

**Труды Военно-космической  
академии имени А.Ф. Можайского**  
Научное рецензируемое издание  
Выходит с 1942 года

**Выпуск 670**  
Радиолокационное  
исследование  
природных сред  
2019 г.

Издатель:

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение  
высшего образования «Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского»  
Министерства обороны Российской Федерации

Редакционный совет

Председатель:

Начальник Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского

*доктор техн. наук, профессор* **М.М. Пеньков**

Члены редакционного совета:

**С.В. Буг** – заместитель начальника Михайловской военной артиллерийской академии  
по учебной и научной работе *доктор пед. наук, проф.*;

**В.П. Гаенко** – главный научный сотрудник НИЦ БТС 12 ЦНИИ МО РФ  
*доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники;*

**А.М. Гончаров** – начальник Главного управления научно-исследовательской деятельности и технологического  
сопровождения передовых технологий (инновационных исследований) МО РФ *доктор воен. наук, проф.*;

**М.А. Еремеев** – профессор кафедры института комплексной безопасности и специального приборостроения  
ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Кузичкин** – заместитель генерального директора АО «Научно-исследовательский институт телевидения»  
по информационным технологиям *доктор техн. наук, проф.*;

**Б.В. Соколов** – главный научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации  
Российской академии наук *доктор техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ;*

**К.Г. Ставров** – главный научный сотрудник научно-исследовательского океанографического центра  
Государственного научно-исследовательского навигационно-гидрографического института *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Сержантов** – заместитель начальника Военной академии Генерального штаба Вооруженных Сил  
Российской Федерации по научной работе *доктор воен. наук, проф.*

Главный редактор:

*доктор техн. наук, проф.* **Ю.В. Кулешов**

Редколлегия:

председатель **Ю.В. Кулешов**, *доктор техн. наук, проф.*;

зам. председателя **И.В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*;

ответственный секретарь **А.Л. Федер**, *кандидат техн. наук, доц.*;

**Н.Ф. Аверкиев**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Ф. Алексеев**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Т.В. Алексеев**, *доктор истор. наук, доц.*; **А.П. Алёшкин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**В.Н. Арсеньев**, *доктор техн. наук, проф.*; **Д.Н. Бирюков**, *доктор техн. наук, доц.*;

**И.А. Готюр**, *доктор техн. наук, доц.*; **А.П. Доронин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**И.Ю. Еремеев**, *доктор техн. наук, проф.*; **В.Н. Калинин**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Б.Д. Казахов**, *доктор воен. наук, проф.*; **В.В. Клейменов**, *доктор техн. наук, проф.*;

**В.В. Козлов**, *доктор техн. наук, проф.*; **Н.С. Кужекин**, *кандидат филос. наук, проф.*;

**В.Н. Кузьмин**, *доктор воен. наук, проф.*; **Н.Б. Кунтурова**, *доктор пед. наук, доц.*;

**Е.Л. Лебедев**, *доктор техн. наук, проф.*; **А.Г. Ломако**, *доктор техн. наук, проф.*;

**А.И. Лоскутов**, *доктор техн. наук, проф.*; **Г.Н. Мальцев**, *доктор техн. наук, проф.*;

**Т.О. Мысливцев**, *доктор техн. наук, доц.*; **А.Н. Павлов**, *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Паршуткин**, *доктор техн. наук, проф.*; **Н.А. Репах**, *кандидат филос. наук, доц.*;

**А.М. Сычева**, *доктор техн. наук, проф.*; **И.В. Фоминов**, *доктор техн. наук, доц.*;

**А.В. Харченко**, *доктор техн. наук, проф.*; **К.Ю. Цветков**, *доктор техн. наук, проф.*;

**А.В. Чарушников**, *доктор воен. наук, проф.*

Составители: **И.В. Сахно**, *доктор техн. наук, проф.*; **Г.Г. Щукин**, *доктор физ.-мат. наук, проф.*

Издание зарегистрировано  
Управлением Федеральной службы по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзора).  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ПИ № ФС77-45867 от 20 июля 2011 г.  
Издание включено в перечень рецензируемых научных изданий,  
в которых должны быть опубликованы  
основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук,  
на соискание ученой степени доктора наук (с 01 декабря 2015 г.).  
Издание включено в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)

Ответственный за выпуск:  
начальник РИО **С.В. Чернышев**  
Выпускающий редактор: *Е.И. Леончук*  
Технический редактор  
и компьютерная верстка: *Т.П. Чернова*

Техническая поддержка:  
*А.В. Михалев*

Адрес:  
197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13;  
тел.: 8 (812) 347-97-69;  
<http://trudvka.ru>

Подписано к печ. 15.12.2019.  
Формат печатного листа 445×300/4.  
Уч.-печ. л. 50,00. Уч.-изд. л. 24,75.  
Тираж 50 экз. Заказ 3755/74-15.  
Отпечатано в типографии  
Военно-космической академии  
имени А.Ф. Можайского

## СОДЕРЖАНИЕ

### СВЯЗЬ, УПРАВЛЕНИЕ, НАВИГАЦИЯ И ВОЕННАЯ РАДИОЭЛЕКТРОНИКА

<i>Алёшкин А.П., Бакурский К.В., Невзоров В.И., Полончик О.Л., Сёмин С.Ю.</i> Способ измерения параметров ледяного покрова с помощью бортовой радиоэлектронной станции с синтезированием апертуры на летательном аппарате ....	6
<i>Афонин Г.И., Кошкаров А.С., Мальцев Г.Н.</i> Сравнительный анализ оценок угла изопланатизма при наблюдении наземными оптическими системами космических и астрономических объектов для различных моделей атмосферы.....	11
<i>Ахметов О.И., Белаховский В.Б., Мингалёв И.В., Мингалёв О.В., Суворова З.В., Черняков С.М.</i> Распространение волны инфранизкого частотного диапазона в условиях высыпания заряженных частиц в высокоширотной ионосфере во время магнитной бури .....	17
<i>Бакурский К.В., Гусаков В.М., Цыкунов В.Н.</i> Использование сигналов источников космического радиоизлучения в интересах частотно-временного обеспечения глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС .....	22
<i>Бахолдин В.С., Гаврилов Д.А., Иванов В.Ф., Леконцев Д.А.</i> Метод повышения разрешающей способности многопозиционных радиолокационных систем с синтезированной апертурой на основе расщепления спектра сигнала с линейной частотной модуляцией .....	27
<i>Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г.</i> Исследование фарадеевского вращения вектора поляризации в высокочастотном диапазоне с учетом влияния ионосферы Земли .....	32
<i>Ваганов А.А., Онуфрей А.Ю.</i> Мониторинг земной и водной поверхности в оптическом диапазоне с использованием группировки малых космических аппаратов на низких орбитах.....	38
<i>Гусаков В.М., Иванов В.Ф., Савочкин П.В.</i> Моделирование распространения волн радиолокационной станции с учетом эффекта Фарадея.....	49
<i>Ерохин В.И., Кадочников А.П., Какаев В.В., Соловьёв Ю.В., Сотников С.В.</i> Критерии завязки траекторий космических объектов, одновременно наблюдаемых радиолокационной станцией .....	54
<i>Илюшин Я.А., Падохин А.М.</i> Мониторинг уровня взволнованной поверхности моря методом интерференционной рефлектометрии .....	59

<i>Лопатин В.П., Фатеев В.Ф.</i> Исследование бистатической радиолокационной системы на основе сигналов GPS/ГЛОНАСС в безэховой камере.....	64
<i>Мелешко А.В., Онуфрей А.Ю., Пятков В.В.</i> Синтез цифрового многомерного следящего измерителя координат объекта.....	69
<i>Мухин А.И., Петрова Л.В., Пучкова И.А.</i> Способ мониторинга судов с использованием современных и перспективных спутников связи в условиях отсутствия излучений AIS-транспондеров.....	76
<i>Смирнов А.П.</i> Абсолютный метод измерений эффективной площади рассеяния и технические средства для его реализации.....	81
<b>СБОР И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</b>	
<i>Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н.</i> Возможности мониторинга мезосферы и нижней термосферы Земли с использованием стенда «Сура».....	86
<i>Бисярин М.А.</i> Влияние дисперсионных свойств волноводного канала на модовые характеристики и огибающую мощного сигнала.....	91
<i>Благовещенская Н.Ф., Борисова Т.Д., Йоман Т., Калишин А.С.</i> Мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности: наблюдения и результаты.....	96
<i>Восканян К.Л., Заморин И.С., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С., Симакина Т.Е., Солонин А.С.</i> Оценка эффективности обнаружения опасных явлений погоды на территории Ленинградской области доплеровскими локаторами.....	101
<i>Грибков А.С., Грибков В.С., Моряков С.И., Слухаева Д.А.</i> Способ экспериментального определения вкладов отражений от элементов конструкции объектов по их радиолокационным изображениям.....	105
<i>Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.</i> Моделирование входных данных метеорологического радиолокатора при наблюдении неоднородностей поля ветра.....	111
<i>Дятко Н.А., Каптюг А.А., Кочетов И.В., Телегин В.А.</i> Определение характеристик F-рассеяния в летний период по данным спутника ИК-19.....	116
<i>Калацкий М.Г., Крученицкий Г.М., Чурилова В.А.</i> Сезонная изменчивость зонально осредненных полей вертикального распределения температуры и озона во внеполярных регионах земли.....	120
<i>Камышев А.Л., Матюшенко А.А., Федяй Е.А.</i> О повышении точности измерения координат подвижных объектов измерителем, расположенном на подвижном основании.....	124
<i>Митник Л.М., Митник М.Л., Хазанова Е.С.</i> Океанические и атмосферные фронты в северной части Тихого океана на спутниковых радиолокационных изображениях.....	129



<i>Митник Л.М., Хазанова Е.С.</i> Финский залив Балтийского моря и земные покровы на изображениях спутниковых РСА сантиметрового и дециметрового диапазонов длин волн.....	135
<i>Ростокин И.Н., Ростоккина Е.А., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г.</i> Многочастотные микроволновые радиометрические исследования радиотеплового излучения конвективной облачности в условиях формирования и развития опасных атмосферных метеоявлений .....	140
<b>РАЗРАБОТКА, ИСПЫТАНИЯ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ВООРУЖЕНИЯ И ВОЕННОЙ ТЕХНИКИ. ВОЕННАЯ МЕТРОЛОГИЯ</b>	
<i>Бернгардт О.И., Жеребцов Г.А., Куркин В.И., Кушнарев Д.С., Лебедев В.П., Логовский А.С., Медведев А.В., Олемской С.В., Осипов А.В., Ратовский К.Г., Тимошенко А.В., Филиппов М.Ю., Ясюкевич Ю.В.</i> Перспективы совместного использования оборудования ИСЗФ СО РАН и АО РТИ в задачах учета ионосферной ошибки при функционировании средств радиолокации и радиосвязи....	146
<i>Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Караваяев Д.М., Щукин Г.Г.</i> Результаты микроволнового эксперимента: перспективы радиометра водяного пара .....	150
<i>Ермилов Д.В., Калмыков В.М., Козлов Д.В., Стерлядкин В.В.</i> Экспериментальная проверка возможности радиолокационного определения высоты границ облачности .....	154
<i>Ильин А.Л., Шульженко А.В., Шульженко А.Д.</i> Особенности применения авиационных носителей при испытаниях космических радиолокационных средств землеобзора.....	159
<i>Моряков С.И., Нестеров С.М., Скоков П.Н., Скородумов И.А.</i> Широкополосная радиолокационная измерительная установка на базе векторного анализатора цепей.....	164
<i>Скоробогатова О.А.</i> Особенности метрологического обеспечения косвенных измерений эффективной площади рассеяния калибровочных радиолокационных отражателей уголкового типа в интересах фоноцелевого информационного обеспечения космических средств вооружения.....	169
Рефераты статей .....	179
Сведения об авторах .....	187
Сведения о рецензентах.....	196

А.П. Алёшкин,  
*доктор технических наук, профессор;*  
К.В. Бакурский,  
*кандидат технических наук;*  
В.И. Невзоров,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
О.Л. Полончик,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
С.Ю. Семин,  
*кандидат технических наук*

## **СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА С ПОМОЩЬЮ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ СТАНЦИИ С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ НА ЛЕТАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ**

Предложен способ измерения параметров ледяного покрова с помощью сигналов дециметрового диапазона на основе синтезирования апертуры на летательном аппарате. Рассчитана угловая разрешающая способность данной системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование земли, синтезирование апертуры радиолокатора, ледовая разведка.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Успехи Российской Федерации в освоении природных богатств, в том числе нефти и газа, на шельфе полярных морей Арктики, проводимая большая работа на международной арене по обоснованию права страны на принадлежность этих территорий государству делают для потенциальных инвесторов экономическую деятельность очень привлекательной и экономически выгодной. Добываемый газ в сжиженном виде доставляется потребителю с помощью специальных судов (газовозов), количество которых будет неуклонно расти. Это приведет к существенному увеличению перевозок по Северному морскому пути.

Наблюдаемое в последние годы повышение температуры окружающей среды приводит к увеличению числа айсбергов, которые течения выносят на судоходные трассы, а также в районы нефтяных и газовых платформ. Обеспечение вопросов безопасности судоходства требует создания технологий обнаружения айсбергов и их непрерывного сопровождения. Как показала практика, самыми эффективными способами обнаружения айсбергов являются авиационные и спутниковые методы. Для работы экспертных систем наиболее актуальна информация, полученная в реальном масштабе времени [4].

Для ледовой авиаразведки широко используются вертолеты и беспилотные летательные аппараты с базированием на ледоколах и нефтедобывающих платформах, которые выполняют тактическую ледовую разведку во время проводки судов ледового класса. Для этих целей на борту устанавливается электронная аппаратура наблюдения, работающая в различных диапазонах спектра, предусматривается возможность визуальных наблюдений. Радиус действия вертолетов при ледовой разведке с судов находится в пределах до 300 км [2]. Актуальным является использование летательных аппаратов, работающих на дизельном топливе.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известны различные дистанционные методы измерения параметров морского льда [2]. К ним относятся авиационные наблюдения за ледяным покровом, спутниковые методы видимого диапазона, спутниковые методы инфракрасного и микроволнового диапазона.

Эти методы делятся на визуальные и инструментальные. Для анализа характеристик ледяного покрова применяются:

- 1) положение кромки дрейфующего и неподвижного льда;
- 2) сплоченность льда;
- 3) возрастной состав;
- 4) торосистость;
- 5) высота и характер снежного покрова.

Каждая характеристика определяется в два этапа:

- выделение льдов данного вида или имеющих данную характеристику;
- отношение площадей этих льдов к другим или общей просматриваемой площади моря.

Анализ использования различных диапазонов радиоволн для целей дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) показывает существенное влияние частоты излучения на отражающую способность земных поверхностей, она уменьшается с увеличением длины волны. Аналогичную зависимость отражающая способность земной поверхности имеет и от угла скольжения.

Используемые в ДЗЗ диапазоны электромагнитных волн имеют различную проникающую способность в глубь вещества, которая обычно кратна четверти длины волны. Глубина проникновения зависит от шероховатости поверхности и комплексной диэлектрической проницаемости, которая сильно зависит от влажности.

Проникновение сигнала в подстилающую поверхность увеличивается с уменьшением частоты.

Например, сигналы с частотой 500–900 МГц могут проникать в подстилающую поверхность на глубину 1–3 м, а сигналы с частотой 80–300 МГц проникают на глубину 9–25 м.

Проникновение сигнала в снежно-ледовую поверхность зависит также от размера частиц снега. Например, для частиц снега радиусом 2 мм в  $X$ -диапазоне проникновение сигнала составляет единицы метров, а в  $K_u$ -диапазоне – десятые доли метра. Для частиц радиусом 0,5 мм в  $X$ -диапазоне сигнал будет проникать на глубину около 100 м, а в  $K_u$ -диапазоне – на глубину около 10 м [1].

Существует методика определения толщины льда в сверхвысокочастотном диапазоне [2], основанная на измерении яркостной температуры. Согласно методике, максимальная толщина льда зависит от частотного диапазона и чувствительности радиометра. Максимально обнаруживаемая толщина льда достигает 213 см для сигналов с длиной волны 21 см.

Оценим глубину проникновения электромагнитных волн ( $\delta$ ) в лед, на которой амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз:

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi} \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{\varepsilon''},$$

где  $\lambda$  – длина волны;

$\varepsilon', \varepsilon''$  – диэлектрические постоянные воздушной среды и льда соответственно.

Диэлектрическая постоянная льда зависит от его температуры, солености и плотности. Для разных типов льдов и длинны волны, глубина проникновения электромагнитных волн меняется от дециметров до десятков метров [2].

Построим зависимость глубины проникновения электромагнитных волн от длины волны, при значении диэлектрической постоянной льда и воздуха 3 и 1 соответственно (рис. 1). При значениях длины волны 80–140 см глубина проникновения электромагнитного излучения составит от 7,4 до 12,5 м.

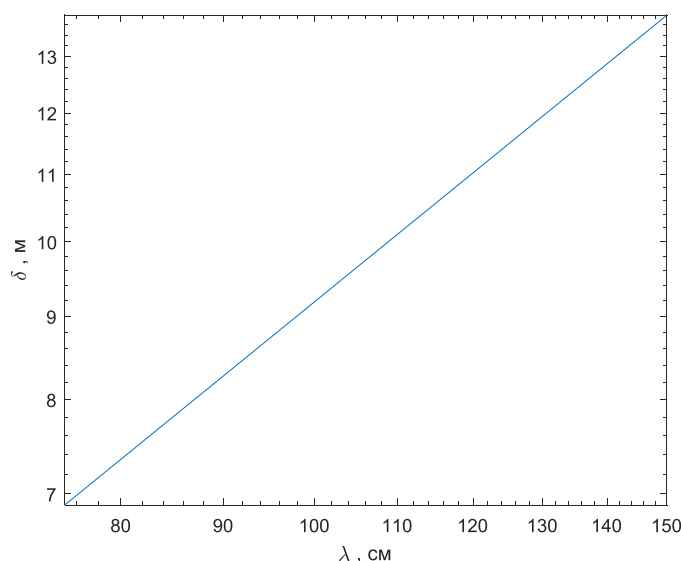


Рис. 1. Зависимость глубины проникновения от длины волны

Характеристики ледяного покрова можно вычислить по косвенным признакам [2], применяя методы математической обработки изображений радиолокационной синтезированной апертуры (РСА). Так, например, определяется сплошность ледяного покрова, толщина льда. Направлением, с помощью которого можно получить прямые измерения параметров ледяных покрытий, является использование РСА в диапазоне Р и ниже (70 см и больше). Однако в настоящее время он разработан недостаточно. Это связано с тем, что создание апертуры предполагает использование антенн больших геометрических размеров. Для авиационных систем (например, вертолета) это вызовет возникновение дополнительной аэродинамической нагрузки на элементы конструкции антенны, которая может существенно повлиять на основные ГТХ в сторону их ухудшения.

Один из вариантов решения этой проблемы – в качестве элемента антенны использовать несущий винт вертолета. Вращение антенны, находящейся в лопасти вертолета, позволит реализовать за каждый оборот несущего винта вертолета новую апертуру значительно большего размера. Использование такой методики позволяет создать круговую антенную решетку для радиолокационной станции (РЛС) бокового обзора за один оборот несущего винта. Совокупность образованных круговых апертур за несколько периодов вращения несущего винта вертолета позволяет реализовать РЛС с синтезированием апертуры.

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЕТ УГЛОВОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

Рассчитаем угловую разрешающую способность данной системы.

Компьютерное моделирование процессов приема и обработки сигналов выполнено при следующих исходных данных: вертолет находится на высоте  $H_c = 4000$  м; движется со скоростью  $V_c = 30,0$  м/с; угловая скорость лопасти винта  $\Omega = 5$  об/с, угол азимута первой цели  $\varphi_{c1} = 45^\circ$ , угол азимута второй цели  $\varphi_{c2} = 49^\circ$ , угол настройки фильтра  $\varphi_\Phi = 0$  рад, угол  $\Theta_\Phi = 40^\circ$ , длина волны  $\lambda = 0,7$  м, длина лопасти вертолета  $l = 19$  м. При дальнейших расчетах угол азимута второй цели будет составлять  $\varphi_{c2} = 47$  и  $45,5^\circ$ .

Временные диаграммы сигналов на выходе системы обработки, рассчитаны в соответствии с выражением [3].

$$r_{12} = \sqrt{(Vt + L \cos \Omega t - r_0 \sin \beta \cos \alpha)^2 + (L \sin \Omega t - r_0 \sin \beta \cos \alpha)^2 + (r_0 \cos \beta)^2},$$

где  $V$  – текущая скорость вдоль линии, параллельной оси  $X$ ;

$\Omega$  – угловая скорость вращения корпуса ИСЗ;

$L$  – диаметр круговой антенной решетки соответственно.

