исследования открытого в 1930-х гг. космического радиоизлучения [1]. В 1950-х – 1960-х гг. радиоинтерферометрические методы были успешно применены для исследований (в том числе – для построения рельефов) Луны и ближайших планет Солнечной системы [2–7].

С развитием в 1960-х гг. технологии радиолокаторов с синтезированной апертурой, а также радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами [8], позволившей получать интерференционные картины, используя только один приемник, радиолокационные методы стали востребованными не только в астрономических исследованиях, но и в задачах исследования земной поверхности. Один из первых экспериментов по получению радиоинтерференционных портретов земной поверхности был произведен Л. Грэхэмом в начале 1970-х гг. [9]. Во второй половине 1980-х гг. Р. Голдштейном из НАСА и др. были проведены эксперименты по интерферометрической съемке и обработке радиолокационных данных космических PCA SIR-B [10] и SEASAT-A [11], а также PCA авиационного (NASA CV990) базирования [12]. По результатам первых двух экспериментов была показана возможность получения устойчивой интерференционной картины Земли при отсутствии жесткой интерферометрической базы (PCA-интерферометрия с повторным проходом, repeat-track InSAR), а количественный анализ результатов последнего эксперимента показал, что получаемые таким способом цифровые модели рельефа (ЦМР) имеют среднеквадратическую ошибку по высоте от 2 до 10 м, что, в свою очередь, продемонстрировало большой потенциал PCA-интерферометрии (InSAR) для решения задач дистанционного зондирования Земли. Тогда же были высказаны идеи и проведены эксперименты по возможности применения радиолокационной интерферометрической съемки с продольной базой для наблюдения за океаническими течениями [13–14] – AT-InSAR и радиолокационной интерферометрической съемки с повторным проходом для обнаружения малых изменений рельефа [15] – дифференциальной интерферометрии (DInSAR).

Первые успешные результаты выявили и основные проблемы в получении и обработке радиолокационной информации в интерферометрических системах дистанционного зондирования Земли:

– неоднозначность фазовых измерений и, как следствие, необходимость выполнения развертывания фазы при интерферометрической обработке [16];

- пространственная и временная декорреляция радиолокационных эхо-сигналов, приводящая к необходимости подавления фазового шума и отбраковке участков радиоинтерференционных портретов [17];
- специфические геометрические искажения – сдвигка (foreshortening) и наложение (layover), характерные для равнодальностной проекции и требующие применения специальных методов геопривязки [18–20].

В 1990-х гг. развитие техники и технологий космической РСА-интерферометрии выразилось в:

- 1) появлении первой tandemной съемочной системы – аппаратов ERS-1 и ERS-2, позволившей сократить период между повторными съемками, уменьшая временную декорреляцию сигналов;
- 2) развитии вычислительных методов интерферометрической обработки, направленных на решение указанных выше проблем;
- 3) подготовке космической миссии по созданию первой глобальной цифровой модели рельефа, построенной по данным РСА-интерферометрии – SRTM (Shuttle Radar Topography Mission [21]).

Данная миссия состоялась в феврале 2000 г. и заключалась в проведении интерферометрической съемки поверхности Земли (в пределах от 60° с. ш. до 56° ю. ш.) радиолокатором SIR-C/X-SAR, установленном на шаттле Endeavour и снабженным дополнительным приемником, расположенным на конце прикрепленной 61-метровой штанги (реализуя, таким образом, интерферометр с жесткой базой) [22]. Полученная одноименная ЦМР была опубликована в 2005 г. Она имеет период пространственной дискретизации 90 м (для территории США – 30 м) и вертикальную точность 5–16 м в зависимости от континента и выраженности рельефа [23]. Она широко используется при решении научных и производственных задач геодезии, картографии, геологии, а также в различных информационных сервисах. Таким образом, космическая РСА-интерферометрия позволила получить вполне самостоятельные метрически корректные данные с высоким потенциалом научного, технического и коммерческого использования.

В 2000-х гг. РСА-интерферометрия перестала быть исключительно научной областью и приобрела коммерческую составляющую. С появлением специализированных проприetaryных программных комплексов SARSCAPE, Imagine IFSAR DEM, PHOTOMOD RADAR и с учетом открытого опубликования данных SRTM стало возможным говорить о появлении информационной технологии космической радиолокационной интерферометрии. Также 2000-е гг. отмечены появлением радиолокационной (в том числе интерферометрической) космической

съемки сверхвысокого разрешения (TerraSAR-X, CosmoSkyMed, RADARSAT-2), развитием и внедрением метода постоянных отражателей для дифференциальной интерферометрической съемки, нашедшим широкое применение при мониторинге работ на месторождениях по добыче полезных ископаемых и состояния транспортных сетей [24–27]. Также широкое применение нашли данные, получаемые радиолокатором PALSAR аппарата ALOS-1, которые благодаря использованию зондирующего сигнала *L*-диапазона оказались менее подвержены пространственной и временной декорреляции.

Наконец, 2010-е гг. отмечены укреплением ранее наметившихся разнонаправленных тенденций по коммерциализации результатов съемки сверхвысокого разрешения, с одной стороны, и появлением новых сервисов свободного доступа к результатам съемки среднего разрешения – с другой. Так, новая глобальная ЦМРТ WorldDEM (2014 г.) с пространственным разрешением 12 м и вертикальной точностью в 4 м, полученная по результатам работы тандема TerraSAR-X/TanDEM-X, доступна исключительно на коммерческой основе; а результаты съемки КА Европейского космического агентства Sentinel-1A/1B (2014 и 2016 гг.), напротив, распространяются свободно, также свободно распространяется и новый программный комплекс для интерферометрической обработки Sentinel Application Platform (SNAP) [28].

Исходя из анализа публикационной активности, а также из исторически сложившихся предпосылок, можно выделить следующие тенденции развития современных космических технологий РСА-интерферометрии:

- совершенствование методов и алгоритмов интерферометрической обработки, направленное на повышение точности результатов и снижение вычислительных издержек;
- увеличение пространственного разрешения съемочных систем и освоение различных частотных диапазонов;
- расширение географии операторов съемки: если в 1990-х гг. данная тематика разрабатывалась в основном НАСА и Европейским космическим агентством (ЕКА), то в 2000–2010 гг. к разработкам подключились научные и производственные центры России, Китая, Японии и др.
- соединение различных радиолокационных методов: поляризационная (POLInSAR [29–30]), инверсная (InISAR [31]), многочастотная (multi-frequency) и многобазовая (multi-base, [32]) интерферометрические технологии и др.;
- одновременная радиолокационная съемка в различных поляризациях излучаемой и регистрируемой волн (съемка в полном поляризационном базисе);

– широкое распространение методов дифференциальной интерферометрической съемки, особенно – метода постоянных отражателей [33];

Основными научными центрами и организациями, проводящими исследования в области космической РСА-интерферометрии и имеющими опыт разработки радиолокационной съемочной аппаратуры, являются: НАСА (лаборатория реактивного движения – JPL), Европейское космическое агентство (ESA), в том числе Германский центр авиации и космонавтики (DLR) и Итальянское космическое агентство (ASI), Канадское космическое агентство (CSA), Японское космическое агентство (JAXA), концерн радиостроения «Вега» (Россия), Китайская аэрокосмическая научно-техническая корпорация (CASC). В России и бывшем СССР наиболее известны работы в области интерферометрической обработки радиолокационной информации, выполнявшиеся А. И. Захаровым [34–35], В. О. Михайловым [36], Л. Б. Неронским [37], И. В. Елизаветиным и А. В. Ксенофонтовым [38], Р. И. Шуваловым [39], А. В. Филатовым [26; 40], М. И. Бабокиным [41–42], А. И. Баскаковым [43], А. В. Ксендзуком [44] и др.

Принципы интерферометрической обработки данных космических радиолокаторов с синтезированной апертурой

Суть метода космической РСА-интерферометрии заключается в совместной обработке фазовых полей, полученных при зондировании одного и того же участка местности одновременно двумя антенными системами, либо одной антенной на двух витках орбиты носителя. Приближенно процесс формирования интерференционного сигнала (интерферограммы) в РСА можно описать следующим образом. Амплитуды и фазы регистрируемых при съемке сигналов записываются в радиоголограмму, а после синтезирования апертуры – в комплексные радиолокационное изображение (КРЛИ) [37; 45]. Фазы элементов КРЛИ являются случайными величинами, содержащей детерминированную составляющую, связанную с рельефом облучаемой поверхности, и составляющие, связанные со случайными изменениями при отражении от поверхности и прохождении волны через атмосферу, с набегами в узлах приемопередающей аппаратуры и искажениями при синтезе. При интерферометрической обработке случайные составляющие фаз частично компенсируют друг друга, что позволяет в явном виде выделить топографическую составляющую, которая зависит от длины волны зондирующего радиосигнала и разностного расстояния от фазовых центров антенн (ФЦА) до элемента поверхности (рис. 1).

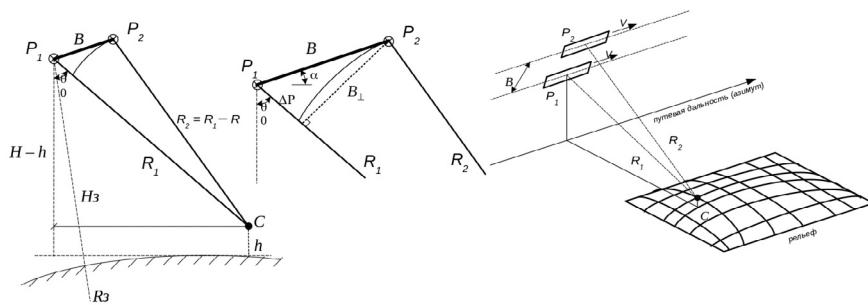


Рис. 1. Геометрия радиолокационной интерферометрической съемки: P_1 и P_2 – положения носителя РСА (центры синтезированных апертур) при наблюдениях элемента поверхности C , R_1 и R_2 – наклонные дальности, B и B_{\perp} – интерферометрическая база и ее нормальная составляющая, θ_0 – угол бокового обзора, H_3 и H – высота орбиты носителя над поверхностью Земли и высота, приведенная к геометрии «плоской Земли» при первом наблюдении

Fig. 1. The InSAR imaging geometry: P_1 and P_2 are the positions of the SAR carrier (the centers of synthesized apertures) when observing the surface element C , R_1 and R_2 are the ranges, B and B_{\perp} are the interferometric and normal baseline, θ_0 is the side-looking angle, H_3 and H are the height of the carrier's orbit above the earth's surface and the same height reduced to the “flat Earth” geometry (for the first image)

Вопросы моделирования радиолокационной интерферометрической съемки подробно рассматривались Родригезом и Мартином [46], Бамлером и Хартлом [18], Ханссеном [47]. Наиболее полно модель интерференционного сигнала описана Бамлером и Хартлом с использованием системы координат «нулевого доплеровского сдвига», и именно этот подход чаще других используется в прикладном программном обеспечении обработки данных РСА. В предложенном ими подходе модель комплексного РЛИ $\hat{Z}(x, \eta)$ в косоугольной системе непрерывных координат «азимут – наклонная дальность» в рамках геометрии «плоской Земли» записывается в следующем виде:

$$\hat{Z}(x, \eta) = \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} R_0\right) \cdot \left(\int a(\vec{r}) d\zeta \times \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \eta\right)\right) \otimes \otimes h(x, \eta), \quad (1)$$

где R_0 и η – минимальная (на траверзе) и текущая наклонные дальности; (η, ζ) – система координат, полученная вращением координат (y, z) (наземная дальность – высота) на угол в плоскости $y0z$ вокруг оси x ; $a(\vec{r})$ – плотность отражателей в элементарном объеме пространства; $h(x, \eta)$ – функция рассеяния точки (отклик РСА на точечную цель), $\otimes \otimes$ – двумерная свертка.

Интерферометрическая обработка предполагает получение и пространственное совмещение двух таких изображений: $\hat{Z}_1(x, \eta) = |\hat{Z}_1(x, \eta)| \cdot \exp(j\phi_1(x, \eta))$ и $\hat{Z}_2(x, \eta) = |\hat{Z}_2(x, \eta)| \cdot \exp(j\phi_2(x, \eta))$, разностная фаза которых

$$\Delta\phi(x, \eta) = \arg\{\dot{Z}_1(x, \eta) \cdot \bar{Z}_2(x, \eta)\} \quad (2)$$

образует интерферограмму $\Delta\phi(x, \eta)$. Отдельный элемент местности регистрируется на комплексных РЛИ в позициях с координатами $\dot{Z}_1(x, \eta)$ и $\dot{Z}_2(x, \eta)$ с топографическими составляющими фаз

$$\varphi_1(x, R_1) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \varphi_{s1};$$

$$\varphi_2(x, R_2) = -\frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \varphi_{s2},$$

где φ_{s1} и φ_{s2} – составляющие фазы, соответствующие перемещению самого элемента местности (если оно присутствует). При неподвижности элемента, стабильности среды распространения и в отсутствии флюктуаций разностная фаза (с учетом совмещения РЛИ) будет определяться следующим образом:

$$\Delta\phi(x, R_1) = -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R, \quad (3)$$

где $\Delta R = R_1 - R_2$. В [18] не указана явным образом связь между высотой отражающего объекта h относительно опорной поверхности (например, референц-эллипсоида или плоскости Земли) и формируемой им разностной фазой $\Delta\phi(x, R_1)$, эта связь в разных вариантах приводится в [48]:

$$h(x, R_1) = H - R_1 \times (\cos\alpha \cdot \sqrt{1 - \Theta^2} - \sin\alpha \cdot \Theta);$$

$$\Theta = \frac{B^2 - \Delta R^2 + 2R_1 \Delta R}{2BR_1}, \quad (4)$$

где H – высота орбиты носителя РСА, B , α – база интерферометра и угол ее уклона (относительно «плоской Земли»). В (геометрии земного эллипсоида) соотношение будет выглядеть схожим, но более сложным образом [48], при этом можно привести его к виду (4) путем замены высот H и $h(x, R_1)$ и углов α на значения, исчисляемые относительно плоскости, касательной к земному эллипсоиду в точке расположения цели [46].

Во всех эксплуатируемых в настоящее время РСА используется формирование сигналов в цифровой форме, соответственно для записи интерференционного сигнала (интерферограммы) предпочтительнее использовать дискретные аргументы:

$$\Delta\phi(x, R_1) \rightarrow \Delta\phi_{m, n}. \quad (5)$$

Интерферограмма $\Delta\phi_{m, n}$ представляет собой двумерный сигнал (рис. 2), основным элементом которого являются интерференционные полосы – фринги, границы которых соответствуют набегам разностей фаз на величину 2π (что соответствует

изменению разностного расстояния на величину $4\pi\Delta R/\lambda$) и зависят от геометрических характеристик системы и рельефа местности.

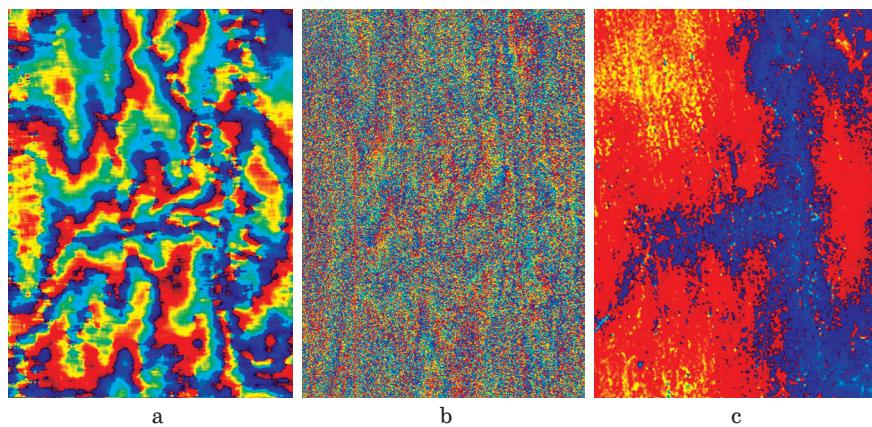


Рис. 2. Интерферограммы PCA ALOS PALSAR участка земной поверхности при различных режимах съемки: а) ГГ-поляризация, $B_{\perp} = 3500$ м; б) ГВ-поляризация, $B_{\perp} = 3500$ м; в) ГГ-поляризация, $B_{\perp} = 500$ м

Fig. 2. ALOS PALSAR interferograms of the earth's surface at various imaging modes: a) HH-polarization, $B_{\perp} = 3500$ m; b) HV-polarization, $B_{\perp} = 3500$ m; c) HH-polarization, $B_{\perp} = 500$ m

Неполная компенсация случайных составляющих фаз сигналов проявляется на интерферограмме в виде фазового шума. Числовой характеристикой, часто используемой в PCA-интерферометрии для оценки соотношения полезного сигнала и фазового шума, является коэффициент когерентности $\rho_{m,n}$, характеризующий качество участка интерферограммы и его пригодность для дальнейшего преобразования в цифровую модель рельефа или карту изменений рельефа. Оценка интерферометрической когерентности производится в локальных окнах пары радиолокационных изображений и вычисляется как коэффициент корреляции между соответствующими комплексными отсчетами этих изображений по формуле:

$$\hat{\rho}_{m,n} = \frac{\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} \dot{Z}_{1m,n} \bar{Z}_{2m,n}}{\sqrt{\sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{1m,n}|^2 \times \sum_{m=-M_0}^{M_0} \sum_{n=-N_0}^{N_0} |\dot{Z}_{2m,n}|^2}}, \quad (6)$$

где M_0, N_0 – полуразмеры окна оценивания. Чем больше $|\hat{\rho}_{m,n}|$, тем, как правило, сильнее топографическая составляющая фазы преобладает над случайной.

Плотность распределения фазового шума при отсутствии фильтрации и некогерентного накопления отсчетов описывается выражением:

$$p_{\phi} = \frac{1-\rho^2}{2\pi} \frac{1}{1-\rho^2 \cos^2(\Delta\phi - \Delta\phi_0)} \times \\ \times \left(1 + \frac{\rho \cos(\Delta\phi - \Delta\phi_0) \arccos(-\rho \cos(\Delta\phi - \Delta\phi_0))}{\sqrt{1-\rho^2 \cos^2(\Delta\phi - \Delta\phi_0)}} \right), \quad (7)$$

где $\Delta\phi_0$ – математическое ожидание фазы, соответствующее, как правило, разностной топографической фазе. Выражение (7) соответствует плотности распределения случайной величины $(\Delta\phi - \Delta\phi_0)$ на интервале $[-\pi, \pi]$, имеющей гауссово-подобную форму при средних больших ρ и вырождающейся в равномерную при малых ρ [18]. Для получения как можно более устойчивого интерференционного сигнала съемки проводятся с минимально возможным интервалом и/или в одинаковый сезон года при сходных погодных условиях.

Целями дальнейшей интерферометрической обработки является восстановление абсолютной (развернутой) фазы интерференционного сигнала и извлечение из него полезной картографо-геодезической информации – цифровой модели поверхности Земли или карты смещений элементов поверхности. Этапы интерферометрической обработки включают компенсацию фазового уклона, выполнение межэлементного некогерентного накопления, подавление фазового шума (сглаживание интерферограммы) и развертывание интерферометрической фазы.

Компенсация фазового уклона (выравнивание интерферограммы – «interferogram flattening») заключается в устранении априорно известной информации о поведении фазы, устранив, в первую очередь, линейный поперечный набег фазы, связанный с геометрией бокового обзора, что позволяет сократить число интерференционных полос и упростить реализацию последующих этапов обработки. Для компенсации может использоваться синтетическая опорная фаза (корректирующее фазовое поле) $\Phi_{m, n}^C$, рассчитанная исходя из параметров траектории носителя и геометрии опорной поверхности (общеземного либо референц-эллипсоида, а также привязанным к ним низкодетальным ЦМР); также используется и адаптивная компенсация уклона на основе характеристик самой интерферограммы (частот интерференционных полос). Компенсация осуществляется следующим образом:

$$\Delta\phi_{m, n}^C = \arg\{\exp[j(\Delta\phi_{m, n} - \Phi_{m, n}^C)]\}. \quad (8)$$

При выравнивании происходит перенос спектра интерферограммы в область низких частот, что позволяет трактовать ее как демодуляцию пространственной частоты интерференционного сигнала. Одновременно с этим изменяется и характер интерференционных полос: если до выравнивания они следуют через интервал, равный высоте неоднозначности h_A , и в направлении, взятом вдоль линии визирования РСА, то после выравнивания полосы они следуют с тем же интервалом, но в направлении нормали к поверхности, использованной для построения синтетической опорной фазы. Учитывая характер преобразования спектра при выравнивании, представляется ошибочным выполнение некогерентного накопления перед выравниванием, как это реализовано в программных пакетах SARscape и PHOTOMOD RADAR: несмотря на небольшую экономию вычислительных ресурсов, повреждения сигнала, связанные с искажением спектра, еще не смещенного в область низких частот, при понижении частоты дискретизации, усложняют процесс развертывания фазы и отрицательным образом сказываются на точности получаемого результата.