Результаты, полученные путем компьютерного моделирования с использованием алгоритмического языка программирования Matlab, представлены на рис. 2–7.

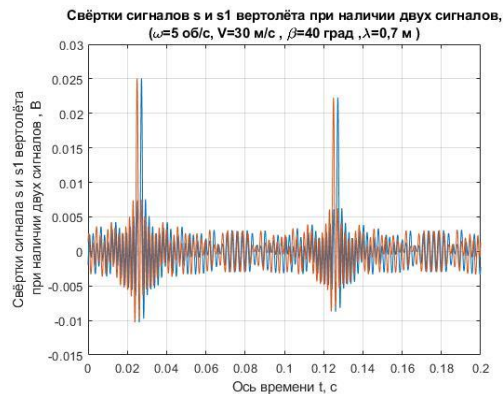


Рис. 2. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от углов азимута  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 49^\circ$

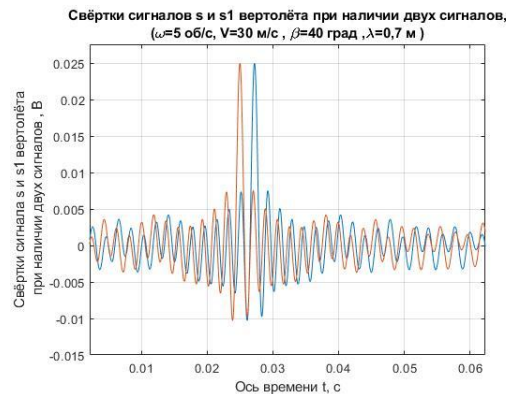


Рис. 3. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от углов азимута  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 49^\circ$

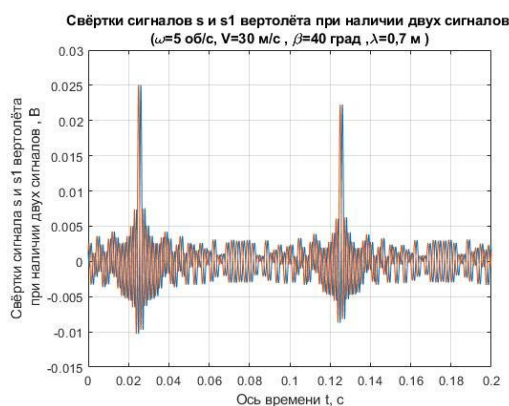


Рис. 4. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от углов азимута  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 47^\circ$

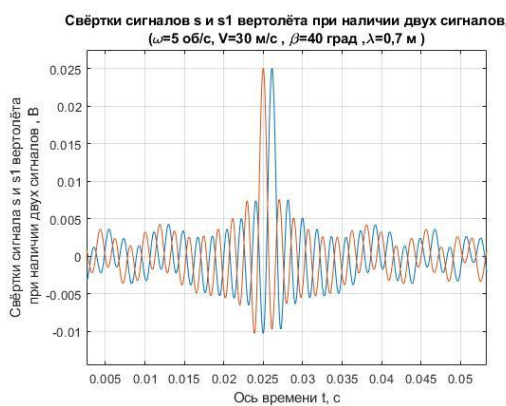


Рис. 5. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от углов азимута  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 47^\circ$

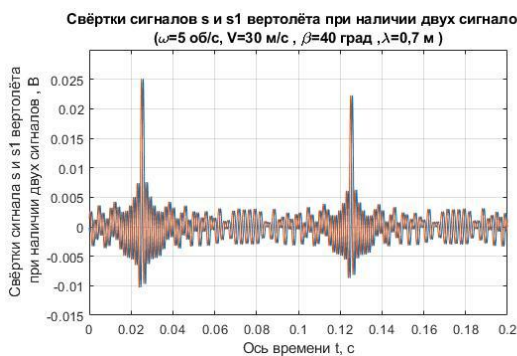


Рис. 6. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от углов азимута  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 45,5^\circ$

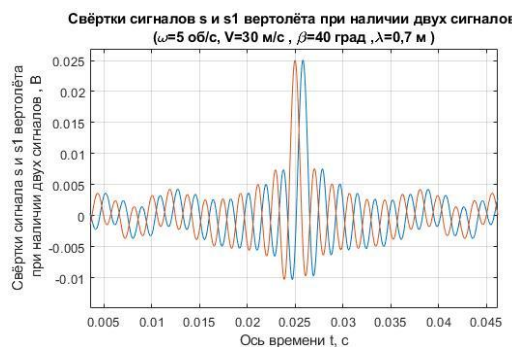


Рис. 7. Зависимость сигнала на выходе системы обработки от углов азимута  $\varphi_1 = 45^\circ$ ,  $\varphi_2 = 45,5^\circ$

Исследования зависимости уровня сигналов от углового положения цели  $\varphi_c$ ,  $\Theta_c$ , высоты полета  $H_c$ , скорости движения  $V_c$  при фиксированной скорости вращения лопасти винта  $\Omega$  и заданных параметрах опорного сигнала  $\varphi_\phi$ ,  $\Theta_\phi$ ,  $H_\phi$ ,  $V_\phi$  (параметрах согласованного фильтра) дали следующий результат – разрешающая угловая способность системы составляет  $30''$ .

Полученные ранее итоги моделирования [3] показывают, что разрешающая способность в плоскости азимута на расстоянии 5 км меньше 120 м. Это соответствует полученным выше результатам. Таким образом, функциональные возможности системы дистанционного зондирования на базе данного радиолокатора будут соответствовать требованиям к системе по наблюдению льдов и навигации у побережья [3].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов моделирования могут быть сделаны следующие выводы:

1. Разрешающая угловая способность системы составляет 30" или 105 м;
2. В соответствии с требованиями [2] разрешающая способность систем наблюдения ледовой обстановки и обеспечения навигации морских судов у побережья должна составлять 120-150 м. Функциональные возможности системы дистанционного зондирования на базе радиолокатора дециметрового диапазона соответствуют этим требованиям.

Результаты моделирования подтверждают перспективность дальнейших исследований в рассматриваемом направлении и могут быть использованы при разработке радиолокационных систем с синтезированием апертуры антенны.

Вопросы влияния траекторных нестабильностей, изменения скорости и ориентации вращения лопастей винта на разрешающую способность будут рассматриваться в дальнейших исследованиях.

## Список используемых источников

1. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии: монография / пер. с нем. В. А. Буша; под ред. В. Г. Трифонова. – М.: Мир, 1988. – 343 с.
2. *Спутниковые методы определения характеристик ледового покрова морей: практическое пособие / В.Г. Смирнов, А.В. Бушуев, И.А. Бычкова и др.; под ред. В.Г. Смирнова.* – СПб.: Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, 2011. – 240 с.
3. Особенности построения бортового вертолетного радиолокатора ледовой разведки на основе кругового обзора земной поверхности с синтезированием апертуры вращающейся антенны / А.П. Алёшкин, В.В. Владимиров, О.Л. Полончик и др. // Вопросы радиоэлектроники. – 2019. – № 2. – С. 71–77.
4. Радиолокационные системы дистанционного зондирования земли на базе спутников со стабилизацией вращением / О.Л. Полончик, А.Б. Артюшкин, Е.О. Полончик и др. // Вестник Российского нового университета. – 2017. – Вып. 1. – С. 35–41.

Г.И. Афонин,  
кандидат технических наук;  
А.С. Кошкаров,  
кандидат технических наук, доцент;  
Г.Н. Мальцев,  
доктор технических наук, профессор

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОЦЕНОК УГЛА ИЗОПЛАНАТИЗМА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ НАЗЕМНЫМИ ОПТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ КОСМИЧЕСКИХ И АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ МОДЕЛЕЙ АТМОСФЕРЫ**

Проведен сравнительный анализ оценок угла изопланатизма при наблюдении наземными оптическими системами космических и астрономических объектов для различных моделей атмосферы. Представлены результаты расчетов угла изопланатизма, которые сравниваются со значениями угла изопланатизма в соответствии с эмпирическими моделями и стандартными моделями атмосферы. Анализируется выполнение условия изопланатизма при реализации адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений с адаптацией по «лазерной звезде». Показано, что в условиях хорошего астроклимата в наземных оптических системах с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений возможны адаптация по «лазерной звезде» и получение изображений космических и астрономических объектов с высоким разрешением, превышающим атмосферный предел разрешающей способности.

Ключевые слова: оптическая система, наблюдение космических и астрономических объектов, адаптивная фазовая коррекция, «лазерная звезда», угол изопланатизма.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Целью настоящей работы является анализ условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений, которая позволяет преодолеть атмосферный предел разрешающей способности и приблизиться к инструментальному разрешению наземных оптических систем в реальных условиях их применения [1–4].

В качестве одной из наиболее перспективных технологий адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений в наземных оптических системах в настоящее время рассматривается адаптация по искусственной «лазерной звезде» (*LGSAO – Laser Guide Star Adaptive Optics*) [5–7]. «Лазерная звезда» формируется при распространении лазерного излучения в атмосфере по вертикальным и наклонным трассам снизу вверх. На определенных длинах волн в некоторых слоях атмосферы происходит интенсивное рассеяние и переизлучение лазерного излучения. Это имеет место, например, при резонансном рассеянии лазерного излучения на длине волны 0,589 мкм в слое паров натрия на высоте 90–100 км в ионосфере. Переизлученное излучение может приниматься наземной оптической системой как излучение опорного источника для измерения и коррекции атмосферных фазовых искажений методом фазового сопряжения.

Принципиальное значение для реализации адаптивной коррекции атмосферных фазовых искажений имеет выполнение условия изопланатизма. В соответствии с этим условием «лазерная звезда» и наблюдаемый объект должны располагаться на угловом расстоянии, не превышающем угла изопланатизма, в пределах которого фазовые искажения, измеренные по «лазерной звезде», соответствуют фазовым искажениям при формировании изображения объекта. Таким образом, угол изопланатизма является одним из ключевых условий для осуществления возможности наблюдения космических и астрономических объектов наземными оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений. Его ве-

личина зависит от характеристик атмосферы на трассе распространения оптического излучения и определяется экспериментально или аналитически с использованием различных моделей атмосферы. В настоящей статье проведен сравнительный анализ оценок угла изопланатизма для различных моделей атмосферы и сделаны выводы о выполнении условия изопланатизма при наблюдении космических и астрономических объектов наземными высококоразрешающими оптическими системами.

## РАСЧЕТ УГЛОВ ИЗОПЛАНАТИЗМА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОСМИЧЕСКИХ И АСТРОНОМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Реализация технологии *LGSAO* на ряде крупных наземных телескопов позволила получить изображения астрономических объектов с угловым разрешением, близким к инструментальному [7–10]. Вместе с тем, несмотря на имеющиеся теоретическое обоснование и экспериментальные данные, в настоящее время отсутствует единое мнение о значениях угла изопланатизма при наблюдении космических и астрономических объектов наземными оптическими системами. Полученные экспериментальные и аналитические оценки угла изопланатизма для различных моделей атмосферы в ряде случаев отличаются друг от друга [7–9]. Одной из причин этого является то, что условия адаптации по «лазерной звезде» при наблюдении астрономических и космических объектов могут существенно отличаться. Астрономические наблюдения не связаны с высокой динамикой наблюдаемых объектов, а наблюдение за космическими объектами, находящимися на околоземных орбитах, происходит в процессе их углового сопровождения в зоне видимости наземной оптической системы.

Общепринятой характеристикой атмосферных фазовых искажений является радиус когерентности (радиус Фрида)  $r_0$ , связанный со структурной характеристикой флуктуаций показателя преломления атмосферы на трассе распространения оптического излучения. Величина радиуса когерентности (в метрах) аналитически определяется в соответствии с выражением [11]

$$r_0 = 0,185 \left[ \lambda^{-2} \int_{(R)} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}, \quad (1)$$

где  $C_n^2(z)$  – структурная характеристика флуктуаций показателя преломления атмосферы на трассе распространения,

$\lambda$  – длина волны оптического излучения, на которой происходят измерение и компенсация атмосферных фазовых искажений.

Интегрирование структурной характеристики  $C_n^2(z)$  в выражении (1) осуществляется по трассе распространения оптического излучения  $L$ , при наблюдении космических и астрономических объектов наземной оптической системой – по линии визирования на наблюдаемый объект.

Зависимость радиуса когерентности  $r_0$  от зенитного угла линии визирования на наблюдаемый объект  $\beta$  определяется выражением

$$r_0(\beta) = 0,185 \left[ \lambda^{-2} \sec \beta \int_{(R)} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}, \quad (2)$$

где  $C_n^2(h)$  – высотный профиль структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы.

Интегрирование в выражении (2) осуществляется по высоте  $H$ . Здесь и далее для определения характера изменения условий наблюдения космических и астрономических объектов наземной оптической системой используется плоская модель атмосферы, не учитывающая



сферичность Земли. Если обозначить радиус когерентности для вертикальной трассы (при  $\beta=0$ ) при зенитном положении наблюдаемого объекта, то зависимость радиуса когерентности от зенитного угла имеет следующий вид:

$$r_0(\beta) = r_0(0) \cdot \cos^{3/5}\beta. \quad (3)$$

Величиной  $r_0$  определяется атмосферный предел разрешающей способности наземных оптических систем. Если диаметр телескопа наземной оптической системы  $D$  превышает величину радиуса когерентности  $r_0$ , то для преодоления атмосферного предела разрешающей способности и приближения к инструментальному разрешению наземной оптической системы в ней необходима адаптивная фазовая коррекция атмосферных искажений. В реальных условиях применения наземных оптических систем величина радиуса когерентности в большинстве случаев составляет единицы – десятки сантиметров, причем для малых зенитных углов. Поэтому для средних и крупных оптических телескопов диаметром десятки сантиметров – единицы метров имеет место соотношение  $D > r_0$ , и для приближения к их инструментальной разрешающей способности необходима адаптивная фазовая коррекция атмосферных искажений.

В соответствии с условием изопланатизма «лазерная звезда» и наблюдаемый объект должны располагаться на угловом расстоянии, не превышающем угла изопланатизма  $\theta_0$ , в пределах которого фазовые искажения, измеренные по «лазерной звезде», соответствуют фазовым искажениям при формировании изображения наблюдаемого объекта. При получении изображений наблюдаемого объекта это условие относится к любой точке объекта в пределах его углового размера  $\Delta\theta$ . Величина угла изопланатизма (в радианах) аналитически определяется в соответствии с выражением [11]

$$\theta_0 = 5,81 \cdot 10^{-2} \left[ \lambda^{-2} \int_{(L)} z^{5/3} C_n^2(z) dz \right]^{-3/5}. \quad (4)$$

В соответствии с выражением (4) величина угла изопланатизма  $\theta_0$ , как и величина радиуса когерентности  $r_0$ , определяемая выражением (1), зависит от структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы на трассе распространения  $C_n^2(z)$  и длины волны оптического излучения  $\lambda$ . С увеличением степени атмосферных искажений величина  $\theta_0$ , как и величина  $r_0$ , уменьшается, но характер этой зависимости отличается. Это обусловлено тем, что интегрирование структурной характеристики  $C_n^2(z)$  по трассе распространения оптического излучения  $L$  в выражении (3) является взвешенным и величина  $\theta_0$  оказывается более критична к виду зависимости  $C_n^2(z)$ , задаваемой используемой моделью атмосферы.

Зависимость угла изопланатизма  $\theta_0$  от зенитного угла линии визирования на наблюдаемый объект  $\beta$  определяется выражением:

$$\theta_0(\beta) = 5,81 \cdot 10^{-2} \left[ \lambda^{-2} \sec^{8/3} \beta \int_{(H)} h^{5/3} C_n^2(h) dh \right]^{-3/5}. \quad (5)$$

В соответствии с выражениями (2) и (5) зависимости  $\theta_0(\beta)$  и  $r_0(\beta)$  определяются высотным профилем структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы  $C_n^2(h)$ , который интегрируется по высоте  $H$ . При этом интегрирование структурной характеристики  $C_n^2(h)$  по высоте  $H$  как и по трассе распространения  $L$  в выражении (4), является взвешенным и сохраняется критичность величины  $\theta_0$  к виду зависимости  $C_n^2(h)$ , которая и задается используемой моделью атмосферы. Если обозначить угол изопланатизма для вертикальной трассы (при  $\beta=0$ ) при зенитном положении наблюдаемого объекта  $\theta_0(0)$ , то зависимость угла изопланатизма от зенитного угла имеет следующий вид:

$$q_0(\beta) = q_0(0) \cdot \cos^{8/5}\beta. \quad (6)$$

При анализе условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными оптическими системами используются различные модели атмосферы и эмпирические соотношения между углом изопланатизма  $\theta_0$  и радиусом когерентности атмосферных искажений  $r_0$ , например,  $\theta_0=3,978 \cdot 10^{-5} r_0$  или  $\theta_0=r_0/(3h_0)$ , где  $h_0$  – высота турбулентного слоя. При  $h_0=10$  км оба приближенных соотношения дают близкие значения  $\theta_0$ , различающиеся на 16%. На рис. 1 представлены расчетные зависимости отношения  $\theta_0(\beta)/\theta_0(0)$ , полученные в соответствии с выражением (6) для  $\theta_0(\beta)$  (кривая 1) и в соответствии с выражением (3) для  $r_0(\beta)$  с учетом эмпирического соотношения между  $r_0$  и  $\theta_{из}$  (кривая 2). Из графика видно, что для наклонных трасс эмпирические соотношения дают более оптимистические значения углов изопланатизма.

В табл. 1 приведены значения  $r_0$  и  $\theta_0$ , соответствующие трем стандартным моделям атмосферы – *SLC*, *HV*, *MHV* [12]. Модель *SLC* является стандартной моделью атмосферы для континентальных районов и дневного времени суток. Модели *HV* и *MHV* являются модификациями модели атмосферы Хафнагеля для различных типов астроклимата. Модель *HV* соответствует среднему астроклимату, модель *MHV* соответствует хорошему астроклимату. Можно полагать, что при выборе пунктов расположения наземных высокоразрешающих оптических систем, предназначенных для наблюдения астрономических и космических объектов, в районах с хорошим астроклиматом [13–15], условиям наблюдения будет соответствовать модель *MHV*. Все три модели соответствуют зависимости  $\theta_0(\beta)$  вида (6). В соответствии с приведенными данными в пунктах с хорошим астроклиматом в ночное время суток в диапазоне изменения зенитных углов  $-45^\circ < \beta < 45^\circ$  можно ожидать значений угла изопланатизма до нескольких десятков микроградан. Такой же порядок величины угла изопланатизма  $\theta_0 \approx 5'' = 25$  мкрад приводится в работе [16].

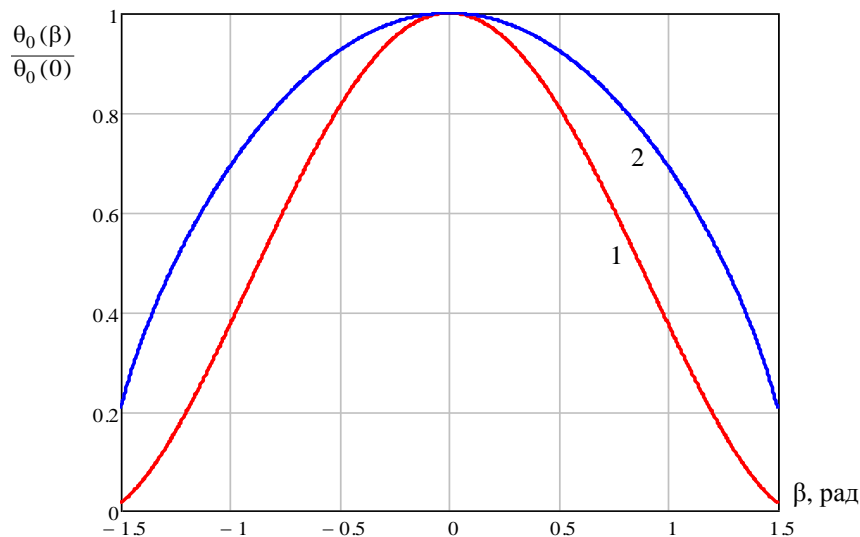


Рис. 1. Расчетные зависимости угла изопланатизма от зенитного угла, нормированного к величине угла изопланатизма для вертикальной трассы

Таблица 1

**Радиус когерентности и угол изопланатизма атмосферных искажений для различных моделей атмосферы**

Модель атмосферы	$r_0$ , см		$\theta_0$ , мкрад	
	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$	$\beta=0^\circ$	$\beta=45^\circ$
<i>SLC</i>	5,7	4,6	13,8	8,0
<i>HV</i>	5,6	4,5	7,8	4,5
<i>MHV</i>	20,0	16,2	20,0	11,2

Полученные зависимости  $\theta_0(\beta)$  позволяют анализировать возможности наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений и адаптацией по «лазерной звезде». Например, при сопровождении космического объекта с линейным размером 5 м на орбите высотой 250 км и с линейным размером 10 м на орбите высотой 500 км, размер изображения при углах наблюдения  $\beta=0$  и  $\beta=45^\circ$  составляет соответственно  $\Delta\theta=20$  мкрад и  $\Delta\theta=14$  мкрад. Таким образом, при наблюдении космических объектов с линейными размерами до 5–10 м на высотах более 250–500 км условие изопланатизма  $\Delta\theta < \theta_0$  выполняется, и могут быть получены их изображения с разрешением, превышающим атмосферный предел. При наблюдении астрономических объектов величина  $\Delta\theta$  соответствует угловому полю, в пределах которого возможно получение изображений звездного неба с разрешением, превышающим атмосферный предел. Дополнительным условием реализации технологии *LGSAO* при наблюдении космических объектов является необходимость формирования «лазерной звезды» с некоторым упреждением, поскольку при угловом сопровождении космического объекта она должна двигаться с такой же угловой скоростью. Однако расчеты показывают, что при  $\theta_0=25$  мкрад и адаптации по натриевым «лазерным звездам» требуемый угол упреждения оказывается значительно меньше угла изопланатизма для всех представляющих интерес высот орбит наблюдаемых космических объектов.

Таким образом, в условиях хорошего астроклимата в наземных оптических системах с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений возможны реализация адаптации по «лазерной звезде» и получение изображений космических и астрономических объектов с высоким разрешением. При этом выполнение условия изопланатизма определяет возможность адаптивной фазовой коррекции атмосферных искажений, а достижимое угловое разрешение определяется параметрами адаптивной системы [1, 2]. Следует отметить, что в случае невыполнения условия изопланатизма для одной «лазерной звезды» принципиально возможна реализация адаптации по нескольким формируемым в угловом поле  $\Delta\theta$  «лазерным звездам» [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Угол изопланатизма является одной из важнейших характеристик условий наблюдения космических и астрономических объектов наземными высокоразрешающими оптическими системами с адаптивной фазовой коррекцией атмосферных искажений на основе технологии *LGSAO*.

2. Аналитические модели атмосферы и экспериментальные данные дают значения угла изопланатизма, лежащие в достаточно широких пределах как для вертикальных трасс при зенитном положении наблюдаемого объекта, так и для наклонных трасс в зависимости от зенитного угла линии визирования. При этом для наклонных трасс эмпирические соотношения дают завышенные значения углов изопланатизма по сравнению с аналитическими моделями, на основе использования высотного профиля структурной характеристики флуктуаций показателя преломления атмосферы.

3. Для условий хорошего астроклимата имеет место хорошая сходимость результатов расчета угла изопланатизма с использованием аналитических моделей и представленных в стандартных моделях атмосферы. В соответствии с приведенными данными для пунктов с хорошим астроклиматом в ночное время суток в диапазоне изменения зенитных углов  $45^\circ < \beta < 45^\circ$  угла изопланатизма может достигать значений до нескольких десятков микроардиан.

4. В условиях хорошего астроклимата при типичном значении угла изопланатизма для этих условий  $\theta_0=25$  мкрад в наземных оптических системах с адаптивной фазовой коррекци-

ей атмосферных искажений возможно использование технологии *LGSAO* для получение изображений космических и астрономических объектов с высоким разрешением, превышающим атмосферный предел разрешающей способности.

### Список используемых источников

1. *Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И.* Принципы адаптивной оптики. – М.: Радио и связь, 1985. – 336 с.
2. *Лукиянов Д.П., Корниенко А.А., Рудницкий Б.Е.* Оптические адаптивные системы. – М.: Радио и связь, 1989. – 240 с.
3. *Свиридов К.Н.* Атмосферная оптика высокого разрешения. – М.: Знание, 2007. – Т. 1: Квазиоптимальные технологии достижения высокого углового разрешения оптических систем атмосферного видения. – 200 с.
4. *Ермолаева Е.В., Зверев В.А., Филатов А.А.* Адаптивная оптика. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 297 с.
5. *Большасова Л.А., Лукин В.П.* Адаптивная коррекция атмосферных искажений оптических изображений на основе искусственного опорного источника. – М.: Физматлит, 2012. – 125 с.
6. *Малашко Я.И., Наумов М.Б.* Системы формирования мощных лазерных пучков. – М.: Радиотехника, 2013. – 328 с.
7. *Лукин В.П.* Формирование оптических пучков и изображений на основе применения систем адаптивной оптики // *Успехи физических наук.* – 2014. – Т. 184, № 6. – С. 599–640.
8. *Welsh B.M., Gardner C.S., Thompson L.A.* Design and Performance Analysis of Adaptive-Optical Systems using Laser Guide Stars // *IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing.* – 1990. – Vol. 78. – P. 1721–1743.
9. *Fugate R.Q., Ellerbroek B.L., Higgins C.H.* Two generations of laser-guide-star adaptive-optics experiments at the Starfire Optical Range // *Journal Optical Society of America A.* – 1994. – Vol. 11. – P. 310–324.
10. *Leverington D.* Observatories and Telescopes of Modern Times. – Cambridge University Press, 2017. – P. 501.
11. *Лукин В.П.* Атмосферная адаптивная оптика. – Новосибирск: Наука, 1986. – 248 с.
12. *Parenti R.R., Sasiela R.J.* Laser-guide-star systems for astronomical applications // *Journal Optical Society of America A.* – 1994. – Vol. 11. – P. 288–309.
13. *Дятлов В.* Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // *Зарубежное военное обозрение.* – 2006. – № 1. – С. 50–55.
14. *Дятлов В.* Основные направления развития наземных оптоэлектронных средств контроля космического пространства США // *Зарубежное военное обозрение.* – 2006. – № 2. – С. 30–35.
15. Получение изображений космических аппаратов телескопом Алтайского оптико-лазерного центра с использованием адаптивной оптики / В.Д. Шаргородский, А.А. Галкин, Е.А. Гришин и др. // *Космические исследования.* – 2008. – Т. 46, № 3. – С. 201–205.
16. *Welsh B.M., Gardner C.S.* Effects of turbulence induced anisoplanatism on image performance of adaptive astronomical telescopes using LGS // *Journal Optical Society of America A.* – 1990. – Vol. 7. – P. 1237–1242.

О.И. Ахметов\*,  
кандидат физико-математических наук;  
В.Б. Белаховский\*\*,  
И.В. Мингалёв\*\*,  
доктор физико-математических наук;  
О.В. Мингалёв\*\*,  
кандидат физико-математических наук;  
З.В. Суворова\*\*;  
С.М. Черняков\*\*

\* Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург;

\*\* Полярный геофизический институт, г. Апатиты

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЛНЫ ИНФРАНИЗКОГО ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА В УСЛОВИЯХ ВЫСЫПАНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЕ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

Представлены результаты численных экспериментов прохождения электромагнитных сигналов в волноводе Земля – ионосфера при различных состояниях ионосферы в области высоких широт. Профили концентрации, используемые в численных экспериментах, базируются на данных радара частичных отражений Полярного геофизического института, расположенной на радиофизическом полигоне «Туманный» Мурманской области (69,0° с.ш., 35,7° в.д.) и модели IRI2016 ввремя магнитной бури 17 марта 2013 года.

Обсуждается влияние горизонтальной пространственной структуры концентрации электронов на высотах отражения на распространение волны инфранизкой частоты.

Ключевые слова: распространение волн инфранизкой частоты, численное моделирование, ионосфера.

### ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения ионосферных эффектов солнечных вспышек имеют огромное значение для всех видов деятельности, связанной с распространением радиоволн в атмосфере Земли. Состоянием ионосферы определяются возможности связи в ИНЧ-диапазоне в большей мере, чем иными факторами. Исследования влияния ионосферы методами прямых измерений проводятся десятки лет в большинстве стран мира, в том числе и в области высоких широт. Очевидные выводы об особенностях ионосферного влияния на распространение радиоволн были уже сделаны авторами, первыми взявшимися за эту задачу, дальнейшее же продвижение требует применения нетривиальных методов как для регистрации, так и для обработки и интерпретации результатов. Все это относится к области  $D$ , одной из наиболее сложных и менее всего изученных частей ионосферы. Одним из таких нетривиальных методов изучения эффектов влияния  $D$ -области ионосферы на распространение радиоволн является численное моделирование. Данный метод позволяет получать чистые от постороннего шума эффекты, распределенные во всем интересующем исследователя пространстве, в отличие от локализованных прямых измерений каких-либо величин. Выявление характера и величины изменений основных характеристик волн различного диапазона связанных с конкретной пространственной структурой электронной плотности ионосферы имеет большое значение для решения обратной задачи определения состояния ионосферы по данным наземных измерений компонент электромагнитного поля сетью регистраторов.

Магнитная буря 17 марта 2013 года была вызвана солнечной вспышкой  $M$ -класса 15 марта и началась с походом к магнитосфере межпланетной ударной волны, которое проявилось на земной поверхности в виде импульса  $SSC$  (*storm sudden commencement*) в 06 UT. В этот момент скорость солнечного ветра резко увеличилась с  $\sim 400$  км/с до  $\sim 650$ – $700$  км/с.  $B_z$ -компонента межпланетного магнитного поля стала отрицательной, что обеспечило посто-

янное поступление энергии в магнитосферу. Индекс *SYM-H*, характеризующий интенсивность магнитной бури, упал до  $-100$  нТл и оставался на этом уровне. Авроральный *AE* индекс резко возрос до  $\sim 1000$  нТл и оставался повышенным. *AE*-индекс показывает в 16 UT появление другой авроральной активизации (увеличение *AE* до  $\sim 2500$  нТл).

В работе представлены результаты численных экспериментов прохождения электромагнитных сигналов в волноводе Земля – ионосфера при изменениях состояния ионосферы вызванных солнечной вспышкой и последовавшей за ней магнитной бурей в области высоких широт. Профили концентрации, используемые в численных экспериментах, получены при помощи доработки профилей, сгенерированных моделью IRI2016. Доработка профилей базируется на данных средневолнового радиолокатора вертикального излучения для исследования нижней ионосферы. Радиолокатор расположен на радиофизическом полигоне «Туманный» Полярного геофизического института в Мурманской области ( $69,0^\circ$  с.ш.,  $35,7^\circ$  в.д.). Данные были получены во время и после солнечной вспышки *M*-класса 15.03.2013 [1], а именно: 15.03.2013 в 09:00 UT (возмущенные условия, вспышка), 16.03.2013 в 9:00 UT (спокойные условия), 17.03.2013 в 6:00 UT (возмущенные условия, SSC) и 16.03.2013 в 6:00 UT (спокойные условия). Доработанные высотные профили концентрации электронов представлены на рис. 1.

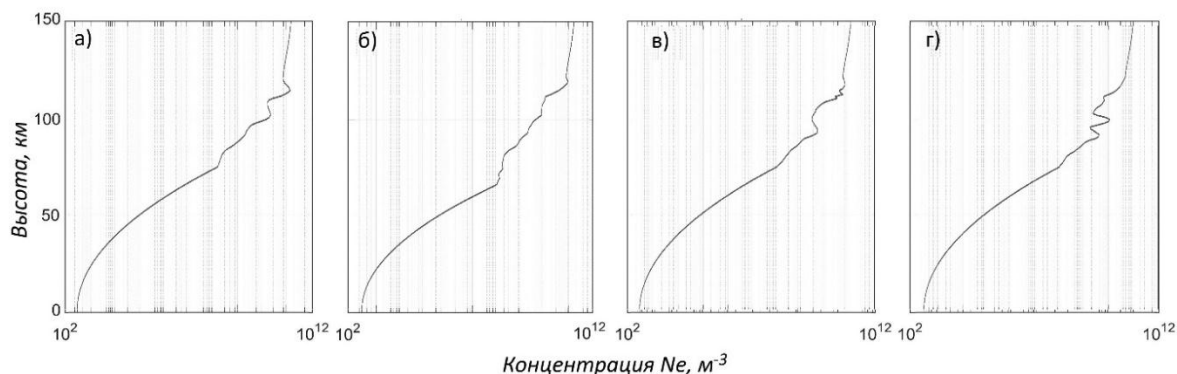


Рис. 1. Аппроксимированные высотные профили концентрации электронов:  
 а – 15.03.2013 в 09:00 (UT); б – 16.03.2013 в 9:00 (UT);  
 в – 17.03.2013 в 6:00 (UT); г – 16.03.2013 в 6:00 (UT)

## МОДЕЛЬ, ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, ИСТОЧНИК

Используемая в представленной работе модель распространения электромагнитных сигналов в различных средах построена на основе схемы с противопотоковой аппроксимацией пространственных производных (метод Годунова с коррекцией потоков). Также используется расщепление по пространственным направлениям и по физическим процессам, причем затухание поля сигнала за счет проводимости и его вращение при наличии холловской проводимости среды учитываются на отдельных шагах расщепления по аналитическим формулам. Схема является монотонной, имеет второй порядок точности по времени и третий по пространственным переменным, а также является консервативной [2, 3].

Во всех поставленных в работе численных эксперимента область моделирования представляла собой параллелепипед с основанием  $512 \times 1280$  км, высотой в атмосфере 150 км и глубиной в литосфере 50 км. Шаги сетки по горизонтали составляли 2 км, по вертикали в атмосфере – 2 км и 0,5 км – в литосфере. Шаг по времени составлял  $4 \times 10^{-6}$  с.

В модельных экспериментах на всех внешних границах действовало граничное условие свободного ухода волны, что достигалось обнулением исходящего за пределы области потока. Применяемая авторами схема в таких условиях имеет достаточно низкие коэффициенты отражения плоской волны от границ области моделирования: для волн, падающих под углом от  $80$  до  $90^\circ$ , отношение амплитуды отраженной волны к амплитуде падающей плоской вол-

ны не превышает 0,01. При угле падения  $60^\circ$  это отношение уже составляет примерно 0,05, при угле падения  $45^\circ$  – примерно 0,16, при угле падения  $27^\circ$  – примерно 0,33, а при угле падения  $18,4^\circ$  – примерно 0,43 [2]. Метод *FDTD* (*finite-differences time-domain method*) [4] при применении простых граничных условий, таких как условия Мура (Mur) [5] и Лиао (Liao) [6], дает отражения порядка 0,1–1 %, но только при падении волны на границу под прямым углом. При падении под острым углом коэффициент отражения растет вплоть до 100 % при падении по касательной. Однако, при использовании непрерывно действующего источника даже столь малых отражений, которые порождает применяемая схема, достаточно для накопления ошибок в области моделирования, и возникает необходимость в использовании методов подавления, подобных *PML* (*perfectly matched layer*), использующихся в *FDTD*-моделях [7]. Именно такой тип источника применялся в представленных авторами экспериментах, что привело к необходимости адаптации и применения метода *PML*. Разделение схемы по пространственным переменным и физическим процессам позволяет применять профиль электрических и магнитных потерь, предложенный Беренгером, непосредственно к потокам противоположной схемы на границе области моделирования. Геометрический профиль потерь внутри отдельного слоя имеет вид

$$\rho(r) = -\frac{\varepsilon_0 c_0}{2\Delta x} \frac{\ln(g)}{g^N - 1} \ln(R_0) g^{\left(\frac{r}{\Delta x}\right)}, \quad (1)$$

где  $g$  – коэффициент геометрической прогрессии;

$\Delta x$  – шаг по пространству;

$c_0$  – скорость света;

$N$  – номер *PML*-слоя, считая от интерфейса счетного региона и границы;

$R$  – расстояние от границы;

$R_0$  – коэффициент отражения от первого слоя.

В представленных численных экспериментах авторы используют профиль потерь, рассчитанный по (1) со следующими параметрами:  $R_0=0,01$  (1 %), коэффициент прогрессии  $g = 2,15$ , количество слоев 14. Несмотря на то, что коэффициент отражения от первого слоя не лучше, чем характерный для данной схемы при обнулении исходящих потоков на углах падения  $80$ – $90^\circ$ , а на практике даже хуже вследствие отражений от последующих слоев, основным преимуществом метода *PML* является его крайне слабая зависимость от угла прихода электромагнитной волны. Данную особенность демонстрирует и адаптированный для противоположной схемы вариант.

В качестве источника сигнала во всех представленных экспериментах используется двухслойная плоскость на одной из граней расчетной области. Такое задание источника сигнала позволяет задать не только амплитуду сигнала во времени, но и ее распределение в пространстве, задержками можно сформировать фронт волны необходимой формы подобно тому как это делается в фазированной антенной решетке. В экспериментах, обсуждаемых в данной работе моделировалась плоская волна частотой 1500 Гц ( $\sim 200$  км), излучаемая в область под прямым углом к плоскости источника. Профиль проводимости литосферы был взят из работы [8], проводимость у поверхности составляла  $2 \times 10^{-5}$  См.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И АНАЛИЗ

В работе представлены результаты двенадцати численных экспериментов: эксперимент **1** – вся область имеет концентрацию электронов, однородную по горизонтали, а по высоте – как на профиле в рис. 1, *г* (невозмущенные условия); эксперимент **2** – вся область имеет концентрацию электронов, однородную по горизонтали, а по высоте – как на профиле в рис. 1, *в* (магнитная буря, высыпание заряженных частиц); эксперименты **3–6** – область моделирования имеет неоднородную концентрацию электронов по горизонтали в направлении распростране-

ния сигнала, высотный профиль плавно изменяется со случая как в эксперименте **1** к случаю, описанному для эксперимента **2**. При этом градиенты концентрации электронов в области перехода имеют следующие максимальные значения:  $38,38 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **3**,  $15,62 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **4**,  $11,07 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **5** и  $7,83 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **6**. В экспериментах **7–10** область моделирования имеет неоднородную концентрацию электронов по горизонтали в направлении распространения сигнала, высотный профиль плавно изменяется со случая как в эксперименте **2** к случаю, описанному для эксперимента **1**. При этом градиенты концентрации электронов в области перехода имеют следующие максимальные значения без учета знака:  $58,06 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **7**,  $15,62 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **8**,  $11,07 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **9** и  $7,83 \text{ м}^{-3}/\text{км}$  – для эксперимента **10**. В эксперименте **11** вся область имеет концентрацию электронов, однородную по горизонтали, а по высоте – как на профиле рис. 1, б (невозмущенные условия); эксперимент **12** – вся область имеет концентрацию электронов, однородную по горизонтали, а по высоте – как на профиле рис. 1, а (магнитная буря, высыпание заряженных частиц).

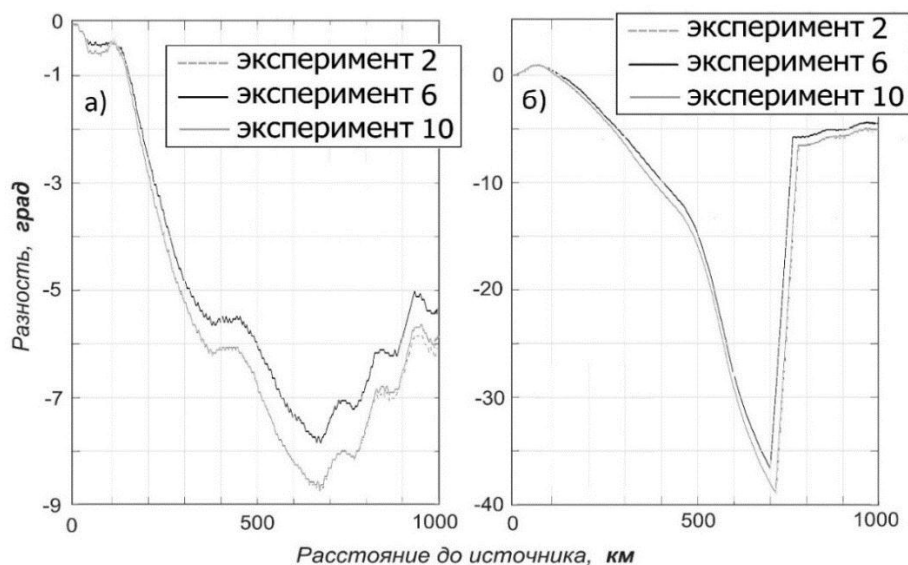


Рис. 2. Разность фаз для напряженности поля между невозмущенным случаем экспериментом (1) и экспериментами (2, 6, 10):  
а – поле  $E$ ; б – поле  $H$

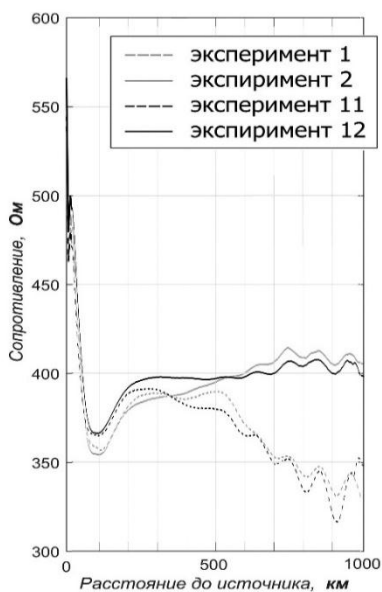


Рис. 3. Волновое сопротивление среды

На рис. 2 показана разность фаз для напряженности поля  $E$  (рис. 2, а) и поля  $H$  (рис. 2, б) между экспериментом **1** (невозмущенный случай) и экспериментами **2**, **6**, **10**. Видно, что магнитная часть поля запаздывает гораздо сильнее если в области моделирования имеется участок с профилем повышенной проводимости. Анализ результатов для переходов с разными градиентами в зоне перехода от одного профиля электронной концентрации к другому (эксперименты **3–6** и **7–10**) не выявил значимых различий как фаз сигнала, так и амплитуд (отличия в пределах 1%). Для результатов на значительном расстоянии от источника гораздо большее значение имеют размеры области и его расположение относительно источника, чем горизонтальный градиент в зоне перехода. На рис. 3 показано волновое сопротивление, рассчитанное как отношение  $E/H$  (эксперименты **1**, **2** и **11**, **12**). Видно, что во всех возмущенных случаях оно выше, чем в невозмущенных. Из рисунка заметно, что для данной длины волны требуется



расстояние порядка четырех длин волн для стабилизации параметров характерных для данного состояния ионосферы.