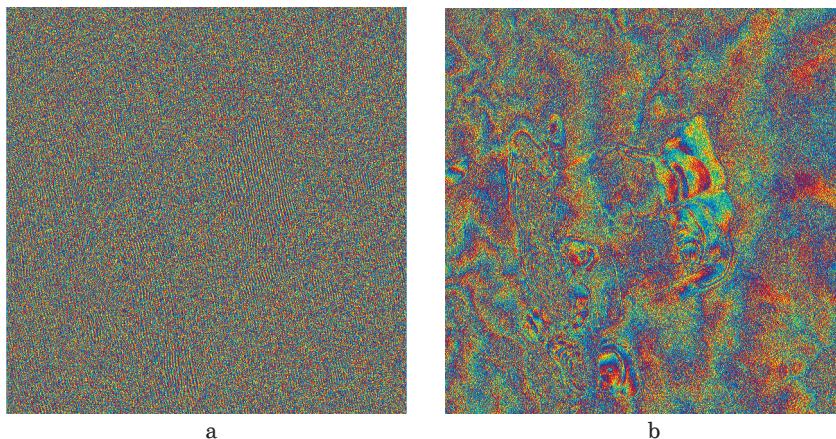


Рис. 3. Выравнивание интерферограмм: а) исходная интерферограмма; б) интерферограмма после выравнивания

Fig. 3. Interferograms flattening:
a) raw interferogram; b) flattened interferogram

Межэлементное некогерентное накопление (НкН) интерференционного сигнала заключается в суммировании его соседних отсчетов с равными (либо неравными, но действительнонозначными) весами, что точки зрения теории цифровой обработки сигналов и изображений представляет собой компрессию (прореживание) частоты дискретизации с предварительной фильтрацией, как правило, усредняющим фильтром. Некогерентное накопление позволяет

ет снизить уровень флуктуаций интерферометрической фазы при одновременном ухудшении разрешающей способности данных. Кроме того, некогерентное накопление позволяет согласовать пространственные разрешения интерферограммы по азимуту и на-клонной дальности, а также ускорить выполнение последующих этапов интерферометрической обработки. Влияние некогерентного накопления на плотность распределения фазы p_ϕ подробно рассматривается в [18] и описывается (с точки зрения плотности распределения интерферометрической фазы) следующим образом:

$$p_\phi = \frac{\Gamma\left(L + \frac{1}{2}\right)(1-\rho^2)^L \rho \cos(\Delta\phi - \Delta\phi_0)}{2\sqrt{\pi}\Gamma(L)\left(L + \frac{1}{2}\right)(1-\rho^2)\cos^2(\Delta\phi - \Delta\phi_0)} + \frac{(1-\rho^2)^L}{2\sqrt{\pi}} {}_2F_1\left(L, 1, \frac{1}{2}; \rho^2 \cos^2(\Delta\phi - \Delta\phi_0)\right), \quad (9)$$

где ${}_2F_1(\cdot, \cdot; \cdot)$ – гипергеометрическая функция, L – количество накапливаемых элементов КРЛИ.

Подавление фазового шума является критически важным этапом интерферометрической обработки, поскольку вне зависимости от условий съемки исходный уровень фазового шума делает невозможным дальнейшее восстановление абсолютной фазы, его результатом является слаженная интерферограмма $\Delta\phi_{m, n}^F$. Подавление фазового шума интерферограммы осуществляется, как правило, двумерными линейными либо адаптивными фильтрами:

$$\Delta\phi_{m, n}^F = F\{\Delta\phi_{m, n}^C\}, \quad (10)$$

где $F\{\cdot\}$ – оператор, реализуемый фильтром (линейный или нелинейный). Наибольшее распространение среди методов фильтрации получил фильтр Голдштейна [49–50], вычисляющий двумерный БПФ-спектр $F_\phi(k, l)$ блока интерферограммы, который затем взвешивается следующим образом:

$$G_\phi(k, l) = |F_\phi(k, l)|^{1-\hat{\rho}} \cdot F_\phi(k, l), \quad (11)$$

где $G_\phi(k, l)$ – двумерный спектр обрабатываемого блока интерферограммы, из которого обратным двумерным БПФ восстанавливается блок слаженной интерферограммы. Фильтр работает в перекрывающихся блоках, после обработки (11) смежные блоки сшиваются с помощью взвешивающей функции треугольного вида.

При подавлении фазового шума формируется новая – слаженная интерферограмма $\Delta\phi_{m, n}^F$, которая далее преобразуется в абсолютную фазу путем развертывания:

$$\Psi_{m, n} = \Delta\varphi_{m, n}^F + 2\pi k_{m, n}, \quad (12)$$

где $k_{m, n} \in Z$ – априорно неизвестные целочисленные значения. Разворачивание сглаженной интерферограммы также является критически важным этапом интерферометрической обработки в задаче получения цифровых моделей поверхности, поскольку используемые при выполнении этой задачи геометрические параметры (длина нормальной составляющей базы, длина волны РСА) крайне редко позволяют получить однозначную относительную фазу. Его реализация осложняется наличием на интерферограмме остаточных фазовых шумов и неоднозначностей (разрывов), что делает решение неоднозначным, сложным теоретически и емким вычислительно. Для развертывания фазы существует несколько десятков алгоритмов [39; 48; 51], основанных на аппарате из различных областей современной математики: от теории векторных полей (метод Голдштейна, метод функций Грина) и теории оптимизации (метод целочисленной оптимизации, метод оптимизации сетевых потоков) до теории фильтрации (метод фильтрации Калмана, нелинейная стохастическая фильтрация и др.) и генетических алгоритмов, нейронных сетей и т.п.

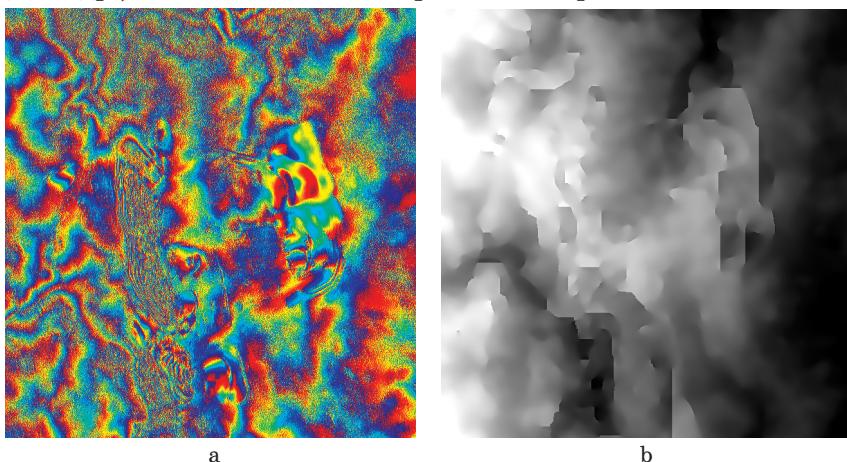


Рис. 4. Подавление фазового шума и развертывание интерферограммы: а) сглаженная интерферограмма; б) развернутая интерферограмма – восстановленная абсолютная фаза

Fig. 4. The phase noise suppression and the unwrapping of the interferogram: a) smoothed interferogram; b) unwrapped interferogram, or the restored absolute phase

Абсолютная фаза интерференционного сигнала связана с формой рельефа поверхности с точностью до постоянного сдвига, коэффициента вертикального масштаба (высоты неоднозначности, отнесенной к интервалу однозначности фазы 2π) и де-

терминированного преобразования, исправляющего искажения геометрии бокового обзора РСА. Процедура преобразования абсолютной интерферометрической фазы в карту высот называется геокодированием интерферограммы («InSAR geocoding» [52]) или преобразованием фазы в высоты или смещения (Phase-to-Height conversion, Phase-to-Displacement conversion [53]). Для выполнения этого этапа существуют методы прямого пересчета, не требующие априорной информации о местности: метод разделения спектра [22; 54] и метод остаточной задержки [55], однако на практике используются более точные методы геокодирования по наземным опорным точкам [22; 56]. В этом случае координаты наземных опорных точек, исчисляемые в системах геодезических координат и высот, используются для уточнения параметров орбиты носителя РСА путем решения систем уравнений « дальность-доплер » для всех наборов данных, использованных в интерферометрическом синтезе [56; 57], и затем вычисления на их основе геодезических координат и высот каждого элемента интерферограммы. Искажения бокового обзора при формировании матрицы высот при этом исправляются путем переноса положения элемента в направлении дальности на величину $htg\theta_0$. Различные способы геокодирования интерферометрических данных ДЗЗ рассматриваются и сравниваются в [58].