Из рис. 2 ясно видно, что фазы электрической и магнитной части поля по-разному реагируют на изменение параметров волновода Земля – ионосфера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в статье были озвучены следующие результаты:

1. Показано, что влияние величины горизонтальных градиентов в концентрации электронов на амплитуду и фазу электромагнитных сигналов ИНЧ-диапазона при переходе между областями с различными характеристиками волновода Земля – ионосфера незначительно и не превышает 1 %.

2. Выявлено значительное влияние вида вертикального профиля электронной концентрации на волновое сопротивление среды, а также показано, что в случаях солнечной вспышки и магнитной бури волновое сопротивление среды увеличивается.

3. Фазы электрической и магнитной части поля по-разному реагируют на изменение параметров волновода Земля – ионосфера, в возмущенных случаях фаза магнитного поля догоняет и перегоняет фазу электрического.

4. Показано, что параметры сигнала с частотой 1500 Гц при переходе между областями с различными характеристиками волновода Земля – ионосфера стабилизируются на расстоянии порядка четырех длин волн.

## Список используемых источников

1. Средневолновый радиолокатор Полярного геофизического института для исследования нижней ионосферы / В.Д. Терещенко, Е.Б. Васильев, Н.А. Овчинников и др. // Труды Кольского научного центра РАН. Сер. Техника и методика геофизического эксперимента. – 2003. – С. 37–46.

2. Явная схема расщепления для уравнений Максвелла / И.В. Мингалёв, О.В. Мингалёв, О.И. Ахметов и др. // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30, № 12. – С. 17–38.

3. Новый метод численного интегрирования системы Власова – Максвелла / О.В. Мингалёв, И.В. Мингалёв, М.Н. Мельник и др. // Математическое моделирование. – 2018. – Т. 30, № 10. – С. 21–43.

4. Kane Y. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1966. – Vol. 14. – P. 302–307.

5. Mur G. Absorbing boundary conditions for the finite-difference approximation of the time domain electromagnetic field equations // IEEE Transactions Electromagnetic Compatibility. – Vol. 23, № 4. – P. 277–382.

6. A transmitting boundary for transient wave analyses / Z.P. Liao, H.L. Wong, B.P. Yang, Y.F. Yuan // ScientaSinica (series A). – Vol. 17. – P. 1063–1076.

7. Berenger J.-P. A perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves // Journal of Computational Physics. – Vol. 114. – P. 185–200.

8. Crustal conductivity in Fennoscandia-a compilation of a database on crustal conductance in the fennoscandian shield / T. Korja, M. Engels, A. Zhamaletdinov, A. Kovtun // Earth, Planets and Space. – 2002. – Vol. 54. – P. 535–558.

К.В. Бакурский,  
кандидат технических наук;  
В.М. Гусаков,  
кандидат технических наук;  
В.Н. Цыкунов

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИГНАЛОВ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ ГЛОНАСС**

Для улучшения качества навигационного поля и повышения стабильности системной шкалы времени глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС предлагается использовать прием сигналов естественного излучения нейтронных звезд.

Ключевые слова: ГЛОНАСС, пульсарная шкала времени, навигационный космический аппарат.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Важными элементами инфраструктуры государства являются технические средства и системы, решающие задачи частотно-временного обеспечения (ЧВО) всех видов потребителей. Наличие у государства систем и средств ЧВО позволяет ему более эффективно решать задачи сохранения экономического и политического суверенитета, территориальной целостности России.

Одно из основных направлений совершенствования средств ЧВО является развитие глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС [1].

В настоящее время обосновывается возможность использования сигналов источников космического излучения (пульсаров) в радио, рентгеновском и видимом диапазоне волн для автономной навигации в космосе и обеспечения потребителей частотно-временной информацией (ЧВИ).

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Улучшение качества ЧВО напрямую связано с совершенствованием ГНСС, а именно [2]:

- с повышением стабильности бортовых синхронизирующих устройств ГНСС ГЛОНАСС;
- с совершенствованием технических средств наземного комплекса управления (НКУ) (повышении точности измерения текущих навигационных параметров и разности шкал времени);
- с разработкой методов и создание аппаратуры взаимной привязки шкал времени (ШВ) навигационных космических аппаратов (НКА);
- с совершенствованием алгоритмического обеспечения процедур обработки измерительной информации, определения орбит НКА, расчета частотно-временных поправок;
- с поисков альтернативных методов синхронизации и формирования шкал времени.

Для обеспечения высокой точности определения координат потребителя, в пределах нескольких метров, погрешность бортовых часов НКА не должна превышать нескольких наносекунд в пределах интервала в несколько часов.

Для формирования системных шкал времени в наземном комплексе управления используют групповые атомные стандарты с целью обеспечения высокой точности. В силу специфических ограничений стабильность шкалы времени бортовых стандартов НКА значительно уступает шкалам времени НКУ. По этой причине бортовые часы требуют регулярных (не реже ежедневных) сличений с более стабильными наземными стандартами. [3]

В статье предлагается альтернативный метод повышения качества ЧВО, путем коррекции шкалы времени НКА за счет приема высокостабильных сигналов источников космического радиоизлучения (пульсаров) на борту космического аппарата.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПУЛЬСАРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИНТЕРЕСАХ ГНСС ГЛОНАСС

Пульсары представляют собой быстро вращающиеся и сильно намагниченные нейтронные звезды, которые снабжены опознавательными знаками – устойчивым излучением во всем спектре электромагнитной энергии. В магнитно-дипольном приближении модель пульсара может быть изображена как на рис. 1.

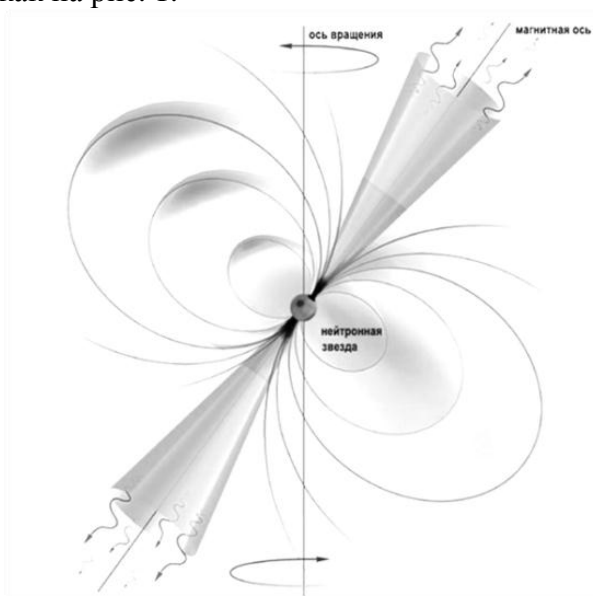


Рис. 1. Модель излучения пульсара

Период вращения, будучи наблюдаемым параметром, представляет собой измеряемую величину, которая непосредственно определяет моменты прихода импульсов излучения и их временные соотношения в наблюдаемой последовательности импульсов.

Стабильность среднего импульса пульсара пропорциональна  $10^{-3} - 10^{-4}$  от его периода ( $P$ ).

Для оценивания параметров принимаемых радиосигналов проводится усреднение нескольких сотен стабильно следующих индивидуальных импульсов и формируется средний импульс, профиль которого остается неизменным в течение многих лет (рис. 2). По профилю среднего импульса оценивается момент прихода импульсов (МПИ) [4].

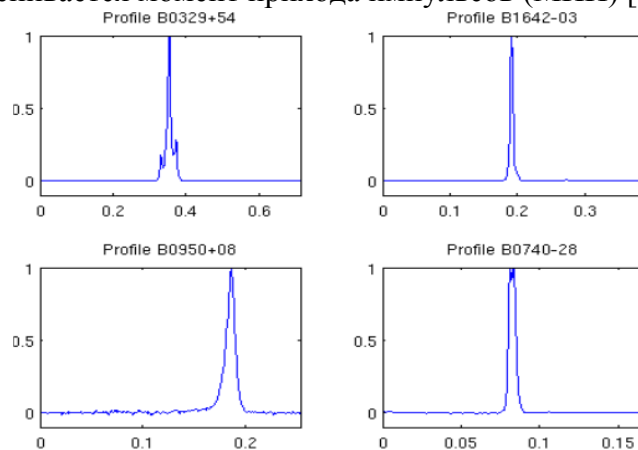


Рис. 2. Усреднение нескольких сотен стабильно следующих индивидуальных импульсов

Наблюдаемые радиопульсары по угловой скорости подразделяются на две группы:

1) быстро вращающиеся пульсары с периодом вращения всего несколько миллисекунд с производной в диапазоне  $\dot{P} = 10^{-19} - 10^{-21} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$ ;

2) более медленные, секундные пульсары с производной  $\dot{P} = 10^{-15} - 10^{-16} \text{ с} \cdot \text{с}^{-1}$  [4].

Момент прихода наблюдаемых радиоимпульсов зависит от параметров вращения – периода  $P$  или частоты  $\nu$  и их производных. Эти величины взаимосвязаны. Связь времени, частоты и периода выражается либо в виде зависимости номера импульса  $N$  от частоты импульсов и ее производных, либо в виде зависимости времени прихода  $PT$  импульса  $N$  от периода и его производных [5].

Выражение имеет вид:

$$PT(N) = t_0 + P_0 N + \frac{1}{2} P_0 \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^2 \ddot{P} - 2P_0 \dot{P}^2) N^3. \quad (1)$$

Ожидаемый вклад третьей производной настолько мал, что определяемый ею компонент в двухлетнем промежутке не превышает наносекунды или даже меньше, так что его нельзя даже обнаружить современными физическими средствами измерения на фоне наблюдаемых инструментальных шумов, и он не учитывается.

Очевидно, что при выборе начального события для другой эпохи значение периода будет другим, измененным с учетом производных в промежутке между этими двумя эпохами. Однако и новые значения параметров будут точно соответствовать степенному ряду (1) при любом расширении окрестности начального события в пределах, задаваемых времени подобной переменной  $t = P_0 N$ .

Если начальную эпоху выбирать произвольно, то новое фиксированное значение периода на эту эпоху будет определяться его производными и переменной  $t$ :

$$P_0^* = P_0 + \dot{P} t; \quad \dot{P} = \dot{P}_0 + \ddot{P} t.$$

После подстановки

$$P_0^* = P_0 + \dot{P}_0 t + \ddot{P} t^2; \quad t = P_0^* N$$

выражение (1) принимает вид

$$PT = P_0^* N + \frac{1}{2} P_0^* \dot{P} N^2 + \frac{1}{6} (P_0^{*2} \ddot{P} - 2P_0^* \dot{P}^2) N^3. \quad (2)$$

Левая часть представляет собой интервал наблюдаемого события излучения, отсчитываемый от начального события, а правая часть – аналитическое выражение этих интервалов через фиксированные на начальную эпоху параметры вращения пульсара.

Независимо от эпохи, выбранной для продолжения наблюдений, численные значения параметров вращения, по которым определяются интервалы на эпохе текущих наблюдений в любой координатной системе, согласованы с параметрами вращения, установленными в прошлом. [6]. При этом возможная достигаемая точность синхронизации шкал, при приеме сигналов миллисекундных пульсаров составляет десятки и единицы наносекунд, а долговременная стабильность шкалы времени может достигать до  $10^{-17}$ , что сопоставимо с атомными часами [4].

Моменты наблюдаемых на радиотелескопе импульсов пульсара, обладая высокой степенью периодичности на большой протяженности, содержат компоненты случайных вариаций, которые обусловлены не столько собственными характеристиками пульсара, сколько факторами внешних воздействий, таких как движение небесных тел, неоднородность среды, гравитационные поля, погрешности инструментальных средств наблюдения, ошибки методик обработки и подгонки наблюдательных данных по множеству переменных, значения которых априори известны лишь приблизительно. Многие ошибки можно исключить, если реализовать прием пульсарного излучения на борту космического аппарата (КА) на геостационарной орбите, тем самым реализовав высокостабильный репер частоты на борту КА (рис. 3).

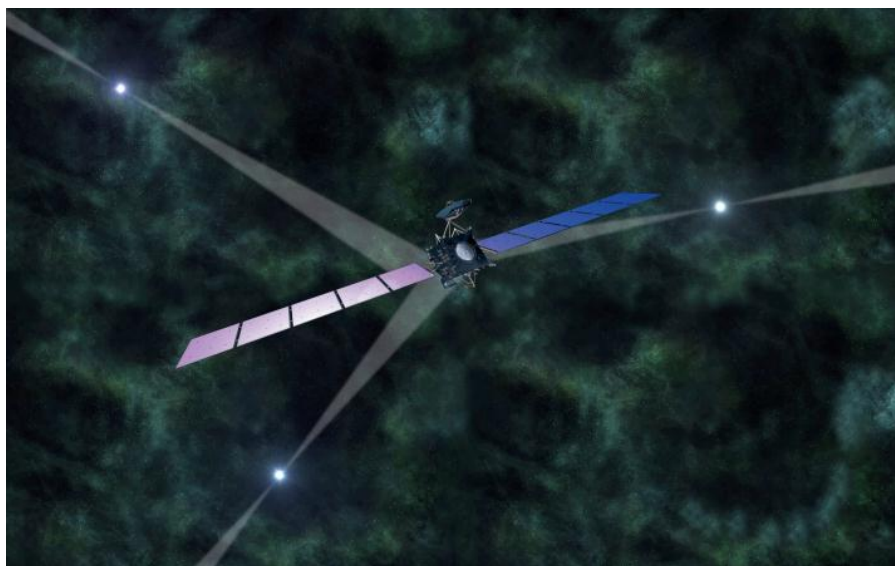


Рис. 3. Прием пульсарного излучения на борту космического аппарата

Предлагается использовать миллисекундные пульсары, представленные в табл. 1.

Таблица 1

**Характеристики предлагаемых пульсаров**

Имя	Долгота, град	Широта, град	Период, с	S400, мЯн
V1937+21	301,97	42,3	0,001557807	240
V1957+20	307,74	40,41	0,001607402	20
J0034-0534	5,67	-8,53	0,001877182	17
J1544+4937	207,65	65,88	0,002159288	5,4
J0218+4232	47,05	27,01	0,002323091	35

Причем необходимо принимать сигналы нескольких нейтронных звезд для уменьшения ошибок и формирования групповой шкалы времени из ансамбля пульсаров.

При независимом приеме сигналов пульсаров на борту КА возможно построение как первичной, так и вторичной шкалы времени.

Передавая значения пульсарного время с борта КА, находящегося на геостационарной орбите, по межспутниковому каналу на НКА ГЛОНАСС можно осуществлять коррекцию бортовых шкал НКА, тем самым уменьшить периодичность закладок ЧВП и повысить автономность орбитального сегмента ГНСС.

Произведем расчет антенны для приема сигналов пульсаров на борту КА. Рассмотрим возможность приема миллисекундных пульсаров  $L$ -диапазона с длиной волны 21 см [7].

Для обнаружения сигнала пульсара необходимо иметь отношение сигнал/шум равное 10, минимальное время накопления  $t_{\text{нак}} = 3600$  с и полосой пропускания приемника  $\Delta\nu = 100$  МГц, при этом шумовая температура приемника выбрана равной  $T_{\text{прм}} = 100$  К, шумовая температура неба  $T_{\text{н}} = 5$  К, коэффициент использования поверхности антенны  $\varepsilon = 0,5$ . Для пульсара со следующими параметрами: период излучения  $P = 10$  мс; ширина импульса  $W = 2$  мс; средняя плотность потока  $\Delta S = 10$  мЯн ( $1 \text{ мЯн} = 10^{-29} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}$ ), – при приеме сигналов

обоих типов поляризации согласно [8] минимальная эффективная площадь приемной антенны вычисляется с помощью выражения

$$A_{\text{эфф}} = \frac{S}{N} \frac{2k}{\varepsilon \Delta S} \frac{(T_{\text{прм}} + T_{\text{н}})}{\sqrt{2t_{\text{нак}} \Delta\nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}}, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана.

При подстановке всех значений получается значение около  $324 \text{ м}^2$ . При использовании параболической антенны, для достижения заданной эффективной площади ее радиус должен составлять  $r = \sqrt{A_{\text{эфф}} / \pi} \approx 10,5 \text{ м}$ .

Если увеличить время накопления сигнала до четырех часов, эффективная площадь уменьшится до  $171 \text{ м}^2$ , а радиус антенны – до  $7,3 \text{ м}$ .

Для продолжительного приема сигнала пульсара необходимо ориентировать антенну в соответствии с положением КА во время его движения. Задача формирования диаграммы направленности антенны в заданном направлении и его коррекция может быть решена при помощи облучателей в виде фазированной антенной решетки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье обоснована возможность приема радиоизлучения миллисекундных пульсаров на борту КА для формирования высокостабильного репера частоты и времени.

Используя свойства пульсарного времени поддерживать постоянство, можно определить отклонение времени измерительного атомного эталона сопоставлением исходных наблюдаемых интервалов и интервалов пульсарного времени и получить таким образом реальное время измерительного эталона, согласованное с пульсарным временем.

В этой статье показана возможность корректировать шкалы времени НКА ГЛОНАСС без участия НКУ, что увеличивает срок автономного существования орбитального сегмента ГНСС без снижения качества ЧВО потребителей, а также приведены результаты расчета антенны для приема излучения миллисекундных пульсаров на борту КА (на примере изучения пульсара В1937+21), которые показывают реализуемость предлагаемого подхода к корректировке бортовой шкалы времени.

## Список используемых источников

1. Жухман Л.Н., Элрод В.Д., Ван Дирен-донк А.Д. Возможности применения расширенной глобальной навигационной системы в рамках национальной аэронавигационной системы // Труды Института инженеров по электротехнике и электронике. – 1989. – Т. 77, № 11. – С. 130–139.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / Р.В. Бакитько, Е.Н. Болденков, Н.Т. Булавский и др. – М.: Радиотехника, 2010. – 796 с.
3. Авраменко А.Е. Пульсар: Природный эталон времени – пространства. – М.: Ленанд, 2015. – 193 с.
4. Пульсарная шкала времени / Ю.П. Илясов, А.Д. Кузьмин, Т.В. Шабанова // Труды Физического института РАН. – М.: Наука, 1989. – Т. 199. – С. 149–154.
5. Bisnovatyi-Kogan G.S., Komberg B.V. Pulsars in Close Binary Systems // Astron. Zh. [Astron. Rep.]. – 1974. – № 51. – 373 p.
6. Авраменко А.Е. Нейтронная звезда: от экстремальной турбулентности вспышки сверхновой к эталонной монотонности когерентного излучения пульсара // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. – 2015. – № 5. – С. 23–37.
7. Autonomous spacecraft navigation based on pulsar timing information / M.G. Bernhardt, W. Becker, T. Prinz, F.M. Breithuth, U. Walter // 2nd international conference on space technology (ICST). – 2011. – P. 1–4.
8. Lorimer D. R., Kramer M.M. Handbook of Pulsar Astronomy // Cambridge observing handbooks for research astronomers. – Cambridge: Cambridge University Press, 2005. – Vol. 4. – 295 p.