Геопривязка абсолютной фазы заключается в выполнении преобразования абсолютных фаз и их координат в полетной системе в элементы матрицы высот [59]. Поскольку при этом должна осуществляться коррекция искажений бокового обзора, связанная с перемещением положения элемента, то на первом шаге геоприязки будет получена не регулярная сетка, а облако точек в пространстве:

$$\{m_i, n_i, \Psi_{m_i, n_i}\} \rightarrow \{B_i, L_i, H_i\}, \quad (13)$$

где B_i и L_i – широты и долготы точек, которое далее приводится к регулярному виду путем интерполяции. Реализация преобразования (13) предполагает использование наземных опорных точек $\{P_i\}$, имеющих высокоточные координаты и хорошо опознаваемые на амплитудном РЛИ. В качестве таких точек подходят пересечения дорог, мосты [59] и др. Координаты опорных точек используются для решения систем уравнений « дальность-доплер » для первого и второго КРЛИ:

$$f_{id1, 2} = \frac{2 \left((\vec{P}_i - \vec{S}_{i1, 2}), (\vec{V}_{Pi} - \vec{V}_{S_{i1, 2}}) \right)}{\lambda \left| \vec{P}_{iV} - \vec{S}_{i1, 2} \right|}; \quad (14)$$

$$R_{i1, 2} = \left| \vec{P}_{iV} - \vec{S}_{i1, 2} \right|,$$

где $f_{d1,2}$ – центральные доплеровские частоты элемента 1-го и 2-го КРЛИ, \vec{P}_{iV} – вектор геоцентрических координат i -й опорной точки, $\vec{S}_{i1,2}$ – вектор геоцентрических координат фазового центра антенны при съемке 1-го и 2-го КРЛИ [56]. Разрешая систему относительно $\vec{S}_{i1,2}$, становится возможным высокоточное вычисление компонентов интерферометрической базы B_{\perp} и B_{\parallel} (учитывая, что $\vec{B}_i = \vec{S}_{i1} - \vec{S}_{i2}$) и пересчет абсолютной фазы в высоту, простейшим образом реализуемый с помощью выражения:

$$h_{m,n} \approx \frac{\lambda R_1 \sin \theta_0}{4\pi B_{\perp m,n}} \Psi_{m,n}. \quad (15)$$

Таким образом, интерферометрическая обработка радиолокационных данных является сложным многоэтапным процессом, целью которого является корректное восстановление абсолютной фазы, заключающееся в минимизации ошибок и разрешении неоднозначностей, вносимых при радиолокационной съемке. Абсолютная фаза, в свою очередь, позволяет сформировать карту рельефа зондируемой поверхности.

Источники ошибок абсолютной фазы

Различные авторы и разработчики систем предлагают разные подходы к учету и классификации источников ошибок. Так, предлагается концепция «бюджета ошибки», в которой отражены различные составляющие ошибки измерения высоты [46]. Выделяются внутренние (присущие системе) ошибки измерения высоты (intrinsic height errors), связанные с неточностью измерения параметров интерферометрической системы, и позиционные ошибки, связанные с неточностью геопривязки. Там же предлагается и альтернативная классификация, отталкивающаяся от способов борьбы с источниками ошибок, где выделяются:

- случайные ошибки – шумы интерферометрической фазы, которые могут быть снижены путем фильтрации или усреднения, но не могут быть исправлены с помощью наземных опорных точек;
- геометрические искажения (дисторсии), к которым отнесены ошибки позиционирования КА по высоте и углу крена, исправляемые двумя опорными точками, ошибки измерения базы и ошибки синхронизации (атмосферные задержки), исправляемые тремя опорными точками;
- ошибки позиционирования, к которым отнесены ошибки позиционирования КА вдоль азимута, такие ошибки исправляются тремя опорными точками.

Похожим образом систематизированы в рамках иерархической схемы различные составляющие ошибки, связанные с неточностью измерения орбитальных параметров, и их влияние на величину вертикальной точности (схема построена в рамках требований к бортовой инерциальной навигационной системе AODA PCA-интерферометра SIR-C/X в миссии SRTM) [21].

Другой подход к оцениванию влияния различных источников ошибок используется в [17; 47], где вместо собственно ошибок рассматриваются и классифицируются источники декорреляции интерферометрических данных в рамках модели парциальных коэффициентов когерентности, при этом коэффициент когерентности интерферограммы вычисляется путем произведения парциальных коэффициентов, с.к.о. ошибки измерения фазы и высоты определяются следующим образом [18; 46]:

$$\sigma_{\Delta\phi} = \frac{\pi^2}{3} - \pi \arccos \rho + \arcsin^2 \rho - \frac{Li_2(\rho^2)}{2} \approx \frac{1-\rho^2}{2\rho^2}, \quad (16)$$

$$\sigma_h = \frac{\lambda R_0 \operatorname{tg} \theta_0}{4\pi B} \sigma_{\Delta\phi}, \quad (17)$$

где $Li_2(\cdot)$ – дилогарифм Эйлера. Цебкер выделяет 4 таких источника: временную, пространственную и тепловую декорреляции и декорреляцию, вызванную изменением угла визирования цели во время синтеза апертуры (rotation-induced decorrelation), а также предлагает модели расчета этих величин [17]. Более полная классификация приведена у Ханссена, где выделено и подробно проанализировано 6 источников декорреляций:

- геометрическая декорреляция, вызванная различием углов визирования в вертикальной плоскости;
- доплеровская декорреляция, вызванная различием углов визирования в плоскости апертуры и цели;
- объемная декорреляция;
- шумовая декорреляция;
- временная декорреляция;
- декорреляция, возникающая при обработке данных (при взаимопривязке РЛИ) [47].

При этом в классификациях не упоминаются явным образом, но отмечаются отдельно ошибки разрешения фазовой неоднозначности, которые, как отмечается, существенно ухудшают точность получаемого результата [22; 47; 60]. Борьба с такими ошибками подразумевает использование априорной информации о форме рельефа и совершенствование методов развертывания интерферометрической фазы и в рамках данной статьи не рассматривается (подробно эти вопросы рассматриваются в упомянутых ранее работах [39; 48; 51; 61]).

Оценивание точности восстановления абсолютной фазы на различных этапах интерферометрической обработки

Актуальность задачи оценивания точности высотных данных, получаемых при интерферометрической обработке радиолокационных данных ДЗЗ, стала очевидна с первых лет использования данной технологии. Оценка точности РСА-интерферометра Грэхэма проводилась путем многократных наблюдений 36 хорошо опознаваемых контрольных точек и последующего вычисления с.к.о. интерферометрических фаз, полученных по этим наблюдениям. Полученное значение в 0,2 мрад (при длине волны зондирующего сигнала 3 см) рассматривалось как достаточное для составления топографических карт масштаба 1:250 000. Голдштейн и Цербкер для авиаинтерферометра CV990 оценивали погрешности измерений высоты путем сравнения с картографическими данными только для пяти точек интерферограммы (фазовая неоднозначность разрешалась вручную), не делая подробных обобщающих выводов о точности [12].

По мере накопления экспериментальных данных космической РСА-интерферометрии во второй половине 1980-х – 1-й половине 1990-х. гг. (SEASAT, SIR-B, Алмаз-1, ERS-1/2) вопросам оценки точности путем сравнения с эталонными высотными данными стало уделяться еще больше внимания. В качестве основного численного критерия оценки в зарубежных работах точности высот рельефов традиционно используется среднеквадратическая ошибка (root mean square error, RMSE, [62]):

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_i (h_i - h_{i0})^2}{N}}, \quad (18)$$

где h_i – измеренные значения высот в контрольных точках, где h_{i0} – эталонные значения высот, N – количество контрольных точек. Отмечается, что в ряде случаев такая оценка может давать искаженные результаты и предлагается раздельно учитывать матожидание u_h разностей $(h_i - h_{i0})$ и их среднеквадратичное отклонение σ_h в виде [62]:

$$Acc = u_h \pm \sigma_h, \quad (19)$$

где

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum_i ((h_i - h_{i0}) - u_h)^2}{N}}. \quad (20)$$

В работах 1990-х гг. и более поздних оба способа используются в равной мере. Также в публикациях американских (как правило) авторов используются критерий линейной ошибки LE90 (linear error, 90 % -interval) и LE95, принятые американскими

стандартами NMAS и FGDC, и при условии гауссового распределения ошибок и нулевого матожидания совпадающие с величиной с.к.о. с точностью до коэффициента [63]. Еще одним дополнительным к приведенным выше и широко применяемым способом «более тонкой» оценки вертикальной точности при наличии большого числа контрольных точек является построение и анализ гистограмм разностей ($h_i - h_{i0}$).

Значительное количество работ, посвященных оценке точности ЦМР, получаемых интерферометрическими РСА, появилось в 2000-х гг., что связано, с одной стороны, с успешным выполнением миссии SRTM в феврале 2000 г., а с другой – с прекращением практики искусственного загрубления навигационных сигналов системы GPS в мае 2000 г. Последнее сделало доступным новые способы получения эталонных высот – стационарные и кинематические (GPS-трекинг) навигационные измерения.

Важной вехой в исследованиях о точности интерферометрического метода в целом стал вышедший в 2005 г. отчет о поверке (валидации) точности высотных данных, полученных миссией SRTM [23]. Проверка производилась с использованием кинематических GPS-измерений 86 тыс. наземных контрольных точек и других эталонных данных. Результаты были представлены в виде, аналогичном (19), но с использованием LE90 вместо с.к.о., и гистограмм распределения ошибки и вычислялись в пределах отдельных континентов. Исследовались «абсолютная» (в пределах континента в целом) и «относительная» (в пределах градусного листа) ошибки, а также плановая ошибка (Absolute geolocation error). При ожидавшихся значениях абсолютной и относительной ошибок измерения высот (LE90) в 16 м и 10 м соответственно, были получены значения от 5,6 до 9,0 м для абсолютной ошибки и от 4,7 м до 9,8 м для относительной, что оказалось лучше ожидаемых значений [21; 23] и подтвердило эффективность интерферометрического метода оценки высот рельефа.

Что касается других работ по оцениванию точности данных SRTM, научометрическая база данных SCOPUS по запросу «*TITLE (((shuttle AND radar AND mission) OR srtm) AND (accuracy OR validation))*» выявляет 81 работу среди всех индексированных публикаций за период с 2000 по 1-ю половину 2020 гг., среди этих работ стоит выделить особо следующие:

1. Статью Charles G. Brown, Jr., Kamal Sarabandi, Leland E. Pierce «Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data» ([64], 2005 г.), в которой описывается технология оценки точности с использованием угловых отражателей и активных калибраторов, установленных во время съемки. Экспе-

римент проводился на территории Юго-Восточного Мичигана (США). В качестве эталонной использовалась ЦМР USGS масштаба 1:24 000 с дополнительной GPS-калибровкой, позволившей получить вертикальную точность порядка 0,7 м. В итоге было получено расхождение (по критерию среднеквадратичного отклонения) между SRTM и эталонной ЦМР в 2,6 м (при систематической ошибке в 0,9 м), при этом в статье указывается, что при более точном совмещении моделей можно достичь 2,0 м, при этом оба значения в несколько раз лучше указанного в спецификации (10 м).