В.С. Бахолдин,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Д.А. Гаврилов,  
*кандидат технических наук;*  
В.Ф. Иванов;  
Д.А. Леконцев,  
*кандидат технических наук*

## **МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МНОГОПОЗИЦИОННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ НА ОСНОВЕ РАСЩЕПЛЕНИЯ СПЕКТРА СИГНАЛА С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

В статье предлагается метод повышения разрешающей способности радиолокатора с синтезированной апертурой на основе расщепления спектра. Предложено использование сигнала с линейной частотной модуляцией и расщепленным спектром для формирования радиолокационных изображений. Проведено сравнение его спектральных и корреляционных характеристик с характеристиками меандровых шумоподобных сигналов. Проведена оценка возможности применения сигнала с линейной частотной модуляцией и расщепленным спектром в многочастотных многопозиционных радиолокационных системах с синтезированной апертурой.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, сигнал с линейной частотной модуляцией, формирование радиолокационного изображения, многочастотная многопозиционная радиолокационная система, расщепление спектра.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Направления развития многопозиционной радиолокации соответствуют общей тенденции, выражающейся в объединении отдельных технических средств в большие системы, в которых благодаря тесному взаимодействию отдельных элементов улучшаются их характеристики и появляются новые возможности. Это вызвано не только повышением требований к качеству радиолокационной информации, но и значительными достижениями в технологиях, которые обеспечивают возможность реализации многопозиционных радиолокационных систем с синтезированной апертурой (МПРСА).

При построении многочастотных МПРСА необходимо обеспечить одновременный прием нескольких сигналов. Одновременное излучение сигналов с различными несущими частотами может быть осуществлено несколькими способами [1]. Для обеспечения высокой разрешающей способности МПРСА необходимо, чтобы отраженные сигналы от нескольких объектов под наблюдаемыми ракурсами, разделялись, т. е. чтобы система обладала разрешающей способностью по измеряемому параметру (дальности). Разрешающая способность (с учетом неоднозначности) определяется суммарной протяженностью только «заполненных» участков спектра, т. е. его общей шириной за вычетом «пустых» участков [2]. В наибольшей степени этому свойству удовлетворяют сигналы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) которые нашли широкое применение в радиолокаторах с синтезированной апертурой (РСА). Применение ЛЧМ-сигналов позволяет преодолеть противоречие между требованием высокой разрешающей способности МПРСА и ограниченной пиковой мощностью ее передатчика. При этом постоянное стремление заказчиков и разработчиков РСА к повышению разрешающей способности сталкивается с рядом ограничений. К ним относятся: максимальная длительность ЛЧМ-импульса, определяемая временем распространения сигнала до ближней границы дальностного строга; ширина полосы частотного диапазона, выделенного для работы РСА; баланс между техническими решениями, применяемые в конструкции приемо-передающих модулей, зави-

симось разработки систем цифровой обработки радиолокационных сигналов и их стоимости. В рамках таких ограничений один из возможных вариантов компромиссного решения, обеспечивающего возрастающие требования, может быть основан на использовании нового вида импульсного ЛЧМ-сигнала с расщепленным спектром [3].

## ПРИМЕНЕНИЕ ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ И РАСЩЕПЛЕННЫМ СПЕКТРОМ

Создание ЛЧМ-сигнала с расщепленным спектром является результатом анализа информационных характеристик сигналов от систем космической радиолокации и радионавигации [4]. Исходя из того, что верхние частоты в спектре сигнала оказывают влияние разрешающую способность, предлагается синтезировать сигнал с нулевым уровнем гармоник в центральной части его спектра.

Под ЛЧМ-сигналом с расщепленным спектром понимается импульсный сигнал, частота которого изменяется по кусочно-линейному закону, а энергия сосредоточена в двух и более разнесенных участках спектра. Закон модуляции частоты такого сигнала в многочастотных МПРСА и обозначения его параметров представлены на рис. 1, где  $\Delta F_{d/i}$ ,  $\tau_{w/i}$  – частота девиации и длительность каждого  $i$ -го импульса в пачке,  $\Delta F_{d/j}$ ,  $\tau_{C/n}$  – общая девиация частоты конкретного из диапазонов и длительность сигнала с расщепленным спектром,  $\Delta F_{p/i}$  – частотный разнос между участками спектра соседних импульсов,  $\Delta\tau_{mi/i}$  – межимпульсный интервал,  $\Delta F_{МПРСА}$  – общая полоса частот используемая в многочастотной МПРСА.

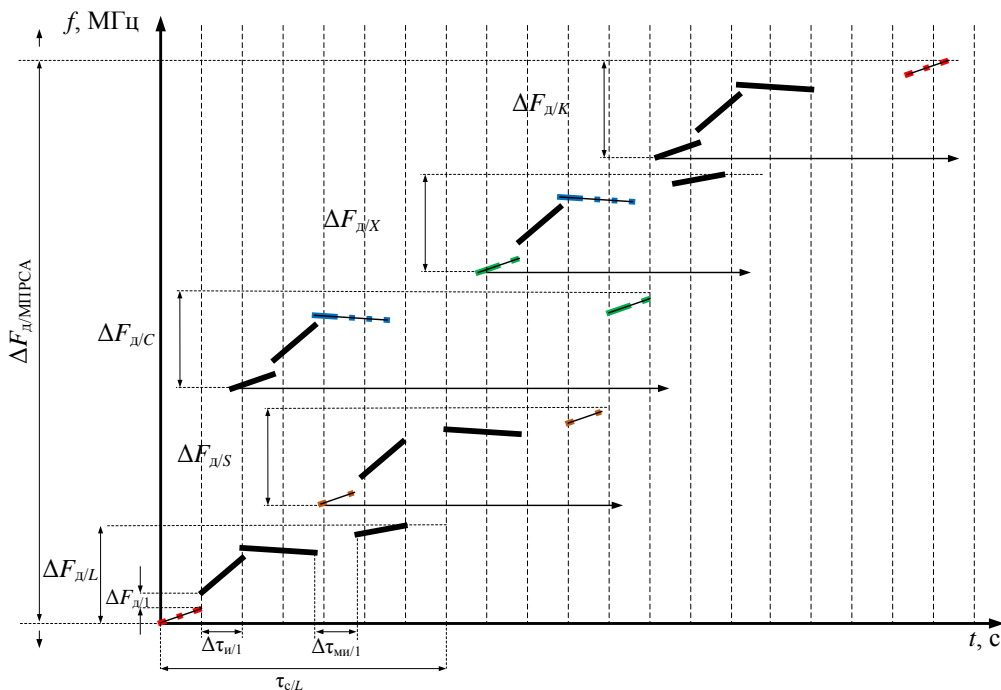


Рис. 1. Кусочно-линейное представление модуляции импульсов в пачке многочастотной (многодиапазонной) МПРСА

ЛЧМ-сигнал с расщепленным спектром является, с одной стороны, обобщением определения классического ЛЧМ-сигнала, а с другой – сигналом с перестройкой частоты. Фактическое и принципиальное отличие перед указанными сигналами состоит в том, что в оптимальной системе обработки сигналов (согласованном фильтре) он воспринимается как единое целое и имеет отличные корреляционные и спектральные характеристики соответственно.



Для преимущества с ВОС (*binary offset carrier*) сигналами [5] расщепленный ЛЧМ-сигнал обозначим как [РЛЧМ( $m,n$ )], где  $m$  и  $n$  – числитель и знаменатель дроби соответственно, которые показывают отношение разности средних частот правой  $f_{\text{ср/пр}}$  и левой  $f_{\text{ср/лев}}$  частей спектра ( $\Delta F = f_{\text{ср/пр}} - f_{\text{ср/лев}}$ ) к ширине одной из компонент расщепленного спектра  $\Delta F_d$ , содержащего гармоники РЛЧМ( $m,n$ ) сигнала (рис. 2).

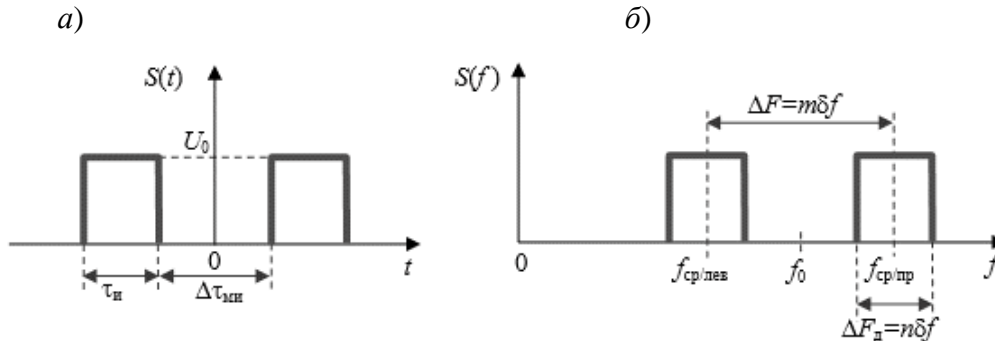


Рис. 2. Сигнал РЛЧМ( $m,n$ ):  
а – огибающая сигнала; б – спектр

В предлагаемом сигнале применяется спектральное расщепление, т. е. обязательно выполнение условия  $\Delta F_{p/i} \neq 0$ , а наличие временного не является обязательным, т. е.  $\Delta \tau_{\text{ми}/i} \geq 0$ . Необходимо отметить, что временное расщепление ЛЧМ-сигнала используется при обработке на основе согласованной фильтрации импульсов с  $V$ -образной частотной модуляцией, которая позволяет получить некоррелированные измерения дальности и скорости [6].

Таким образом, частота девиации каждого из импульсов  $\Delta F_d = n\delta f$ , а разнос центральных частот расщепленного сигнала  $\Delta F = m\delta f$ . Спектр сигнала РЛЧМ( $m,n$ ) может быть представлен как сумма спектров каждого из импульсов. Известно, что расщепление спектра сигнала  $S(\omega)$  на две части эквивалентно умножению функции  $s(t)$  на гармоническое колебание  $\cos(\pi\Delta Ft)$  [5]. Применительно к сигналу РЛЧМ( $m,n$ ) это смещение определяется величиной  $\pi m\delta f$ . Исходя из вышеизложенного, автокорреляционная функция (АКФ) сигнала РЛЧМ( $m,n$ ) может быть представлена как произведение АКФ гармонического и импульсного сигналов.

Вырожденным случаем сигнала с расщепленным спектром является РЛЧМ(1,1), который соответствует обычному ЛЧМ-сигналу, что как раз и демонстрирует обобщающий характер предлагаемых сигналов. На рис. 3 и 4 показаны результаты моделирования спектров и АКФ импульсных сигналов РЛЧМ(2,1) и РЛЧМ(3,1). Сигналы моделировались в виде последовательности из двух ЛЧМ-сигналов с длительностью  $\tau_n$  и девиацией частоты, равными половине длительности и девиации исходного ЛЧМ-сигнала. Полосы частот между левыми и правыми участками спектров были также заданы равными половине и двум девиациям частоты исходного ЛЧМ-сигнала.

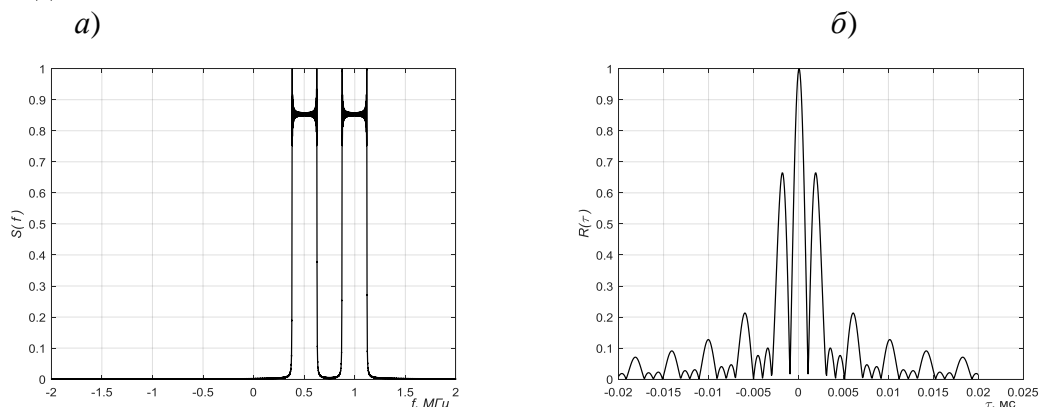


Рис. 3. Сигнал РЛЧМ(2,1):  
а – спектр; б – АКФ

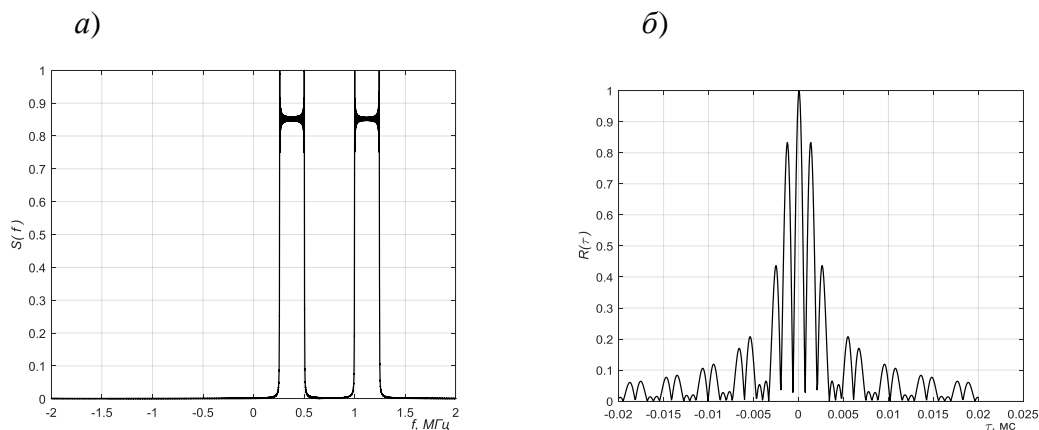


Рис. 4. Сигнал РЛЧМ(3,1):

а – спектр; б – АКФ

Сформированные таким образом РЛЧМ-сигналы имеют более узкий главный максимум по сравнению с исходным и, следовательно, обладают лучшей потенциальной разрешающей способностью (в пределах основного лепестка корреляционной функции). Недостаток РЛЧМ-сигналов проявляется в виде появления дополнительных боковых пиков АКФ с амплитудой 0,664 относительно максимума. Для обычных ЛЧМ-сигналов с прямоугольной огибающей амплитуда первого бокового пика АКФ равна 0,212 [3]. Качество изображения существенно зависит от уровня боковых лепестков отклика сигнала РСА на точечный отражатель, создающих вблизи ярких целей «ореолы» в виде нежелательных артефактов. Наличие артефактов на изображении приводит к искажению формы радиолокационных портретов объектов, созданию ложных и маскированию отметок от малоразмерных слабоотражающих объектов, поэтому выбор оптимального сигнала и периодичность излучения импульсов в пачке требует дополнительного исследования. С целью уменьшения уровня боковых лепестков можно использовать известные методы, применяемые в цифровой обработке как обычных ЛЧМ-сигналов, так и сигналов с ВОС модуляцией в глобальных навигационных спутниковых системах.

Одним из наиболее распространенных способов компенсации боковых лепестков является использование дополнительных весовых функций. При перемножении весовой функции и спектра сигнала происходит сглаживание его переднего и заднего фронтов, за счет чего можно добиться значительного подавления боковых лепестков автокорреляционной функции. Следует отметить, что использование амплитудной весовой обработки приводит к потерям энергии и разрешающей способности, а также к уменьшению отношения сигнал/шум до  $-14$  дБ [6] и расширению главного максимума автокорреляционной функции.

В МПРСА для компенсации артефактов, вызванных применением ВОС- и РЛЧМ-сигналов, используется свойство многопозиционности системы, заключающееся в том, что при оптимальной совместной обработке совокупности сигналов и помех, принимаемых различными позициями, происходит подавление помех. Таким образом, рассматривая синтезированные двумерные нормированные радиолокационные изображения (РЛИ) как совокупность проекций объекта, полученных для различных бистатических углов, и используя методы объединения многокурсовых РЛИ, можно формировать РЛИ с подавленными артефактами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В МРСА можно реализовать совместную обработку нескольких ЛЧМ-сигналов с непрерывными спектрами, как единого сигнала с расщепленным спектром. Достоверность информации и круг решаемых задач могут быть значительно расширены при совместном ис-

пользовании различных диапазонов МПРСА с традиционными средствами дистанционного зондирования Земли, для которых уже наработан ряд методик исследования различных видов земной поверхности. Применение в МПРСА РЛЧМ-сигнала позволяет повысить потенциальную пространственную разрешающую способность (по дальности) и тем самым обеспечить компромисс между возрастающими тактическими требованиями к современным РСА и возможностью их обеспечения в процессе технического проектирования.

### Список используемых источников

1. Вишин Г.М. Многочастотная радиолокация. – М.: Военное издательство МО СССР, 1973. – 89 с.
2. Коростелев АА. Пространственно-временная теория радиосистем: учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1987. – 320 с.
3. Бахолдин В.С. Метод повышения разрешения способности судового радиолокатора на основе сигнала с линейной частотной модуляцией и расщепленным спектром // Навигация и гидрография. – 2018. – № 53. – С. 7–13.
4. Алешкин А.П., Бахолдин В.С., Леконцев Д.А. Анализ информационных характеристик сигналов систем космической радиолокации и радионавигации и предложения по их улучшению // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – Вып. 647. – С. 37–42.
5. Ярлыков М.С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) и их разновидности в спутниковых навигационных системах: учебник. – М.: Радиотехника, 2017. – 416 с.
6. Кук Ч., Бернфельд М. Радиолокационные сигналы: учебник / пер. с англ. под ред. В.С. Кельзона. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.

Ю.И. Бова\*;

А.С. Крюковский\*;

доктор физико-математических наук, профессор;

Б.Г. Кутуза\*\*;

доктор физико-математических наук, профессор

\* Российский новый университет, г. Москва;

\*\* Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук, г. Москва

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ ВЕКТОРА ПОЛЯРИЗАЦИИ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Рассмотрено влияние ионосферной плазмы на распространение радиоволн мегагерцового диапазона. Исследованы рефракционные ошибки и вариации фазы сигнала. В зависимости от частоты источника излучения рассчитаны величины углов фарадеевского вращения вектора поляризации.

Ключевые слова: математическое моделирование, распространение электромагнитных волн, ионосферная плазма, бихарактеристики, лучевые траектории, вариации фазы, вектор поляризации, фарадеевское вращение.

### ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена изучению влияния ионосферной плазмы на характеристики радиосигналов на частотах 1200, 430 и 200 МГц. Известно, что радиоволны с такими частотами применяются для восстановления методом радиотомографии [1] распределения электронной концентрации в ионосфере Земли, а также при проектировании бортовых радиолокаторов с синтезированной апертурой [2]. На рис. 1 показан профиль электронной концентрации, соответствующий дневной (12 час) модели ионосферы для географических координат  $40^\circ$  с. ш.,  $30^\circ$  в. д.

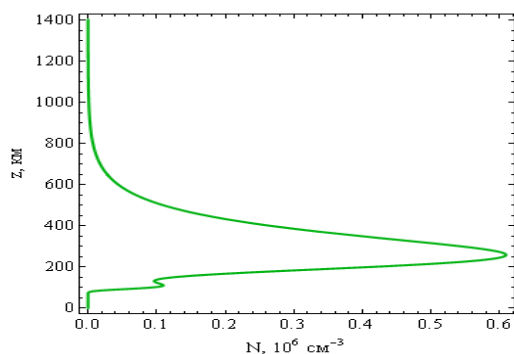


Рис. 1. Профиль электронной концентрации

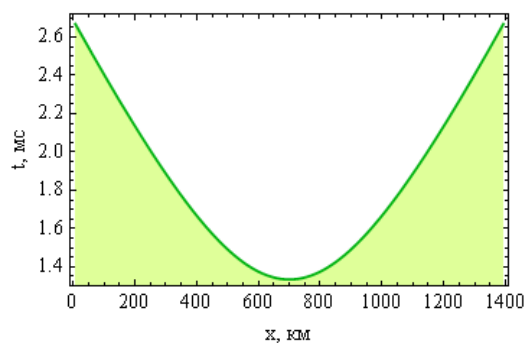


Рис. 2. Зависимость времени  $t$  от координаты  $x$  выхода луча

### МОДЕЛЬ ЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОСИГНАЛА

Для определения траектории лучей применена бихарактеристическая система [3–6], в которой  $\vec{k}$  – волновой вектор,  $\vec{r} = (x, y, z)$  – координаты луча,  $\omega$  – круговая частота излучения,  $f = \omega / (2\pi)$  – частота передатчика,  $t$  – групповое время,  $\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$  – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения [7–9]. Так как рабочая частота много больше плазменной  $\omega_0$ , будем считать, что

$$\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) = 1 - (\omega_0 / \omega)^2, \quad \omega_0^2 = 4\pi e^2 N / m_e. \quad (1)$$

В выражении (1)  $N(\vec{r})$  – величина электронной концентрации,  $e$  – заряд электрона, а  $m_e$  – масса электрона. Начальный волновой вектор  $\vec{k}(0)$  зависит от угла выхода луча  $\alpha_0$ .

Лучевые траектории в плоскости  $(x, z)$  показаны на рис. 3. Серым цветом показана концентрация электронов в ионосфере. Более светлые области соответствуют менее высокой электронной концентрации.

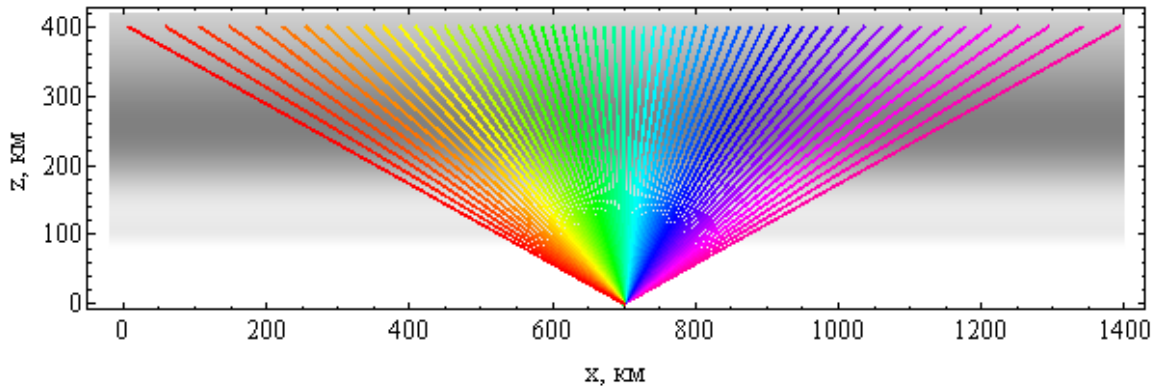


Рис. 3. Траектории лучей на фоне распределения электронной концентрации

Источник радиоизлучения – это горизонтально перемещающаяся антенна космического аппарата, расположенная на высоте  $z_p = 400$  км. В данной задаче угол наклона лучевых траекторий лежит в диапазоне от  $30$  до  $150^\circ$  относительно положительного направления горизонтальной оси. Приемник радиосигнала расположен на поверхности Земли на расстоянии  $x_p = 700$  км. На рис. 3 показаны только траектории, приходящие в приемник.

Зависимость группового времени от горизонтальной координаты  $x$  источника излучения показана на рис. 2. График имеет форму параболы. Рис. 2 и 3 визуально совпадают для рассматриваемого диапазона частот. Траектории на рис. 3 прямолинейные, хотя в действительности из-за рефракции при распространении в ионосфере Земли они отклоняются от прямых линий. Отклонение лучевых траекторий вдоль вертикали определялось по формуле (2) [5]:

$$\Delta z = z(t) - (x(t) - x_p) z_r / (x_p - x(t_r)), \quad (2)$$

где  $t_r$  – это время прихода луча из источника в приемник.

Вдоль траекторий лучи отклоняются, но в точке приема отклонение опять становится нулевым. Визуально зависимости для всех частот имеют одинаковый вид. Отличаются конкретные значения. При длине волны  $\lambda \sim 25$  см (частота  $f = 1200$  МГц) максимальное отклонение не превышает  $0,46$  м, при длине волны  $\lambda \sim 63$  см ( $f = 430$  МГц) –  $3,6$  м, а при  $\lambda \sim 1,5$  м ( $f = 200$  МГц) максимальное отклонение не более  $17$  м. Таким образом, с ростом частоты отношение максимального отклонения к длине волны становится меньше. Вычисление отклонения  $\Delta\alpha$  угла прицеливания  $\alpha$  от направления вдоль прямой линии, соединяющей источник и приемник, показывает [3–5], что отклонение  $\Delta\alpha$  маленькое. Для лучей, близких к крайним, оно равно  $30 \times 10^{-3}$ ,  $6 \times 10^{-3}$  и  $10^{-3}$  град для частот  $200$ ,  $430$  и  $1200$  МГц соответственно.

## ВАРИАЦИИ ФАЗЫ

Производную фазы по групповому времени можно найти по следующей формуле [4, 5]:

$$\Phi'_o(t) = x'_t k_x(t) + y'_t k_y(t) + z'_t k_z(t) - \omega \equiv \Phi'(t) - \omega. \quad (3)$$

График зависимости относительной скорости изменения фазы с высотой показан на рис. 4. Видно, что положения максимумов ионосферных слоев соответствуют минимумам кривой, а межслоевой долине соответствует локальный максимум. Минимальное значение производной приблизительно равно  $-15 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$ ,  $-7 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$  и  $-2,6 \times 10^5 \text{ с}^{-1}$  на частотах 200, 430 и 1200 МГц соответственно.

На рис. 5 показан график зависимости вариации фазы  $\Delta\Phi$  от группового времени в точке приема радиосигнала. Видно, что эта зависимость линейная. Фаза вычислялась по формуле:

$$\Phi(t) = \int_0^t \Phi'(\eta) d\eta, \text{ а вариация фазы } \Delta\Phi \text{ находилась как разность } \Delta\Phi = \Phi - \omega R/c, \text{ причем ве-}$$

личина  $\omega R/c$  – это фаза луча в пустоте, вычисленная вдоль прямой линии, соединяющей источник и приемник. Ионосфера вносит значительный вклад в величину фазы, а именно: от 83 до 167 периодов, от 46 до 75 периодов, и от 13 до 27 периодов на частотах 200, 430 и 1200 МГц соответственно.

На рис. 6. изображена зависимость вариации фазы  $\Delta\Phi$  от горизонтальной координаты  $x$ , соответствующей координате выхода луча. График имеет форму параболы. Вертикальному лучу отвечает минимальное отклонение фазы.

### ФАРАДЕЕВСКОЕ ВРАЩЕНИЕ ВЕКТОРА ПОЛЯРИЗАЦИИ РАДИОСИГНАЛА

В высокочастотном диапазоне можно считать, что обыкновенная и необыкновенная волны распространяются вдоль одной и той же лучевой траектории. Рассмотрим фарадеевское вращение вектора поляризации. Угол вращения вектора поляризации  $\Omega$  определяется следующей формулой [3–5, 10, 11]:

$$\Omega(t) = \frac{\omega}{2c} \int_0^t \Delta\mu \sqrt{(x'_i)^2 + (y'_i)^2 + (z'_i)^2} dt, \quad (4)$$

в которой через  $\Delta\mu$  обозначена разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны:

$$\Delta\mu \cong \frac{1}{2} \frac{v \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4(1-v)^2 u \cos^2 \theta}}{(1-v)(1-u \cos^2 \theta) - u \sin^2 \theta}. \quad (5)$$

В формуле (5) символом  $u$  обозначено отношение квадрата гирочастоты  $\omega_H$  к квадрату круговой частоты ( $e$ ,  $m_e$  и  $c$  – заряд электрона, масса электрона и скорость света):

$$u = \left( \omega_H / \omega \right)^2 = e^2 H_0^2 / (m_e^2 c^2 \omega^2). \quad (6)$$

Угол между вектором напряженности внешнего магнитного поля  $\vec{H}_0$  и волновым вектором  $\vec{k}$  обозначен как  $\theta$ . Для среды, близкой к изотропной, можно считать, что

$$\Omega(t) = 0,5 \omega \int_0^t \Delta\mu \sqrt{\epsilon(\vec{r}(t))} dt. \quad (7)$$

При вычислениях предполагалось, что амплитуда напряженности магнитного поля постоянная:  $H_0 = 0,465 \text{ Э}$ . Ориентация напряженности магнитного поля относительно системы координат на рис. 3 задана углами  $\gamma$  и  $\varphi$  [3–5]:  $\gamma = -57^\circ$ ,  $\varphi = 45^\circ$ . Разность  $\Delta\mu$  показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны в зависимости от высоты приведена на рис. 7.

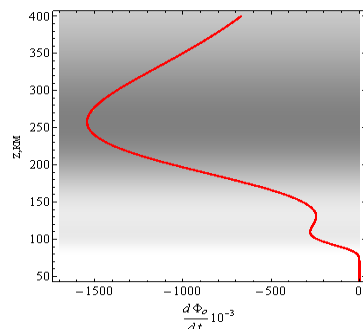


Рис. 4. Зависимость  $\Delta\mu$  от высоты ( $f=200$  МГц)

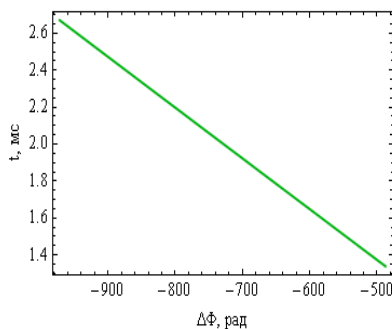


Рис. 5. Зависимость вариации фазы  $\Delta\Phi$  от высоты

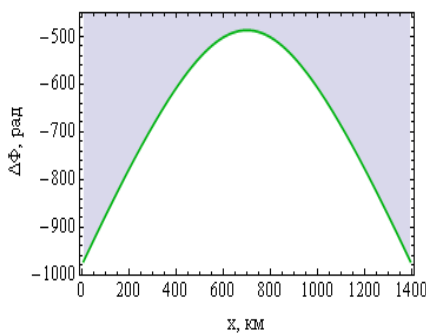


Рис. 6. Зависимость  $\Delta\Phi$  от расстояния по горизонтали

Форма графика соответствует профилю электронной концентрации. Несмотря на то, что вид графиков одинаков для разных частот, изменение частоты существенно меняет диапазон значений  $\Delta\mu$ . Величина  $\Delta\mu$  достигает  $7,5 \times 10^{-6}$ ,  $0,75 \times 10^{-6}$  и  $0,035 \times 10^{-6}$  для частот 200 МГц, 430 МГц и 1200 МГц соответственно.

Зависимость угла фарадеевского вращения вектора поляризации от группового времени показана на рис. 8. На рис. 9 представлена зависимость того же угла  $\Omega$  от координаты  $x$ .

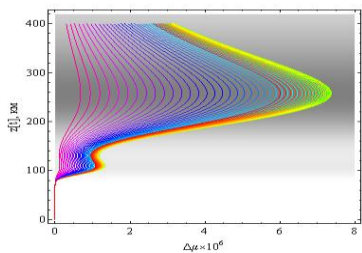


Рис. 7. Разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны в зависимости от высоты

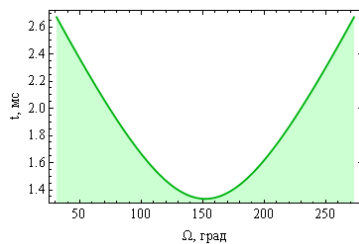


Рис. 8. Зависимость угла  $\Omega$  от времени  $t$

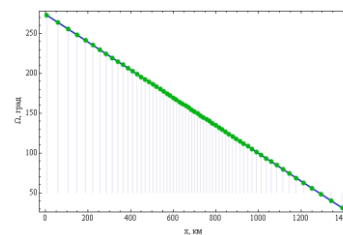


Рис. 9. Зависимость угла  $\Omega$  от расстояния  $x$  ( $f=200$  МГц)

Из вычислений следует, что угол фарадеевского вращения вектора поляризации для координаты  $x = 0$  км (рис. 9) достигает 270, 60 и  $8^\circ$  на частотах 200, 430 и 1200 МГц соответственно. При дальности  $x = 1400$  км (групповое время порядка 2,64 мс) угол  $\Omega$  минимален и составляет  $30$  ( $f = 200$  МГц),  $7,5$  ( $f = 430$  МГц) и  $0,8^\circ$  ( $f = 1200$  МГц).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода бихарактеристик исследовано влияние ионосферы Земли на распространение радиоволн высокочастотных диапазонов: 200, 430 и 1200 МГц. Рассмотрено отклонение лучевых траекторий от прямых линий вследствие рефракции, вариации фазы за счет влияния ионосферной плазмы и фарадеевское вращение вектора поляризации. Сопоставление оценок величин угла фарадеевского вращения и вариации фазы для различных частот показало, что на частотах 200 и 430 МГц влияние ионосферы существенное и его необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации бортовых радиолокаторов с синтезированной апертурой.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (гранты № 18-02-00544-а, №17-02-01183-а).

## Список используемых источников

1. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии / Е.С. Андреева, А.С. Крюковский, В.Е. Куницын и др. // Сборник докладов XXIII Всероссийской научной конференции. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. – Т. 3. – С. 288–291.
2. Application of SAR Operating at P-band for Space Experiments / B.G. Kutuza., A.A. Kalinkevitch, A.I. Ephimov., E.A.Vostrov., A.B. Dzenkevitch // Proceedings of EUSAR, Konigswinter, Germany. – 1996. – P. 309–313.
3. Features of the Influence of the Earth's Ionosphere on the P-Band Propagation The 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar / B.G. Kutuza, Y.I. Bova, A.S. Kryukovsky, V.I. Stasevich // Proceedings of EUSAR, Aachen, Germany. – 2018. – P. 806–809.
4. Исследование влияния ионосферы на распространение электромагнитных волн Р-диапазона / Ю.И. Бова, А.С. Крюковский, Б.Г. Кутуза и др. // Физические основы приборостроения. – М.: Российская академия наук, 2018. – Т. 7, № 1 (27). – С. 54–61.
5. Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Бова Ю.И. Исследование влияния ионосферы Земли на распространение радиоволн Р-диапазона // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – М.: РосНОУ, 2017. – № 2. – С. 7–12.
6. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. – М.: Академкнига, 2012. – Т. 57, № 9. – С. 1028–1034.
7. Математическое моделирование распространения частотно-модулированных радиоволн в ионосферной плазме / А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев и др. // Радиотехника и электроника. – М.: Академкнига, 2015. – Т. 60, № 10. – С. 1001–1009.
8. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Моделирование распространения частотно-модулированного излучения в анизотропной ионосферной плазме. Электромагнитные волны и электронные системы. – М.: Радиотехника, 2017. – Т. 22, № 5. – С. 4–11.



9. *Крюковский А.С., Скворцова Ю.И.* Математическое моделирование распространения радиоволн в нестационарной плазме с учетом кривизны поверхности Земли и ионосферных слоев // Вестник Российского нового университета. Сер. Сложные системы: модели, анализ и управление. – М.: РосНОУ, 2016. – № 1–2. – С. 34–40.

10. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере: монография. – М.: Мир, 1973. – 502 с.

11. *Кутуза Б.Г., Мошков А.В.* Влияние фарадеевского вращения плоскости поляризации в ионосфере при измерении их космоса радиоизлучения поверхности океана // Исследование Земли из космоса. – М.: Российская академия наук, 1988. – № 5. – С. 94–98.

А.А. Ваганов;  
А.Ю. Онуфрей,  
*доктор технических наук, профессор*

## **МОНИТОРИНГ ЗЕМНОЙ И ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРУППИРОВКИ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА НИЗКИХ ОРБИТАХ**

Рассмотрены варианты глобального мониторинга земной и водной поверхности с использованием группировки малых космических аппаратов на низких орбитах. Представлены расчеты размеров зоны обзора космического аппарата и их требуемого количества в зависимости от высоты орбиты, угла поля зрения и варианта наблюдения.

Ключевые слова: мониторинг, малый космический аппарат, параметры орбиты, бортовая оптико-электронная аппаратура, низкие орбиты.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является уже в настоящее время одним из важнейших направлений применения космической техники для социально-экономических и научных целей. В настоящее время успешно эксплуатируются сотни космических аппаратов (КА), решающие задачи ДЗЗ. Задачи ДЗЗ могут быть классифицированы по следующим тематическим направлениям:

- сельское хозяйство;
- климатология, контроль глобальных атмосферных изменений;
- поиск полезных ископаемых и энергоносителей;
- землепользование;
- наблюдение прибрежных зон и океанов;
- лесное хозяйство;
- контроль водных ресурсов;
- мониторинг чрезвычайных ситуаций.

Существует особая группа задач ДЗЗ, требующих решения в масштабе реального времени или близком к нему, что подразумевает обзор поверхности Земли с периодичностью не более одного часа [2, 3]. К числу таких задач относятся: обнаружение стихийных гидрометеорологических явлений, очагов лесных пожаров; мониторинг состояния и обнаружение аварий на трубопроводах; мониторинг быстро возникающих и исчезающих источников загрязнения окружающей среды; оперативное выявление чрезвычайных ситуаций (ЧС), выявление ресурсной облачности для тушения крупных лесных пожаров и других быстропротекающих процессов и явлений [1]. Обнаружение таких явлений из космоса происходит бортовой оптико-электронной аппаратурой (БОЭА) по их излучению в инфракрасном и видимом диапазонах. В настоящее время обнаружение ЧС происходит при помощи КА ДЗЗ, расположенных на круговых солнечно-синхронных орбитах со средними высотами 475–830 км (Ресурс-П, Канопус-В, Метеор-М) и геостационарных орбитах (Электро-Л) [3].

В первом случае периодичность наблюдения составляет от 2 до 16 дней. Для обеспечения требуемой периодичности наблюдения необходимо создавать орбитальную группировку (ОГ) с большим числом КА, что потребует в свою очередь больших финансовых и технологических ресурсов [4]. Для минимизации затрат на создание и эксплуатацию ОГ целесообразно добиться предельного уменьшения массы КА вплоть до уровня сверхма-

лых КА (СМКА), т. е. массой до 100 кг. Исходя из этого перспективным направлением развития средств ДЗЗ является создание ОГ на основе СМКА.

При геостационарной орбите, в зону обзора КА попадает значительная часть поверхности Земного шара. Однако, недостатком такого наблюдения является большая дальность до объекта, что затрудняет процесс обнаружения и снижает достоверность обнаружения ЧС. Для его устранения предлагается использовать низкоорбитальные группировки КА (высота орбиты до 2000 км) [1–3]. При этом уменьшится дальность наблюдения, что повысит мощность излучения, воспринимаемую БОЭА. Зона обзора в таком случае уменьшается, в связи с чем возникает задача выбора вариантов построения ОГ для оптимизации зоны обзора и обоснования параметров БОЭА при ограничении на высоту орбиты и состава ОГ.

Для исследования данных вопросов предлагается модель ОГ СМКА непрерывного глобального мониторинга ЧС с целью выбора параметров БОЭА. Модель ОГ СМКА отражает наиболее существенные свойства и функции, выполняемые ОГ, для чего учитывается ее баллистическое построение, тип и количество СМКА, а также характеристики БОЭА и система связи.

Задача обнаружения ЧС на поверхности Земли может быть декомпозирована на следующие подзадачи:

- расчет размеров зоны обзора для одного СМКА;
- расчет необходимого количества СМКА по выбранной методике построения ОГ;

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Формализованная постановка задачи формулируется следующим образом. Для заданных высоты орбиты  $H_{КА}$ , размеров поля зрения БОЭА и способа наблюдения рассчитать требуемое количество СМКА и их орбитальное построение для глобального мониторинга земной и водной поверхности.

Высота орбиты СМКА  $H_{КА}$  представляет собой разность радиусов орбиты  $r$  и Земли  $R$ .

Поле зрения БОЭА задается угловыми размерами по углам рыскания  $\gamma_{рыск}$  и тангажа  $\gamma_{танг}$ .

Способ наблюдения задается отклонением оси визирования БОЭА от надира, представляющим собой угол  $\delta$ . В рамках статьи рассмотрим два способа наблюдения:

- 1) ось визирования БОЭА направлена в надир;
- 2) ось визирования БОЭА направлена так, что дальняя граница зоны обзора проходит по касательной к поверхности Земли.

Ограничения:

- Земля представляет собой шар радиусом 6371 км с равномерным распределением массы;
- движение СМКА – невозмущенное;
- влияние атмосферы, Луны, планет не учитывается;
- высота орбиты СМКА от 200 до 5000 км;
- количество СМКА в ОГ – не более 200 штук.

Целью статьи является исследование возможности создания ОГ СМКА для глобального мониторинга земной и водной поверхности.

## РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ОБЗОРА ОДНОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Подробно методика расчета зон непрерывного обзора и требуемого количества СМКА для круговой зоны обзора рассмотрена в [12]. Для простоты расчетов зоны обзора считаем, что БОЭА СМКА, находящегося на орбите (точка  $C$ ), направлена в надир (точка  $O_3$  – центр Земли) рис. 1 [5]. Область поверхности Земли, на которой возможно обнаружение ЧС, ограничена углом поля зрения БОЭА. Эту же область можно задать при помощи геоцентрического угла обзора, с вершиной в центре Земли.