2. Статью InSu Lee, Hsing-Chung Chang, Linlin Ge «GPS campaigns for validation of InSAR derived DEMs» ([65], 2005 г.), в которой описана технология оценки вертикальной точности ЦМР ERS и SRTM с использованием GPS-аппаратуры в режиме кинематики реального времени (RTK GPS), позволяющей регистрировать пространственные траектории перемещения приемника (треки) с погрешностью позиционирования не хуже нескольких десятков сантиметров. Исследование проводилось в местности Аппин в Австралии. Сравнения значений высот полученных треков с высотами матриц исследуемых ЦМР по критерию с.к.о. (RMSE) дали результат в 2,16 м для ЦМР SRTM и 20.10 м для ЦМР ERS-Tandem.

3. Статью P.A.M. Berry, J.D. Garlick, R.G. Smith «Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry» ([66], 2007 г.), где описано оценивание точности SRTM в глобальном масштабе с использованием данных спутниковой высотометрии Ки-диапазона. По результатам сравнения SRTM и 54 миллионов отметок высот (с шагом в 350–390 м), полученных альтиметрами КА ERS-1 и ENVISAT были получены числовые характеристики точности измерения высот (средние разности и средние квадратичные отклонения) в границах отдельных континентов. С.к.о. расхождений составило от 11,5 м для Австралии до 18,5 м для Южной Африки, причем для последней также наибольшей оказалась и средняя разность (12,2 м против 1,1 м для Австралии). Высокие расхождения результатов измерений для Южной Африки увязаны с преобладанием высокогорного рельефа и с большой площадью и густотой лесных массивов на этом континенте: отдельно проведенный анализ расхождений для областей лесной растительности показал среднее расхождение более чем в 20 м. При этом следует отметить, что вопрос о точности самих высотометрических данных в статье хоть и затрагивается, но конкретных значений не приводится.

4. Статья G. Sun, K.J. Ranson, V.I. Kharuk, K. Kovacs «Validation of surface height from shuttle radar topography

mission using shuttle laser altimeter» ([67], 2007 г.), где в отличие от предыдущей работы в качестве эталонных используются высоты, полученные с использованием лазерной космической съемки (миссия SLA-02, 1997 г.). Отмечается, что точность измерения высоты при лазерном способе сканирования зависит от уклона рельефа 0,2 м (при отсутствии уклона) до 6 м (при уклоне в 40°). В ходе анализа точности SRTM были построены корреляционные поля (SLA/SRTM высоты) получены средние разности и с.к.о. (RMSE) для лесной поверхности, открытой местности и общие. Получено с.к.о. высот в 8,2 м (общая), при этом показано, что для лесной и открытой местности с.к.о. отличаются незначительно (7,4 и 6,5 м, соответственно), однако для лесной поверхности значительно выше среднее расхождение обоих способов измерения (18,2 против 8,7 м).

5. Из относительно недавних работ, посвященных оценке точности и калибровке SRTM, следует упомянуть статью Marc Simard, Maxim Neumann, Sean Buckley «Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States» ([68], 2016 г.), где кратко описывается процесс коррекции SRTM с помощью данных спутниковой лазерной высотометрии ICESat/GLAS (1,5 миллиарда отметок высот, полученных в 2003–2009 гг.). Ожидается, что обновленная версия SRTM (NASADEM) будет иметь с.к.о. высот около 2,3 м при систематической ошибке в 10 см, однако к 2020 г. NASADEM по-прежнему не выпущена.

Также большое количество работ посвящено оценке точности SRTM и других интерферометрических моделей рельефа (ERS-1/2, TanDEM-X, GAOFEN-3 INSAR DEM и др.) для конкретных регионов в разных частях земного шара (SCOPUS по запросу «InSAR» и «Accuracy» выявляет 39 публикаций за период с 1997 по 2019 г. по названию и 380 – по названию и ключевым словам), что свидетельствует об актуальности тематики. Таким образом, оценивание точности цифровых моделей рельефа, получаемых радиолокационной интерферометрической съемкой, производилось, как правило, путем сравнения с эталонной цифровой моделью рельефа, представленной в форме матрицы высот или набора контрольных точек, а основным критерием точности является с.к.о. измеренных и эталонных высот (или связанные с ним оценки – RMSE, LE90) в узлах матрицы или контрольных точках. Источниками эталонных высот являются, как правило, глобальные цифровые модели рельефа, результаты GPS-измерений, отметки нормальных высот цифровых топографических карт (с преобразованием нормальных высот в геодезические). При этом практически во всех ра-

ботах рассматривается и обсуждается точность интерферометрического метода построения ЦМР в целом («an end-to-end InSAR DEM validation» [52]), но почти не затрагиваются вопросы, связанные с эффективностью применения конкретных алгоритмов интерферометрической обработки, при этом существенное влияние методов обработки на качество получаемого результата отмечается в обзорных работах и монографиях [39; 47]. В тех же работах, где эффективность отдельных алгоритмов все же исследуется, используются либо завершение цепочки обработки [38–39], либо имитационное моделирование [43; 69], либо сравнение результатов по косвенным признакам [61; 70]. Таким образом, представляется актуальной задача разработки такой методики оценивания точности результата интерферометрической обработки, при использовании которой был бы возможен автоматический перебор комбинаций параметров исследуемых алгоритмов и автоматический перебор самих используемых алгоритмов.

Смилл и Ньюэш предлагают 3 различных подхода к оценке точности высот, получаемых при РСА-интерферометрии:

- компенсация фазового уклона (выравнивание) с использованием синтетической фазы, построенной по эталонной ЦМР (DEM Flattening using synthetic interferogram);
- обратное геокодирование (backward geocoding), заключающееся в преобразовании эталонной ЦМР в полетную с.к. и сравнение абсолютных фаз;
- прямое геокодирование (forward geocoding) абсолютной фазы в геодезическую с.к. и сравнение высот [52].

Сами Смилл и Ньюэш отдают предпочтение последнему варианту как обеспечивающему полную сквозную проверку технологии построения ЦМР с использованием РСА-интерферометрии («a true end-to-end validation of the InSAR height model generation process»), однако, очевидно, такой подход осложняет исследование эффективности конкретных алгоритмов, реализующих отдельные этапы обработки и делает невозможной автоматизацию перебора параметров алгоритмов, поскольку при каждом исследуемом наборе параметров потребуется производить вручную контролируемое геокодирование. Первые же два подхода дальнейшего развития не получили, но, как было показано автором в докладах на конференциях «Радиолокация, навигация, связь – RLNC*2016» (г. Воронеж, 19–21 апреля 2016 г. [71]), 16-й международной конференции по численному анализу и прикладной математике – «ICNAAM-2018» (Греция, г. Родос, 13–18 сентября 2018 г. [72]), «Актуальные проблемы электронного приборостроения – АПЭП-2018» (г. Новосибирск, 2–6 ок-

тября 2018 г., [73]), «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии – КРЫМИКО-2019» (г. Севастополь, 8–14 сентября 2019 г. [74]) и др., использование приемов, основанных на идее обратного геокодирования (обратное преобразование эталонных высот, формирование эталонов абсолютных фаз и высот в бортовой системе координат носителя, процедура пространственного совмещения эталонных и измеренных данных), позволяет наиболее эффективным образом оценивать точность результатов работы алгоритмов интерферометрической обработки (алгоритмов некогерентного накопления, подавления фазового шума, развертывания фазы) при различных параметрах и сочетаниях параметров, поскольку в этом случае для получения результата не требуется завершения всей цепочки интерферометрической обработки. Получаемые при таком подходе функции зависимости ошибки (в смысле с.к.о. измеренных и эталонных фаз и высот) позволяют выявлять оптимальные значения и сочетания значений параметров алгоритмов интерферометрической обработки радиолокационных данных ДЗЗ, получаемых различными съемочными системами и в различных режимах съемки.

Заключение

Проведенный обзор работ, посвященных тенденциям развития современных радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли, показал, что среди них важное место занимают методы космической радиолокационной интерферометрии, которые широко применяются и используются для решения научных и практических задач ДЗЗ, среди которых основными являются задачи построения цифровых моделей рельефа земной поверхности и мониторинг подвижек рельефа. Сложность и многоэтапность интерферометрической обработки и многообразие съемочных систем и режимов их работы делают актуальной задачи экспериментального оценивания точности результата интерферометрической обработки при различных условиях и поиска оптимальных (с точки зрения точности получаемого результата) алгоритмов для реализации отдельных этапов. Показано, что существующие и применяемые экспериментальные методы оценки точности результатов интерферометрической обработки реальных съемочных данных используют сквозную поверку результата, при которой анализ эффективности работы алгоритмов некогерентного накопления, подавления фазового шума и развертывания фазы с перебором параметров и настроек существенно затруднен. Предложен способ оценивания точности, основанный на обратном геокодировании эталонных высотных данных.

Список литературы

1. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Jr. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. 2nd ed. USA: John Wiley & Sons; 2001.
2. Goldstein R. M., Gillmore W. F. Radar observations of Mars. *Science*. 1963;141(3586):1171–1172. DOI: 10.1126/science.141.3586.1171-a.
3. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar observations of Mercury. *Science*. 1963;142(3590):381–382. DOI: 10.1126/science.142.3590.381.
4. Goldstein R. M. Radar observations of Jupiter. *Science*. 1964;144(3620):842–843. DOI: 10.1126/science.144.3620.842.
5. Goldstein R. M. Radar Investigations of the Planets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1964;12(7):865–872. DOI: 10.1109/TAP.1964.1138339.
6. Котельников В. А., Ржига О. Н., Александров Ю. Н., Дубровин В. М., Морозов В. А., Петров Г. М., Шаховской А. М., Францессон А. В. Развитие радиолокационных исследований планет в Советском Союзе. В: Котельникова В. А. (ред.) *Проблемы современной радиотехники и электроники*. М.: Наука; 1980. С. 246–277. Режим доступа: <https://docplayer.ru/26396342-Razvitie-radiolokacionnyh-issledovaniy-planet-v-sovetskem-soyuze-vvedenie.html>
7. Александров Ю. Н., Вышлов А. С., Дубровин В. М., Зайцев А. Л., Игнатов С. П., Каевицер В. И., Котельников В. А., Крымов А. А., Петров Г. М., Ржига О. Н., Тагаевский А. Т., Хасянов А. Ф., Шаховской А. М. Радиолокационные наблюдения Марса, Венеры и Меркурия на волне 39 см в 1980 г. *Доклады АН СССР*. 1980;255(6):1334–1338.
8. Матвеенко Л. И., Кардашев Н. С., Шоломицкий Г. Б. О радиоинтерферометре с большой базой. *Известия вузов. Радиофизика*. 1965;8(4):651–654.
9. Graham L. C. Synthetic interferometric radar for topographic map-ping. *Proceedings of the IEEE*. 1974;62(6):763–768. DOI: 10.1109/PROC.1974.9516.
10. Gabriel A. K., Goldstein R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*. 1988;9(5):857–872. DOI: 10.1080/01431168808954901.
11. Li F. K., Goldstein R. M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990;28(1):88–97. DOI: 10.1109/36.45749.
12. Zebker H.A., Goldstein R.M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*. 1986;91(B5):4993–4999. DOI: 10.1029/JB091iB05p04993.
13. Goldstein, R.M., Barnett, T.P., Zebker, H.A. Remote sensing of ocean currents. *Science*. 1989;246(4935):1282–1285. DOI: 10.1126/science.246.4935.1282.
14. Shemer L., Kit E. Simulation of an interferometric synthetic aperture radar imagery of an ocean system consisting of a current

and a monochromatic wave. *Journal of Geophysical Research*. 1991;96(C12):22063–22073. DOI: 10.1029/91JC01874.

15. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 1989;94(B7):9183–9191. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.

16. Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*. 1988;23(4):713–720. DOI: 10.1029/RS023i004p00713.

17. Zebker H.A., Villasenor H.A. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;30(5):950–959. DOI: 10.1109/36.175330.

18. Bamler R., Hartl, P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 1998;14(4):r1–r54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.

19. Агапов С. В. *Фотограмметрия сканерных снимков*. М.: Картгоцентри-Геодезиздат; 1996.

20. Тюфлин Ю. С. Преобразование космических радиолокационных изображений к снимкам центрального проектирования. *Геодезия и картография*. 1995;(12):24–28.

21. Duren R., Wong E., Breckenridge B., Shaffer S., Duncan C., Tubbs E. F., Salomon P. M. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. *Proceedings of SPIE*. 1998;3365:51–60. DOI: 10.1117/12.317529.

22. Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodrigues E., Goldstein R. M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000;88(3):333–382. DOI: 10.1109/5.838084.

23. Rodriguez E., Morris C. S., Belz J. E., Chapin E. C., Martin J. M., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products*. Technical report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California; 2005.

24. Баранов Ю. Б., Кантемиров Ю. И., Киселевский Е. И., Болсуновский М. А. Построение ЦМР по результатам интерферометрической обработки радиолокационных изображений ALOS PALSAR. *Геоматика*. 2008;(1):37–45. Режим доступа: https://sovzond.ru/upload/iblock/24e/2008_01_006.pdf

25. Горячкин О. В., Дмитренок В. И., Харитонова А. А. Экспериментальные результаты многопроходной радиолокационной интерферометрической съемки, полученные в рамках акции «Самара сквозь облака». В: *Физика и технические приложения волновых процессов: материалы 9-й Междунар. науч. конф.*, Челябинск, 13–17 сент. 2010 г. Челябинск: Изд-во Челяб. гос. ун-та; 2010. С. 173–174.

26. Евтушенин А. В., Филатов А. В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи Западной Сибири методом SAR-интерферометрии по данным ENVISAT/ASAR и ALOS/PALSAR. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли*. 2010;4(2):198–233.

- ли из космоса. 2009;6(2):46–53. Режим доступа: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009%2C2/46-53.pdf
27. Васильский А. С., Михайлов С. И., Черноморец С. С. Методология мониторинга потенциально опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру на участке Туапсе–Адлер с использованием данных спутниковой съемки. В: *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: 12-я Всерос. открытая конф., Москва, 2014*. Режим доступа: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/7584850/>
28. Sentinel 1 Toolbox. *STEP – Science Toolbox exploitation platform*. European Space Agency, ESA. Available at: <https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/>
29. Cloude S., Papathanassiou K. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998;36(5):1551–1565. DOI: 10.1109/36.718859.
30. Kim Y., Zyl J. V. Overview of Polarimetric Interferometry. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*. 2000;(3):231–236. DOI: 10.1109/AERO.2000.879850.
31. Zhang Q., Yeo T. S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004;42(9):1818–1828. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831863.
32. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K. Multi-base InSAR with enhanced signal processing. In: *4th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 9–12 Sep., 2003*. 2003. P. 405–408. DOI: 10.1109/ICATT.2003.1239243.
33. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001;39(1):8–20. DOI: 10.1109/36.898661.
34. Захаров А. И. *Методы дистанционного зондирования Земли радарами с синтезированной апертурой: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03*. Фрязино; 2012. Режим доступа: <http://www.dslib.net/radiofizika/metody-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-radarami-s-sintezirovannoj-aperturoj.html>
35. Захаров А. И., Костюк Е. А., Денисов П. В., Бадак Л. А. Космическая радиолокационная интерферометрическая съемка Земли и ее перспективы в рамках проекта «Кондор-ФКА». *Журнал радиоэлектроники*. 2019;(1):1684–1719. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.1.2.
36. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Timoshkina E. P., Khairetdinov S. A. Satellite Radar Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas and Displacements of Natural and Man-Made Objects. *Seismic Instruments*. 2018;54:515–520. DOI: 10.3103/S0747923918050092.
37. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. *Радиолокационные системы землеобзора космического базирования*. М.: Радиотехника; 2010. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/book/143>

38. Елизаветин И. В., Ксенофонтов Е. А. Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического РСА. *Исследования Земли из космоса*. 1996;(1):75–90.
39. Шувалов Р. И. *Математическое моделирование фазового градиента для задачи развертки фазы в космической радиолокационной топографической интерферометрии: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 05.13.18.* М.; 2011. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/matematicheskoe-modelirovaniye-fazovogo-gradienta-dlya-zadachi-razvertki-fazy-v-kosmicheskoi>
40. Филатов А. В. *Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.01.* Барнаул; 2009. Режим доступа: <https://www.dissercat.com/content/metod-obrabortki-kompleksnykh-radiolokatsionnykh-interferogramm-v-usloviyakh-vysokoi-vremenno>
41. Бабокин М. И. Алгоритмы оценки относительного рельефа местности в многопозиционных комплексах РСА. *Радиотехника*. 2009;7(7):51–58. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/article/6364>
42. Бабокин М. И. Точность измерения относительного рельефа земной поверхности в многопозиционных комплексах РСА. *Информационно-измерительные и управляющие системы*. 2009;7(10):65–72. Режим доступа: <http://www.radiotec.ru/article/6978>
43. Баскаков А. И., Хо К.-М. Анализ влияния фазовых шумов на точностные характеристики интерферометрических РСА с «жесткой» базой. *Исследование Земли из космоса*. 1998;(2):43–50.
44. Ксендзук А. В., Волосюк В. К., Зеленский А. А., Басарем М. А., Горячkin О. В., Кравченко В. Ф., Кутузов Б. Г., Лукин В. В., Тоцкий А. В., Яковлев В. П. *Цифровая обработка сигналов и изображений*. М.: ФИЗМАТЛИТ; 2007.
45. Коберниченко В. Г. *Радиоэлектронные системы дистанционного зондирования Земли*. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та; 2016. Режим доступа: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/40664>
46. Rodrigues E., Martin J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*. 1992;139(2):147–159. DOI: 10.1049/ip-f-2.1992.0018.
47. Hanssen R. F. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers; 2001. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.
48. Описание модуля Photomod RADAR. Описание интерферометрического процессора. М.: ЗАО «Ракурс»; 2007. Ч. 1–4.
49. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar ice motion interferometry. *Proceedings 3rd ERS Symp. Florence, Italy*. 1997;(2):969–972.
50. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A Modification to the Goldstein RadarInterferogram Filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003;41(9):2114–2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212.

51. Hanwen Yu, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu, Hyongki Lee. Phase Unwrapping in InSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019;7(1):40–58. DOI: 10.1109/MGRS.2018.2873644.
52. Small D., Nuesch D. Validation of Height Models from ERS Interferometry. In: *Proceedings of the ESA FRINGE'96 Workshop, 30 September – 2 October 1996, Zurich, Switzerland*. 1996. Available at: <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/> (Accessed: 20.07.2020).
53. SARscape Technical Description. *L3HARRIS Geospatial*. Available at: https://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/ENVI/SAR_tech_documents/SARscape_Technical_Description.pdf (Accessed: 20.07.2020).
54. Madsen S. N., Zebker H. A., Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993;31(1):246–256. DOI: 10.1109/36.210464.
55. Madsen S. N. On absolute phases determination techniques in SAR interferometry. *Proceedings of SPIE, Orlando, FL, 19–21 Apr. 1995*, 1995;2487:393–401. DOI: 10.1117/12.210860.
56. Holecz I. F., Moreira J. H., Pasquali P., Voigt S., Meier E., Nuesch D. Height model generation, automatic geocoding and mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development, Singapore, 3–8 Aug. 1997*. P. 1929–1931. DOI: 10.1109/IGARSS.1997.609148.
57. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR Image Registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006;44(10):2861–2870. DOI: 10.1109/TGRS.2006.875787.
58. Small D., Pasquali P., Fuglistaler S. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. In: *IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, USA, 31 May 1996*. P. 342–344. DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516334.
59. Small D., Werner C., Nuesch D. Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models. *EARSEL Adv. Remote Sens.* 1995;(4):26–39.
60. Richards M. A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2007;22(9):5–29. DOI: 10.1109/MAES.2007.4350281.
61. Захарова Л. Н. *Методы радиолокационной интерферометрии в исследовании характеристик земных покровов: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.03*. Фрязино; 2011. Режим доступа: <https://www.dissertcat.com/content/metody-radiolokatsionnoi-interferometrii-v-issledovanii-kharakteristik-zemnykh-pokrovov>
62. Zhilin Li. On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy. *Photogrammetric Record*. 1988;12(72):873–877. DOI: 10.1111/j.1477-9730.1988.tb00636.x.