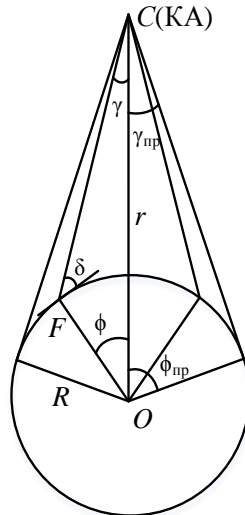


Рис. 1. Угол обзора одного СМКА

Геоцентрический угол обзора зависит от высоты орбиты и угла поля зрения БОЭА и определяется согласно выражению:

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin \gamma\right) - \gamma, \quad (1)$$

где  $\varphi(\varphi_{пр})$  – геоцентрический угол (предельный);

$R$  – радиус Земли;

$r$  – радиус орбиты;

$\gamma(\gamma_{пр})$  – угол поля зрения БОЭА (предельный).

С увеличением угла поля зрения БОЭА до предельного значения, когда в поле зрения попадает весь земной шар, угол возвышения над горизонтом стремится к нулю (наблюдение по касательной к поверхности Земли). В этом случае предельный геоцентрический угол обзора определяется следующим выражением:

$$\varphi_{пр} = \arccos \frac{R}{r},$$

а предельный угол поля зрения БОЭА

$$\gamma_{пр} = \arcsin \frac{R}{r}.$$

Зона обзора СМКА перемещается по поверхности Земли, при этом центр зоны обзора совпадает с подспутниковой точкой (так как БОЭА направлена в центр Земли). Ширина полосы обзора равна длине дуги с радиусом равным радиусу Земли (при расчетах использовано значение  $R=6357$  км) и геоцентрическим углом  $\varphi_3$  и определяется выражением:

$$W = 2R\varphi = 2R \left[ \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin \gamma\right) - \gamma \right].$$

Значения предельного геоцентрического угла и ширины полосы обзора в зависимости от высоты орбиты СМКА ( $H_{КА}=r-R$ ) представлен в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость  $\varphi_{пр}$  и  $W$  от высоты орбиты СМКА

$H_{КА}$ , км	200	250	...	550	600	700	...	1400	1500	2000	...	5000	5500
$\varphi_{пр}$ , градусы	14,19	15,81	...	23,02	23,97	25,74	...	34,96	35,99	40,48	...	55,96	57,58
$W$ , км	3148	3509	...	5108	5319	5711	...	7758	7987	8982	...	12418	12777

Полученные значения предельного геоцентрического угла обзора являются исходными данными для расчета количества СМКА, необходимого для глобального непрерывного обзора поверхности Земли.

## РАСЧЕТ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОРБИТАЛЬНОЙ ГРУППИРОВКИ

Глобальный непрерывный обзор подразумевает, что каждую точку на поверхности Земли видит как минимум один СМКА с некоторым минимальным углом возвышения. Простейшим примером глобального непрерывного обзора поверхности Земли является система цепочек СМКА на полярных орбитах. В каждой цепочке СМКА равномерно распределены по орбите на угловом расстоянии  $2\alpha$  (рис. 2).

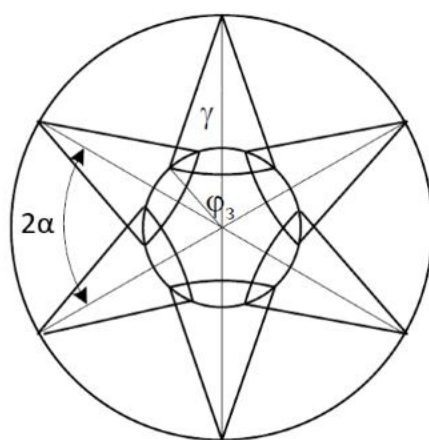


Рис. 2. Распределение СМКА в цепочке

Для непрерывного обзора необходимо, чтобы угловое расстояние было меньше, чем два геоцентрических угла обзора:

$$2\alpha = \frac{2\pi}{n} < 2\phi,$$

где  $n$  – количество СМКА в цепочке;

$\phi$  – геоцентрический угол обзора.

Ширина полосы непрерывного обзора СМКА, определяемая геоцентрическим углом  $\beta$ , вследствие его движения, будет меньше его ширины обзора  $W$  (рис. 3).

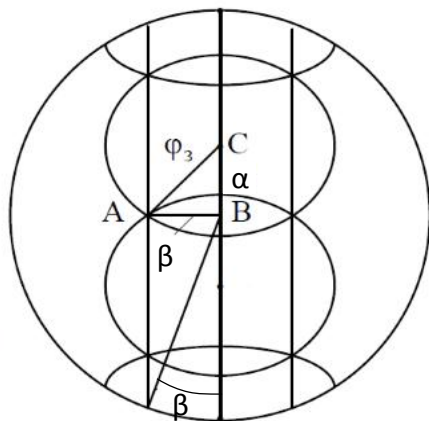


Рис. 3. Полоса непрерывного обзора СМКА

Для полного покрытия поверхности Земли выберем орбиты СМКА таким образом, чтобы полосы непрерывного обзора вплотную прилегали друг к другу на экваторе. Тогда, при приближении полос непрерывного обзора к полюсам, они будут пересекаться. Для оценки количества необходимых СМКА воспользуемся известной методикой, рассмотренной в [5]. Количество СМКА в цепочке при неизменном угле поля зрения БОЭА будет зависеть от числа полос непрерывного обзора (плоскостей орбит)  $m$ :

$$n(m) = \begin{cases} \frac{\pi}{\alpha(m)}, & \text{если } \frac{\pi}{\alpha(m)} - \text{целое;} \\ \left[ \frac{\pi}{\alpha(m)} \right] + 1, & \text{если } \frac{\pi}{\alpha(m)} - \text{дробное,} \end{cases}$$

где  $\left[ \frac{\pi}{\alpha(m)} \right]$  – целая часть от  $\frac{\pi}{\alpha(m)}$ .

Значения  $\alpha(m)$  и  $\beta(m)$  определяются из следующих соотношений:

$$\alpha(m) = \arccos(1 + \cos\varphi_3 - \cos\beta(m)),$$

$$\beta(m) = \frac{\pi}{m}.$$

Таким образом, общее число СМКА в группировке  $N$  определяется выражением:

$$N(m) = m \cdot n(m).$$

После нахождения всех  $N(m)$  при заданном варианте  $H_{КА}$  и  $\gamma$  выбираем среди них минимальное. Количество СМКА для глобального непрерывного обзора при различных углах поля зрения БОЭА представлено в табл. 2.

Таблица 2

Количество СМКА для системы непрерывного глобального обзора								
$H_{КА}$ , км	200	400	600	700	800	1000	1200	1500
$\gamma$ , град	$N$ , количество КА							
20	75042	18700	8256	6090	4646	2960	2046	1300
25	45584	11319	4998	3654	2808	1770	1224	777
30	29631	7320	3234	2376	1798	1150	779	493
35	20079	4944	2170	1568	1200	756	512	322
40	13858	3397	1479	1075	814	510	338	209
45	9660	2343	1008	722	544	336	220	135
50	6720	1595	680	480	364	210	136	77
55	4600	1058	434	300	220	126	72	
60	3002	665	252	170	112			
65	1856	375	105					
70	987	112						
75	324							

Полученные значения  $N$  используются для выбора возможных вариантов  $H_{КА}$  и  $\gamma$  исходя из ограничения на количество СМКА в ОГ.

Пусть поле зрения БОЭА представляет собой прямоугольник с углами поля зрения по глубине и ширине соответственно равными  $\gamma_{глуб}$  и  $\gamma_{шир}$ . Рассмотрим вариант обзора, когда ось визирования БОЭА направлена так, что дальняя граница зоны обзора касается поверхности Земли (рис. 4).

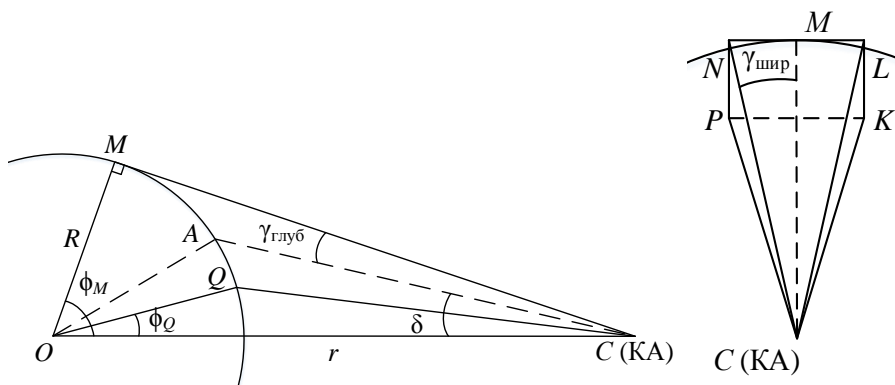


Рис. 4. Обзор по касательной к поверхности Земли

В таком случае угол отклонения оси визирования БОЭА от надира  $\delta$  и угол поля зрения по оси тангажа  $\gamma_{глуб}$  будут в сумме составлять предельный угол поля зрения  $\gamma_{пр}$ :

$$\gamma_{пр} = \delta + \gamma_{глуб}.$$

Угол, под которым будет наблюдаться ближняя граница зоны обзора (угол между направлением в надир и направлением на ближнюю границу зоны обзора), будет определяться разностью углов  $\delta$  и  $\gamma_{глуб}$ :

$$\angle OCQ = \delta - \gamma_{глуб}.$$

Геоцентрический  $\phi_Q$  рассчитывается подстановкой  $\angle OCQ$  в выражение (1):

$$\phi_Q = \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin(\delta - \gamma_{глуб})\right) - (\delta - \gamma_{глуб}).$$

Размеры зоны обзора будем измерять геоцентрическими углами ширины дальней и ближней границ зоны обзора и геоцентрическим углом глубины зоны обзора.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ ДАЛЬНЕЙ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ОБЗОРА

Дальняя граница зоны обзора будет определяться наблюдением по касательной к сфере радиуса  $R$ , тогда  $\triangle CON = \triangle COM = \triangle COL$  (рис. 5).

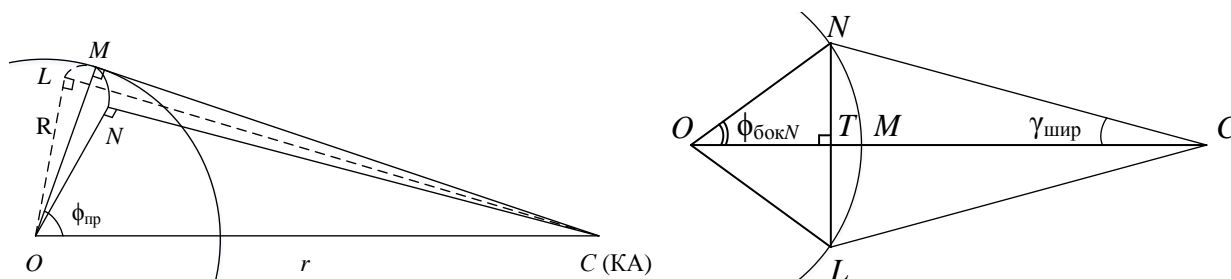


Рис. 5. Определение ширины дальней границы зоны обзора

Ширина дальней границы зоны обзора будет определяться геоцентрическим углом  $\angle LOM$ . Плоскость  $CTO$  перпендикулярна  $CNL$  и  $ONL$ . Отрезки  $CN$  и  $CM$  равны, как касательные из одной точки к сфере, их длины определяются выражением:

$$CN = CM = \sqrt{r^2 - R^2}.$$

Выразим значение  $TN$  из прямоугольных треугольников  $\triangle CNT$  и  $\triangle ONT$  через гипотенузу и синус противолежащего угла:

$$TN = ON \cdot \sin\phi_{бокN} = CN \cdot \sin\gamma_{шир}.$$

Из вышестоящего выражения выразим значение  $\varphi_{\text{бокV}}$ :

$$\varphi_{\text{бокV}} = \arcsin\left(\frac{CN}{ON} \sin\gamma_{\text{шир}}\right) = \arcsin\left(\frac{\sqrt{r^2 - R^2}}{R} \sin\gamma_{\text{шир}}\right).$$

Геоцентрический угол ширины дальней границы зоны обзора равен удвоенному значению угла  $\varphi_{\text{бокV}}$ :

$$\varphi_{\text{шир д}} = 2 \cdot \varphi_{\text{бокV}}.$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШИРИНЫ БЛИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ЗОНЫ ОБЗОРА

Угол  $\angle PCO$  образован сторонами  $CP$  и  $CO$ , лежащими в перпендикулярных плоскостях  $CQP$  и  $CQO$ . Стороны  $CP$  и  $CO$  составляют с прямой  $CQ$  – пересечением перпендикулярных плоскостей углы, соответственно равные  $\gamma_{\text{шир}}$  и  $\delta - \gamma_{\text{глуб}}$  (рис. 6).

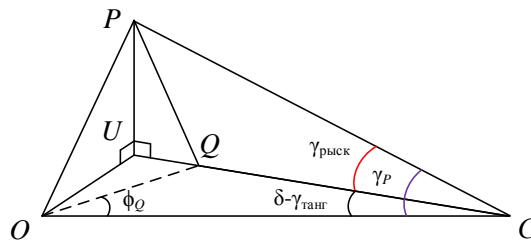


Рис. 6. Ближняя граница зоны обзора на поверхности Земли

Введем вспомогательную систему координат и возьмем единичные векторы из точки  $C$  в направлениях  $P$  и  $O$  (рис. 7).

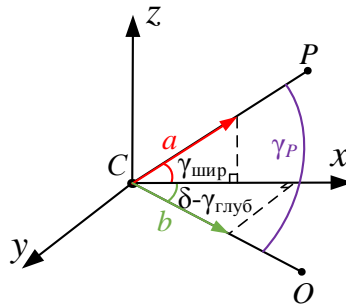


Рис. 7. Вспомогательная система координат

Из формулы скалярного произведения векторов можно выразить угол между этими прямыми, как угол между векторами:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}| \cdot |\vec{b}| \cdot \cos\gamma_P.$$

Так как выбраны единичные вектора, то

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = \cos\gamma_P.$$

Скалярное произведение через координаты векторов:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = x_a x_b + y_a y_b + z_a z_b.$$

Так как вектора лежат в перпендикулярных плоскостях, то одновременно ненулевыми обе проекции векторов будут только по одной из осей:

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = x_a x_b = \cos\gamma_{\text{шир}} \cdot \cos(\delta - \gamma_r);$$

$$\gamma_P = \arccos(\cos\gamma_{\text{шир}} \cdot \cos(\delta - \gamma_r)).$$



Геоцентрический угол рассчитываем по уже известной формуле (1):

$$\varphi_P = \arcsin\left(\frac{r}{R} \sin\gamma_P\right) - \gamma_P.$$

Для упрощения расчетов воспользуемся еще одной вспомогательной системой координат (рис. 8). Начало координат – центр Земли, ось  $X$  направлена на КА, ось  $Z$  лежит в плоскости симметрии угла поля зрения КА по рысканью.

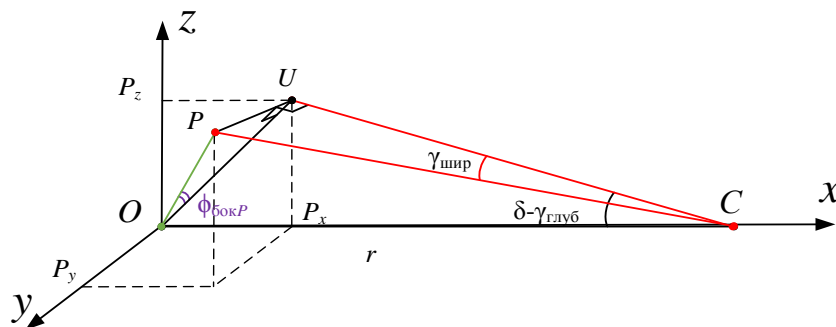


Рис. 8. Определение ширины ближней границы зоны обзора

Из треугольника  $\Delta COP$  по теореме синусов получим соотношение

$$\frac{\sin\gamma_P}{OP} = \frac{\sin\varphi_P}{PC}.$$

Выразим из него  $PC$ :

$$PC = R \cdot \frac{\sin\varphi_P}{\sin\gamma_P}.$$

Из прямоугольного треугольника  $\Delta PUO$  получим значение синуса угла  $\varphi_{бокP}$ :

$$\sin\varphi_{бокP} = \frac{PU}{OP} = \frac{P_y}{R} = \frac{PC \cdot \sin\gamma_{шир}}{R} = \frac{\sin\gamma_{шир} \cdot \sin\varphi_P}{\sin\gamma_P}.$$

Рассчитаем угол  $\varphi_{бокP}$ :

$$\varphi_{бокP} = \arcsin\left(\frac{\sin\gamma_{шир} \cdot \sin\varphi_P}{\sin\gamma_P}\right).$$

Геоцентрический угол ширины ближней границы зоны обзора равен удвоенному значению угла  $\varphi_{бокP}$ :

$$\varphi_{шир\ б} = 2 \cdot \varphi_{бокP}.$$

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ОБЗОРА ПО ГЛУБИНЕ

Для вычисления геоцентрического угла, определяющего размер зоны обзора по глубине необходимо найти разность геоцентрических углов дальней и ближней границ зоны обзора, обозначенных соответственно  $\varphi_T$  и  $\varphi_U$ :

$$\varphi_{глуб} = \varphi_T - \varphi_U.$$

Значение  $\varphi_T$  равняется предельному геоцентрическому углу, так как наблюдение ведется по касательной к поверхности Земли (см. рис. 5):

$$\varphi_T = \varphi_{пр}.$$

Угол  $\varphi_U$  можно вычислить используя проекции точки  $P$  на оси вспомогательной системы координат (рис. 9).

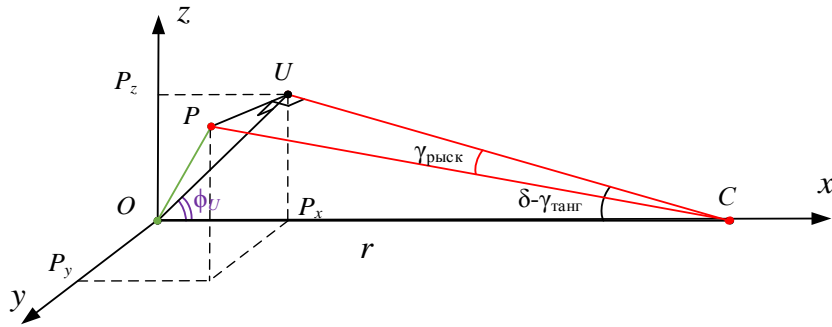


Рис. 9. Определение размера зоны обзора по глубине

Выразим сначала тангенс угла:

$$\operatorname{tg}\varphi_U = \frac{P_z}{P_x} = \frac{PC \cdot \cos \gamma_{\text{шир}} \cdot \sin(\delta - \gamma_{\text{глуб}})}{r - PC \cdot \cos \gamma_{\text{шир}} \cdot \cos(\delta - \gamma_{\text{глуб}})}.$$

Значение угла  $\varphi_U$  будет определяться выражением:

$$\varphi_U = \operatorname{arctg} \left( \frac{PC \cdot \cos \gamma_{\text{шир}} \cdot \sin(\delta - \gamma_{\text{глуб}})}{r - PC \cdot \cos \gamma_{\text{шир}} \cdot \cos(\delta - \gamma_{\text{глуб}})} \right).$$

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ОБЗОРА И КОЛИЧЕСТВА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Зона обзора одного КА будет представлять собой поверхность Земли, ограниченную выпуклыми дугами ближней и дальней границ и боковыми линиями (рис. 10).