63. Титаров П. С. Характеристики точности координат точек местности – СЕ и LE. *Геопроф. 2010;(1):52–53.* Режим доступа: http://www.geoprofi.ru/education/Article_4543_14.aspx
64. Brown Jr. C. G., Sarabandi K., Pierce L. E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2005;43(8):1707–1715.* DOI: 10.1109/TGRS.2005.851789.
65. Lee I. S., Chang H.-C., Ge L. GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs. *Journal of Global Positioning Systems. 2005;4(1-2):82–87.* DOI:10.5081/jgps.4.1.82.
66. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment. 2007;106(1):17–27.* DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.011.
67. Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment. 2003;88(4):401–411.* DOI: 10.1016/j.rse.2003.09.001.
68. Simard M., Neumann M., Buckley S. Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States. In: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10–15 July 2016.* P. 3227–3229. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729835.
69. Детков А. Н., Объедков В. А. Фильтрация фазового шума в комплексной вейвлет-области в PCA с синтезированной интерферометрической базой. *Труды Военно-воздушной инженерной академии имени профессора Н.Е. Жуковского. 2007;79(2):74–76.*
70. Fabregas C. SAR Interferometric phase denoising. A new approach based on wavelet transform. *Proceedings of SPIE. 2000;4173:199–210.* DOI: 10.1117/12.410656.
71. Сосновский А. В., Коберниченко В. Г. Об оценивании точности цифровых моделей рельефа, получаемых интерферометрическими радиолокаторами с синтезированной апертурой. В: *Радиолокация, навигация, связь (RLNC-2016): материалы 22-й Междунар. науч.-техн. конф., Воронеж, 19–21 апреля 2016 г.* Воронеж: НПФ «САКВОЕЕ»; 2016. Т. 3. С. 1074–1081. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26760231>
72. Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. Accuracy estimation for radar interferometric remote sensing of the Earth data. *AIP Conference Proceedings. 2019;2116(1):390008.* DOI: 10.1063/1.5114403.
73. Sosnovsky A. V., Kobernichenko V. G. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing. In: *14th International Scientific – Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia, 2–6 Oct. 2018.* Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 434–438. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545481.

74. Sosnovsky A., Kobemichenko V. Experimental estimation of phase noise filters efficiency for InSAR processing. *ITM Web of Conferences* 2019;30:15010. DOI: 10.1051/itmconf/20193015010.

References

1. Thompson A. R., Moran J. M., Swenson G. W. Jr. *Interferometry and Synthesis in Radio Astronomy*. 2nd ed. USA: John Wiley & Sons; 2001.
2. Goldstein R. M., Gillmore W. F. Radar observations of Mars. *Science*. 1963;141(3586):1171–1172. DOI: 10.1126/science.141.3586.1171-a.
3. Carpenter R. L., Goldstein R. M. Radar observations of Mercury. *Science*. 1963;142(3590):381–382. DOI: 10.1126/science.142.3590.381.
4. Goldstein R. M. Radar observations of Jupiter. *Science*. 1964;144(3620):842–843. DOI: 10.1126/science.144.3620.842.
5. Goldstein R. M. Radar Investigations of the Planets. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 1964;12(7):865–872. DOI: 10.1109/TAP.1964.1138339.
6. Kote'nikov V. A., Rzhiga O. N., Aleksandrov Yu. N., Dubrovin V. M., Morozov V. A., Petrov G. M., Shakhovskoi A. M., Frantsesson A. V. Development of radar research of planets in the Soviet Union. In: Kotelnikov V. A. (ed.) *Problems of modern radio engineering and electronics*. Moscow: Nauka; 1980, pp. 246–277. (In Russ.) Available at: <https://docplayer.ru/26396342-Razvitie-radiolokacionnyh-issledovaniy-planet-v-sovetskem-soyuze-vvedenie.html>
7. Aleksandrov Yu. N., Vyshlov A. S., Dubrovin V. M., Zaitsev A. L., Ignatov S. P., Kaevitser V. I., Kotel'nikov V. A., Krymov A. A., Petrov G. M., Rzhiga O. N., Tagaevskii A. T., Khasyanov A. F., Shakhovskoi A. M. Radar observations of Mars, Venus and mercury at a 39 cm wavelength in 1980. *Doklady AN SSSR*. 1980;255(6):1334–1338. (In Russ.)
8. Matveenko L. I., Kardashev N. S., Sholomitskii G. B. About a long-baseline radio interferometer. *Izvestiya vuzov. Radiofizika*. 1965;8(4):651–654. (In Russ.)
9. Graham L. C. Synthetic interferometric radar for topographic map-ping. *Proceedings of the IEEE*. 1974;62(6):763–768. DOI: 10.1109/PROC.1974.9516.
10. Gabriel A. K., Goldstein R. M. Crossed orbit interferometry: theory and experimental results from SIR-B. *International Journal of Remote Sensing*. 1988;9(5):857–872. DOI: 10.1080/01431168808954901.
11. Li F. K., Goldstein R. M. Studies of Multibaseline Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1990;28(1):88–97. DOI: 10.1109/36.45749.
12. Zebker H.A., Goldstein R.M. Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research*. 1986;91(B5):4993–4999. DOI: 10.1029/JB091iB05p04993.

13. Goldstein, R.M., Barnett, T.P., Zebker, H.A. Remote sensing of ocean currents. *Science*. 1989;246(4935):1282–1285. DOI: 10.1126/science.246.4935.1282.
14. Shemer L., Kit E. Simulation of an interferometric synthetic aperture radar imagery of an ocean system consisting of a current and a monochromatic wave. *Journal of Geophysical Research*. 1991;96(C12):22063–22073. DOI: 10.1029/91JC01874.
15. Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research*. 1989;94(B7):9183–9191. DOI: 10.1029/JB094iB07p09183.
16. Goldstein R. M., Zebker H. A., Werner C. L. Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Science*. 1988;23(4):713–720. DOI: 10.1029/RS023i004p00713.
17. Zebker H.A., Villasenor H.A. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1992;30(5):950–959. DOI: 10.1109/36.175330.
18. Bamler R., Hartl, P. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*. 1998;14(4):r1–r54. DOI: 10.1088/0266-5611/14/4/001.
19. Agapov S. V. *Photogrammetry of scanner images*. Moscow: Kartgeotsentr-Geodezizdat; 1996. (In Russ.)
20. Tyuflin Yu. S. Converting of space radar images into the central design images. *Geodeziya i kartografiya*. 1995;(12):24–28. (In Russ.)
21. Duren R., Wong E., Breckenridge B., Shaffer S., Duncan C., Tubbs E. F., Salomon P. M. Metrology, attitude, and orbit determination for spaceborne interferometric synthetic aperture radar. *Proceedings of SPIE*. 1998;3365:51–60. DOI: 10.1117/12.317529.
22. Joughin I. R., Li F. K., Madsen S. N., Rodrigues E., Goldstein R. M. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*. 2000;88(3):333–382. DOI: 10.1109/5.838084.
23. Rodriguez E., Morris C.S., Belz J.E., Chapin E.C., Martin J.M., Daffer W., Hensley S. *An assessment of the SRTM topographic products*. Technical report JPL D-31639. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California; 2005.
24. Baranov Yu. B., Kantemirov Yu. I., Kiselevskiy E. I., Bolsunovskiy M. A. Dem generation based on the result of alos palsar data interferometry. *Geomatics*. 2008;(1):37–45. Available at: https://sovzond.ru/upload/iblock/24e/2008_01_006.pdf
25. Goryachkin O. V., Dmitrenok V. I., Kharitonova A. A. Experimental results of multi-pass InSAR survey obtained in the framework of the campaign “Samara through the clouds”. In: *Physics and technical applications of wave processes: Proceedings of the 9th International conference «Physics and technical applications of wave processes, Chelyabinsk, 13–17 Sept. 2010 r. Chelyabinsk: Chelyabinsk State University; 2010, pp. 173–174. (In Russ.)*

26. Yevtyushkin A. V., Filatov A. V. Estimation of Earth surface displacements in area of intensive oil production in Western Siberia by SAR interferometry using ENVISAT/ASAR and ALOS\PALSAR data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa = Current problems in remote sensing of the Earth from space*. 2009;6(2):46–53. (In Russ.) Available at: http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009%2C2/46-53.pdf
27. Vasileisky A. S., Mikhailov S. I., Chernomorets S. S. Methodology for potentially dangerous impacts on railway infrastructure monitoring on the Tuapse-Adler section using satellite data. In: *Current problems in remote sensing of the Earth from space: Proceedings 12th Conference, Moscow, 2014*. (In Russ.) Available at: <https://istina.msu.ru/conferences/presentations/7584850/>
28. Sentinel 1 Toolbox. *STEP – Science Toolbox exploitation platform*. European Space Agency, ESA. Available at: <https://step.esa.int/main/toolboxes/sentinel-1-toolbox/>
29. Cloude S., Papathanassiou K. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998;36(5):1551–1565. DOI: 10.1109/36.718859.
30. Kim Y., Zyl J. V. Overview of Polarimetric Interferometry. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*. 2000;(3):231–236. DOI: 10.1109/AERO.2000.879850.
31. Zhang Q., Yeo T. S. Three-dimensional SAR imaging of a ground moving target using the InSAR technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004;42(9):1818–1828. DOI: 10.1109/TGRS.2004.831863.
32. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K. Multi-base InSAR with enhanced signal processing. In: *4th International Conference on Antenna Theory and Techniques, Sevastopol, Ukraine, 9–12 Sep., 2003*. 2003, pp. 405–408. DOI: 10.1109/ICATT.2003.1239243.
33. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001;39(1):8–20. DOI: 10.1109/36.898661.
34. Zakharov A. I. *Methods of remote sensing of the Earth by synthetic aperture radars*. Fryazino; 2012. (In Russ.) Available at: <http://www.dslib.net/radiofizika/metody-distancionnogo-zondirovaniya-zemli-radarami-s-sintezirovannoj-aperturoj.html>
35. Zakharov A. I., Kostiuk E. A., P Denisov. V., Badak L. A. Earth observation with spaceborne radar interferometric systems and its prospects within the framework of “Condor-FKA” project. *Zhurnal radioelektroniki = Journal of Radio Electronics*. 2019;(1):1684–1719. (In Russ.) DOI: 10.30898/1684-1719.2019.1.2.
36. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Timoshkina E. P., Khairetdinov S. A. Satellite Radar Interferometry: New Technologies for Satellite Monitoring of Mining Areas and Displacements of Natural and Man-

Made Objects. *Seismic Instruments*. 2018;54:515–520. DOI: 10.3103/S0747923918050092.

37. Verba V. S., Neronskii L. B., Osipov I. G., Turuk V. E. *Space-borne Earth Surveillance Radar Systems*. Moscow: Radiotekhnika; 2010. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/book/143>

38. Elizavetin I. V., Ksenofontov E. A. Results of an experimental study of the possibility of precision measurement of the Earth's topography by the interference method based on a space SAR data. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1996;(1):75–90. (In Russ.)

39. Shuvalov R. I. *Mathematical modeling of the phase gradient for the problem of phase unwrapping in space radar topographic interferometry*. Moscow; 2011. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/matematicheskoe-modelirovanie-fazovogogo-gradienta-dlya-zadachi-razvertki-fazy-v-kosmicheskoi>

40. Filatov A. V. *Method for processing complex radar interferograms in conditions of high temporal decorrelation*. Barnaul; 2009. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/metod-robotki-kompleksnykh-radiolokatsionnykh-interferogramm-v-usloviyakh-vysokoi-vremennosti>

41. Babokin M. I. Algorithms for Relative Relief Evaluation in Multiposition SAR Systems. *Radioengineering*. 2009;7(7):51–58. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/article/6364>

42. Babokin M. I. Measurement accuracy of earth surface relative relief in multiposition SAR systems *Radioengineering*. 2009;7(10):65–72. (In Russ.) Available at: <http://www.radiotec.ru/article/6978>

43. Baskakov A. I., Kho K.-M. Analysis of phase noise influence on the accuracy of cross-track InSAR characteristics. *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*. 1998;(2):43–50. (In Russ.)

44. Ksendzuk A. V., Volosyuk V. K., Zelensky A. A., Basaram M. A., Goryachkin O. V., Kravchenko V. F., Kutuza B. G., Lukin V. V., Totskii A. V., Yakovlev V. P. *Digital signal and image processing in radio physical applications*. Moscow: FIZMATLIT; 2007. (In Russ.)

45. Kobernichenko V. G. *Radio-electronic systems of remote sensing of the Earth*. Ekaterinburg: Ural University; 2016. (In Russ.) Available at: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/40664>

46. Rodrigues E., Martin J. M. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*. 1992;139(2):147–159. DOI: 10.1049/ip-f-2.1992.0018.

47. Hanssen R. F. *Radar interferometry. Data interpretation and error analysis*. Kluwer Academic Publishers; 2001. DOI: 10.1007/0-306-47633-9.

48. Photomod RADAR module description. *InSAR processor*. Moscow: Rakurs; 2007. Part 1–4. (In Russ.)

49. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar ice motion interferometry. *Proceedings 3rd ERS Symp. Florence, Italy*. 1997;(2):969–972.

50. Baran I., Stewart M. P., Kampes B. M., Perski Z., Lilly P. A Modification to the Goldstein RadarInterferogram Filter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003;41(9):2114–2118. DOI: 10.1109/TGRS.2003.817212.
51. Hanwen Yu, Yang Lan, Zhihui Yuan, Junyi Xu, Hyongki Lee. Phase Unwrapping in InSAR. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. 2019;7(1):40–58. DOI: 10.1109/MGRS.2018.2873644.
52. Small D., Nuesch D. Validation of Height Models from ERS Interferometry. In: *Proceedings of the ESA FRINGE'96 Workshop, 30 September – 2 October 1996, Zurich, Switzerland*. 1996. Available at: <http://www.geo.unizh.ch/rsl/fringe96/papers/small-nuesch/> (Accessed: 20.07.2020).
53. SARscape Technical Description. *L3HARRIS Geospatial*. Available at: https://www.harrisgeospatial.com/portals/0/pdfs/ENVI/SAR_tech_documents/SARscape_Technical_Description.pdf (Accessed: 20.07.2020).
54. Madsen S. N., Zebker H. A., Martin J. Topographic mapping using radar interferometry: processing techniques. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1993;31(1):246–256. DOI: 10.1109/36.210464.
55. Madsen S. N. On absolute phases determination techniques in SAR interferometry. *Proceedings of SPIE*, Orlando, FL, Apr. 19–21, 1995;2487:393–401. DOI: 10.1117/12.210860.
56. Holecz I. F., Moreira J. H., Pasquali P., Voigt S., Meier E., Nuesch D. Height model generation, automatic geocoding and mosaicing using airborne AeS-1 InSAR data. In: *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. Remote Sensing – A Scientific Vision for Sustainable Development, Singapore, 3–8 Aug. 1997*. P. 1929–1931. DOI: 10.1109/IGARSS.1997.609148.
57. Sansosti E., Berardino P., Manunta M., Serafino F., Fornaro G. Geometrical SAR Image Registration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2006;44(10):2861–2870. DOI: 10.1109/TGRS.2006.875787.
58. Small D., Pasquali P., Fuglistaler S. A comparison of phase to height conversion methods for SAR interferometry. In: *IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Lincoln, NE, USA, USA, 31 May 1996*. P. 342–344. DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516334.
59. Small D., Werner C., Nuesch D. Geocoding and validation of ERS-1 InSAR-derived digital elevation models. *EARSEL Adv. Remote Sens.* 1995;(4):26–39.
60. Richards M. A. A beginner's guide to interferometric SAR concepts and signal processing. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*. 2007;22(9):5–29. DOI: 10.1109/MAES.2007.4350281.
61. Zakharova L. N. *Methods of radar interferometry in the study of land cover characteristics*. Fryazino; 2011. (In Russ.) Available at: <https://www.dissercat.com/content/metody-radiolokatsionnoi-interferometrii-v-issledovaniakh-kharakteristik-zemnykh-pokrovov>

62. Zhilin Li. On the Measure of Digital Terrain Model Accuracy. *Photogrammetric Record*. 1988;12(72):873–877. DOI: 10.1111/j.1477-9730.1988.tb00636.x.
63. Titarov P. S. Characteristics of Survey Points' Precision – CE and LE. *Geoprofi*. 2010;(1):52–53. (In Russ.) Available at: http://www.geoprofi.ru/education/Article_4543_14.aspx
64. Brown Jr. C. G., Sarabandi K., Pierce L. E. Validation of the Shuttle Radar Topography Mission Height Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005;43(8):1707–1715. DOI: 10.1109/TGRS.2005.851789.
65. Lee I. S., Chang H.-C., Ge L. GPS Campaigns for Validation of InSAR Derived DEMs. *Journal of Global Positioning Systems*. 2005;4(1-2):82–87. DOI:10.5081/jgps.4.1.82.
66. Berry P.A.M., Garlick J.D., Smith R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*. 2007;106(1):17–27. DOI: 10.1016/j.rse.2006.07.011.
67. Sun G., Ranson K.J., Kharuk V.I., Kovacs K. Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment*. 2003;88(4):401–411. DOI: 10.1016/j.rse.2003.09.001.
68. Simard M., Neumann M., Buckley S. Validation of the new SRTM digital elevation model (NASADEM) with ICESAT/GLAS over the United States. In: *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 10–15 July 2016*, pp. 3227–3229. DOI: 10.1109/IGARSS.2016.7729835.
69. Detkov A. N., Obiedkov V. A. Filtration of a phase noise in a complex wavelet-area in a SAR with synthesized interferometric base. *Trudy Voenno-vozdushnoj inzhenernoj akademii imeni professora N.E. Zhukovskogo*. 2007;79(2):74–76. (In Russ.)
70. Fabregas C. SAR Interferometric phase denoising. A new approach based on wavelet transform. *Proceedings of SPIE*. 2000;4173:199–210. DOI: 10.1117/12.410656.
71. Sosnovsky A. V., Kobernichenko V. G. An accuracy estimation of digital elevation models obtained by the method of satellite radar interferometry. In: *Radar, navigation, communication (RLNC-2016): Proceeding 22th International conference, Voronezh, 19–21 April 2016*. Voronezh: SAKVOEE; 2016. Vol. 3, pp. 1074–1081. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26760231>
72. Kobernichenko V. G., Sosnovsky A. V. Accuracy estimation for radar interferometric remote sensing of the Earth data. *AIP Conference Proceedings*. 2019;2116(1):390008. DOI: 10.1063/1.5114403.
73. Sosnovsky A. V., Kobernichenko V. G. An Efficiency Estimation for Multilooking and Phase Noise Suppression Methods for Spaceborne Interferometric Synthetic Aperture Radars Data Processing. In: *14th International Scientific – Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), Novosibirsk, Russia*,

2–6 Oct. 2018. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 434–438. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545481.

74. Sosnovsky A., Kobemichenko V. Experimental estimation of phase noise filters efficiency for InSAR processing. *ITM Web of Conferences* 2019;30:15010. DOI: 10.1051/itmconf/20193015010.

Информация об авторе

Сосновский Андрей Васильевич, ведущий инженер, старший преподаватель департамента радиоэлектроники и связи Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Екатеринбург). Специалист в области обработки данных радиоэлектронных систем дистанционного зондирования Земли.

Information about the author

Andrey V. Sosnovsky is a leading engineer and senior lecturer of the Yeltsin Ural Federal University, department of radio electronics and telecommunications (Ekaterinburg). He is a specialist in the field of signal and data processing in the radar systems of the remote sensing of the Earth.

Поступила / Received: 10.07.2020

Принята в печать / Accepted: 30.07.2020

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). 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). 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 тексте статьи.

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 Jornal” 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 Jornal* 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, представляющей 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 скончального 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 автора¹

¹ 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 Name¹

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 много-

уровневых 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: $U_{\text{ном}}$. 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 «о» вместо «0» (нуля), и наоборот: « μ_0 », но не « μ_o ».
- 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

2020, Vol. 4, 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

Adress of Journal
Office 129a, Mira st.,
620002, Ekaterinburg, Russia
Phone: +7 343 375-97-02
E-mail: 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>

Price is free

УРАЛЬСКИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

2020, Т. 4, № 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

Включен в Объединенный каталог «Пресса России».
Индекс 33049

Адрес редакции:

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

Формат 70x100 1/16. Тираж 500 экз. Уч.-изд. л. 8,4.
Дата выхода в свет 31.07.2020. 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>

Цена свободная



URAL JOURNAL
RADIO ENGINEERING