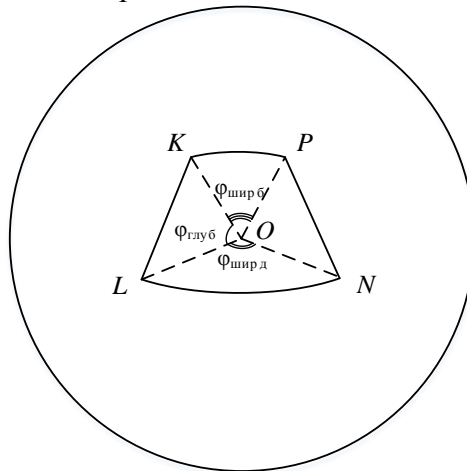


Рис. 10. Зона обзора одного КА

Количество СМКА для глобального непрерывного обзора определим следующим образом. Сначала найдем количество СМКА в цепочке:

$$n = \begin{cases} \frac{2\pi}{\varphi_{\text{глуб}}}, & \text{если } \frac{2\pi}{\varphi_{\text{глуб}}} - \text{целое;} \\ \left[ \frac{2\pi}{\varphi_{\text{глуб}}} \right] + 1, & \text{если } \frac{2\pi}{\varphi_{\text{глуб}}} - \text{дробное.} \end{cases}$$

Необходимое количество цепочек СМКА рассчитаем исходя из соображения, что границы зон обзора по ширине прилегают друг к другу с самым узким месте –  $\varphi_{\text{шир б}}$  и составляют в сумме угол  $\pi$ :

$$m = \begin{cases} \frac{\pi}{\varphi_{\text{шир б}}}, \text{ если } \frac{\pi}{\varphi_{\text{шир б}}} - \text{целое;} \\ \left[ \frac{\pi}{\varphi_{\text{шир б}}} \right] + 1, \text{ если } \frac{\pi}{\varphi_{\text{шир б}}} - \text{дробное.} \end{cases}$$

Общее количество СМКА будет определяться произведением  $m$  на  $n$ . Количество СМКА для наблюдения по касательной к поверхности Земли при различных углах поля зрения БОЭА представлено в табл. 3.

Таблица 3

Количество СМКА для наблюдения по касательной к поверхности Земли								
$H_{\text{КА}}$ , км	200	400	600	700	800	1000	1200	1500
$\gamma_{\text{глуб}}/\gamma_{\text{шир}}$ градусы	$N$ , количество КА							
20/20	3080	1239	697	560	465	364	286	216
25/25	2688	1000	578	450	390	273	216	154
30/30	2241	817	464	375	308	–	–	–
35/35	1846	684	–	–	–	–	–	–

Прочерками обозначены варианты, при которых угол поля зрения становится настолько велик, что в него попадает подспутниковая точка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены различные варианты построения низкоорбитальной группировки СМКА для непрерывного глобального мониторинга земной и водной поверхности. Использование низкоорбитальных СМКА является одним из возможных вариантов повышения оперативности обнаружения ЧС. Определение состава ОГ и характеристик БОЭА на этапах проектирования целесообразно на основе моделирования.

Рассчитано необходимое количество СМКА для заданных высот орбит, размеров поля зрения БОЭА и способов наблюдения. Из данных табл. 2 и 3 следует, что наблюдение по касательной к поверхности Земли требует гораздо меньшего количества СМКА.

Недостатками представленной модели являются упрощенное представление о форме Земли, отсутствие учета возмущающих факторов на движение СМКА, а также избыточный контроль всей поверхности Земли.

Направлениями дальнейшего совершенствования модели являются: учет эллиптической формы Земли и влияния возмущающих факторов на движение СМКА, а также выбор отдельных районов для наблюдения.

## Список используемых источников

1. Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года / Федеральное космическое агентство. – URL: <http://www.gisa.ru/file/file766.doc> (дата обращения: 01.09.2018).
2. Космические системы ДЗЗ / Научный центр оперативного мониторинга Земли. – URL: [http://www.ntsomz.ru/ks\\_dzz/satellites](http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites) (дата обращения: 01.09.2018).

3. Задачи обработки многозональных видеоданных КМСС на КА «Метеор-М» / Б.С. Жуков, А.С. Василейский, М.М. Железнов и др. – URL: <http://www.iki.rssi.ru/earth/pres2006/zhukov.pdf> (дата обращения: 01.09.2018).
4. Луян Е.А., Барталёв С.А. Проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса // Земля и Вселенная. – 2011. – № 3. – URL: <http://naukarus.com/sputnikovye-nablyudeniya-zemli> (дата обращения: 01.09.2018).
5. Власов С.А., Кульвиц А.В., Мосин Д.А. Баллистическое проектирование систем космических аппаратов: учебно-методическое пособие. – СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2010. – 81 с.
6. Дулевич В.Е. Теоретические основы радиолокации: учеб. пособие для вузов. – М.: Сов. радио, 1978. – 608 с.
7. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М.: Сов. радио, 1978. – 400 с.
8. Савицкий А.М., Сокольский М.Н. Оптические системы объективов для малых космических аппаратов // Оптический журнал. – 2009. – № 10. – С. 83–88.
9. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Несканирующие тепловизионные приборы: основы теории и расчета. – Казань: Изд-во Казанского федерального университета, 2004. – 228 с.
10. Мониторинг пожаров и их последствий с помощью дистанционного зондирования Земли. – URL: [http://mapexpert.com.ua/index\\_ru.php?id=25&table=news](http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=25&table=news) (дата обращения 01.09.2018).
11. Иванов В.А., Иванова Г.А., Москальченко С.А. Справочник по тушению природных пожаров. – 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск, 2011. – 130 с.

В.М. Гусаков,

*кандидат технических наук;*

В.Ф. Иванов;

П.В. Савочкин,

*кандидат технических наук, доцент*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА ФАРАДЕЯ**

Предложена лучевая модель построения траектории радиоволн в СВЧ-диапазоне, распространяющихся через атмосферу, с использованием сферически слоистой модели, учитывающей как продольное, так и, косвенно, горизонтальное распределение показателя преломления, а также поворот плоскости поляризации за счет эффекта Фарадея. На основе модели разработан алгоритм, позволяющий достичь высокой точности определения радиолокационных параметров при малых вычислительных затратах.

Ключевые слова: радиолокация, распространение радиоволн, эффект Фарадея, закон Снеллиуса.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В системах радиолокации главной задачей является определение координат движущихся объектов, причем требования к точности решения радиолокационной задачи с каждым годом все повышаются.

Как известно, решение задачи о месте определения лоцируемых объектов осуществляется на основе данных о времени распространения радиоволны, углах прихода, которые находятся по фазово-амплитудным характеристикам сигнала. Амплитуда и фаза сигнала в точке приема зависят от параметров среды по траектории распространения радиоволн. Следовательно, необходим математический аппарат, определяющий связь между полем радиоволны и параметрами среды распространения.

### **ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ**

Моделирование распространения радиоволн в реальной тропосфере и ионосфере Земли сопряжено с известными трудностями решения дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами. Число задач, для которых найдено точное решение, невелико, и они, естественно, не охватывают всего многообразия реальных характеристик неоднородных сред, представляющих непосредственный интерес для практического исследования. Применение приближенных (асимптотических) методов волновой теории, с одной стороны, и численных методов с другой, позволяет значительно продвинуться в этой области.

Лучевой метод занимает особое место среди других асимптотических методов по ряду причин, одна из них (и не последняя) заключается в его исключительной простоте и возможности получения аналитического решения для широкого круга задач, не поддающихся исследованию точными или другими асимптотическими исследованиями. Переход к лучевому приближению еще не дает решения уравнений Максвелла или волнового уравнения, а представляет собой лишь сведение волновой задачи к решению более простых уравнений в отсутствие особых точек, например, к уравнению эйконала, определяющему фазу волны к уравнению переноса, определяющему амплитуду. Естественно, что получение аналитического выражения для поля в лучевом приближении в первую очередь предполагает возможность аналитического решения уравнения эйконала и определения траектории лучей.

На частотах СВЧ-диапазона для нахождения траектории радиоволны атмосферу можно разбить на слои малой толщины, в пределах которых коэффициент преломления считается постоянной величиной и, следовательно, траектория радиоволн – прямолинейной (рис. 1). Таким образом, при решении уравнения эйконала для такого случая можно применить закон Снеллиуса:

$$n_{i+1} \sin Z_{i+1} = n_i \sin Z_i, \quad (1)$$

где  $n_i$  – показатель преломления  $i$ -го слоя среды;

$Z_i$  – угол, отсчитываемый от вертикали (рис. 1).

Разбиение атмосферы на слои осуществляется с учетом представления формы Земли эллипсоидом вращения с параметрами определенными выбранной системы координат (например, ПЗ-90 или WGS-84). При этом в малой области пересечения лучевой траекторией границы раздела слоев атмосфера рассматривается в плоскостойком приближении (с горизонтальной анизотропией показателя преломления и нулевыми горизонтальными градиентами). Не смотря на формальное отсутствие горизонтального градиента при построении лучевой траектории при использовании закона Снеллиуса, в первом приближении продольная его составляющая (вдоль траектории) косвенно учитывается ввиду использования моделей атмосферы с горизонтальными распределениями показателя преломления.

Протяженность прямолинейного участка траектории ( $dl$ ) удобнее задавать постоянной величиной, но различной для тропосферы и ионосферы. Это связано с необходимостью экономии вычислительного ресурса, которое можно обеспечить учетом различий значений высотных градиентов показателя преломления. Ввиду того, что максимальные пространственный градиент соответствует изменению высоты, то и  $dl$  должно выбираться исходя из обеспечения точности расчета зенитных траекторий. Так, для тропосферы  $dl$  задается величиной равной 0,2–0,5 км и 1–10 км – для ионосферы.

Коэффициент преломления в выражении (1) до высоты 60 км определяется из модели тропосферы, а после 60 км – на основании модели ионосферы NeQuick2 [1]. При пересечении границы слоя предполагается, что коэффициент преломления меняется скачком.

При построении траектории по закону Снеллиуса (1) определяются геоцентрические и геодезические координаты точек траектории распространения сигнала от расположения радиолокационной станции до объекта.

С высоты 60 км, используя модель геомагнитного поля *IGRF* [2], рассчитывается поворот плоскости поляризации (эффект Фарадея) в соответствии с выражением

$$\Psi = \frac{2,365 \cdot 10^{-5}}{f^2} \int_L N_e B_m \cos \alpha dl, \quad (2)$$

где  $N_e$  – концентрация электронов в ионосфере в точке расчета  $\text{м}^{-3}$ ;

$B_m$  – амплитуда полного вектора магнитной индукции нТл;

$L$  – длина пути радиоволны в одном направлении м;

$dl$  – участок пути (длина луча между слоями), м;

$f$  – несущая частота, МГц;

$\cos \alpha$  – косинус угла между вектором магнитной индукции и направлением распространения сигнала.

Полное электронное содержание (ПЭС) по трассе распространения находим методами численного интегрирования (методом трапеций) с переменным шагом в соответствии со следующей формулой:

$$I = \int_L N_e dl. \quad (3)$$

Погрешность измерения угла места за счет рефракции (рис. 1) определяется соотношением

$$\Delta E = E - E_0, \quad (4)$$

где  $E$  – измеренный РЛС угол места, рад;

$E_0$  – рассчитанный угол места с учетом рефракции, рад.

Погрешность измерения дальности (рис. 1) определяется следующим выражением:

$$\Delta R = R - R_0, \quad (5)$$

где  $R$  – измеренная длина пути (при распространении радиоволны со скоростью света);  $R = c\tau_3$ ;

$R_0$  – расстояние от РЛС до объекта.

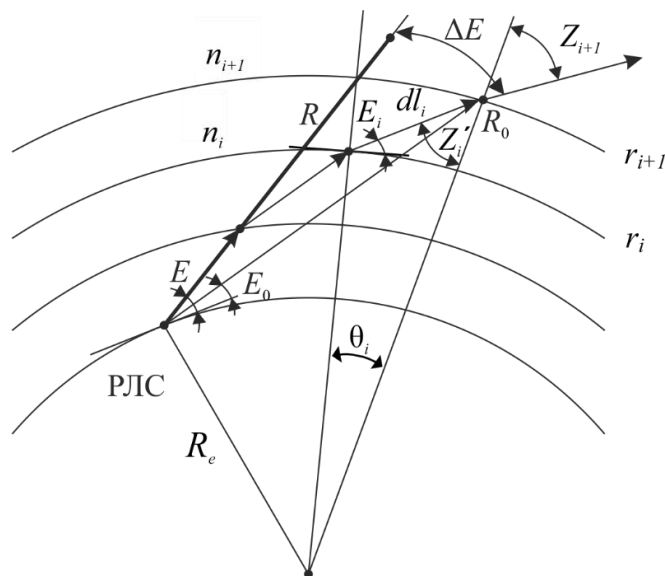


Рис. 1. Траектория радиоволны в сферически слоистом приближении

## ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ТРАЕКТОРИИ РАДИОВОЛНЫ

Моделирование траектории распространения радиоволн между РЛС и объектом радиолокационного наблюдения может быть описано в виде алгоритма (рис. 2). Алгоритм состоит из двух основных частей:

1) построение траектории радиоволны с вычислением интегральных оценок ПЭС и поворота плоскости поляризации (блоки 3–10);

2) вычисление оценок погрешностей траекторных измерений и корректирующей информации (блок 11).

Первая часть алгоритма реализует циклическое выполнение однотипных действий – расчет координат точек, описывающих траекторию радиоволны в системах координат, связанных с параметрами выбранной системы координат. В процессе построения траектории используются две основные системы координат – геоцентрическая и геодезическая, а также две вспомогательные (промежуточные) локальные декартовы системы – *ENU* (*East-North-Up*) и *NED* (*North-East-Down*). Локальная система *ENU* используется для связи с измеряемыми РЛС угловыми величинами (азимут, углом места), а *NED* применяется в модели геомагнитного поля *IGRF*.

Исходными данными для работы алгоритма являются геоцентрические  $[X \ Y \ Z]_{\text{РЛС}}^T$  и геодезические  $[\lambda \ \phi \ h]_{\text{РЛС}}^T$  координаты РЛС, а также измерения РЛС (угловые координаты и время задержки сигнала в одном направлении  $\tau_3$  и фиксированная величина приращения траектории по дальности ( $dl$ )).

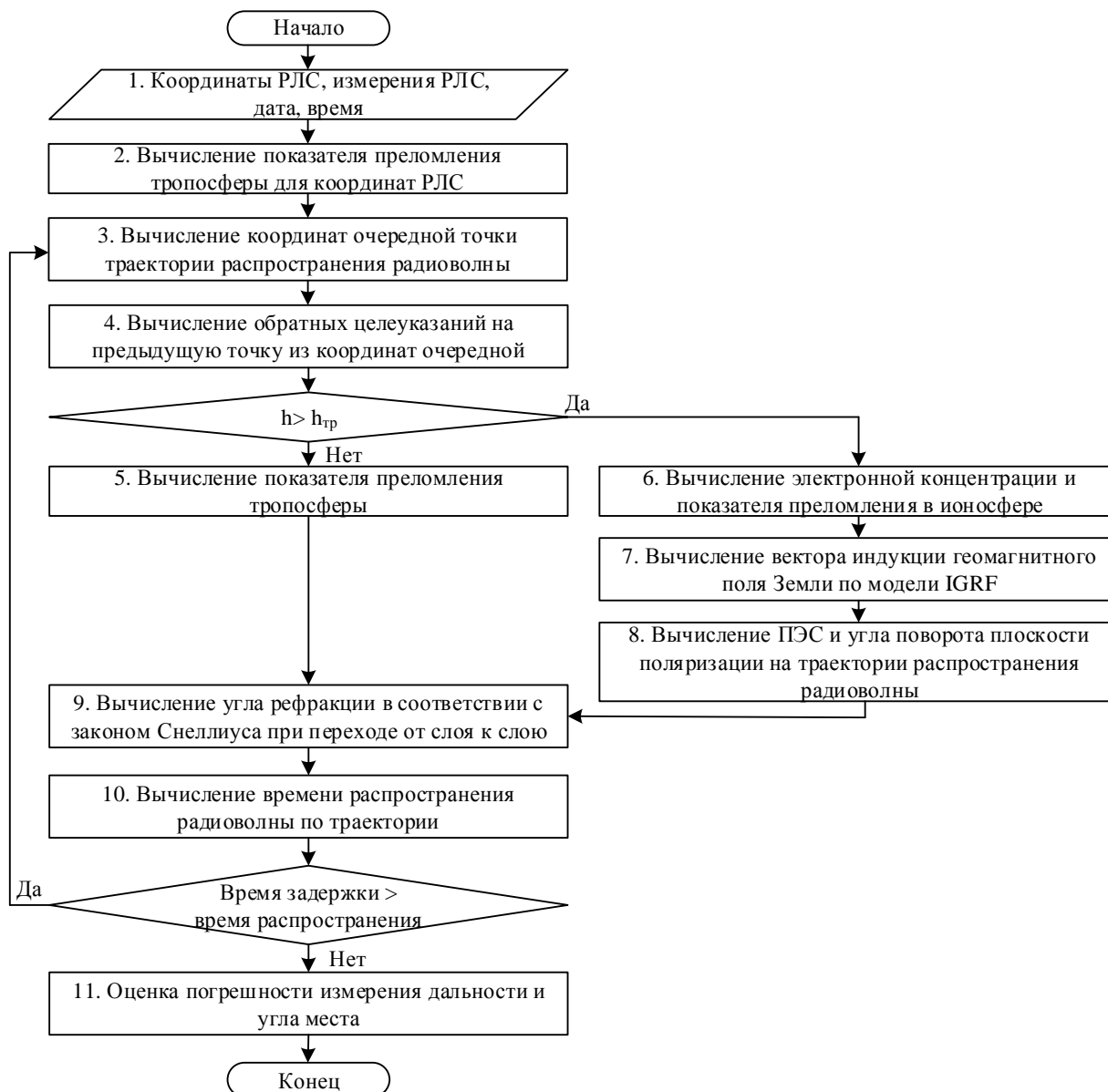


Рис. 2. Алгоритм вычисления траектории распространения радиоволны, поворота плоскости поляризации и погрешности измерения

Циклическая часть алгоритма состоит из двух ветвей. В первой вычисляется показатель преломления тропосферы в соответствии с заданной моделью, а во второй осуществляется расчет:

- электронной концентрации и показателя преломления ионосферы;
- вектора магнитной индукции геомагнитного поля Земли;
- ПЭС на траектории радиоволны;
- поворота плоскости поляризации на траектории радиоволны.

Полное электронное содержание по траектории распространения находим методами численного интегрирования. Методом трапеций ПЭС вычисляется в соответствии с формулой

$$I = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(N_{e_i} + N_{e_{i+1}})}{2} \cdot dl_i \right],$$

где  $N_{e_i}$ ,  $N_{e_{i+1}}$  – электронная концентрация в  $i$  и  $i+1$  точке траектории;  
 $dl_i$  – малый участок траектории.



В процессе расчета ПЭС рассчитывается поворот плоскости поляризации при вычислении, которого дополнительно учитывается влияние геомагнитного поля:

$$\Psi = \frac{2,365 \cdot 10^{-5}}{f^2} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(N_{e_i} |\vec{B}_i| + N_{e_{i+1}} |\vec{B}_{i+1}|)}{2} \cos \angle(\vec{B}_i, \vec{k}_i) \cdot dl_i \right],$$

где  $\vec{k}_i$  – волновой вектор;

$\vec{B}_i$  – вектор индукции геомагнитного поля.

Косинус угла между векторами вычисляется:

$$\cos \angle(\vec{B}_i, \vec{k}_i) = \frac{\vec{B}_i \cdot \vec{k}_i}{|\vec{B}_i| \cdot |\vec{k}_i|}.$$

Так как модель геомагнитного поля *IGRF* выдает составляющие вектора напряженности в системе координат *NED*, то его необходимо преобразовать в локальную систему координат *ENU*:

$$[X \ Y \ Z]_{ENU}^T = [Y \ X \ -Z]_{NED}^T.$$

Во второй части алгоритма осуществляется расчет погрешностей измерения угла места и дальности в соответствии с формулами (4) и (5).

## ВЫВОД

Применение лучевого подхода на частотах СВЧ диапазона для нахождения траектории радиоволны, распространяющейся через атмосферу, дает хорошую точность вычислений. При этом оно существенно снижает вычислительные затраты.

## Список используемых источников

1. Electron density models and data for transionospheric radio propagation. Report ITU-R. P. 2297–0. P. Series Radiowave propagation. – 2017. – 19 p.
2. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation / Thébault et al. // Earth, Planets and Space. – 2015. – Vol. 79. – P. 69–83.

В.И. Ерохин,  
*доктор физико-математических наук, профессор;*  
А.П. Кадочников,  
*кандидат технических наук;*  
В.В. Какаев,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Ю.В. Соловьёв;  
С.В. Сотников,  
*кандидат технических наук*

## **КРИТЕРИИ ЗАВЯЗКИ ТРАЕКТОРИЙ КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ, ОДНОВРЕМЕННО НАБЛЮДАЕМЫХ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИЕЙ**

Радиолокационные станции (РЛС) дальнего обнаружения зачастую сталкиваются с проблемой разрешения нескольких космических объектов (КО), находящихся вблизи друг к другу. В статье предложены новые критерии завязки траекторий космических целей, одновременно находящихся в зоне обзора РЛС, которые предлагается использовать в существующих алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации. Указанные критерии позволяют без потери качества решения задачи завязки траекторий КО снизить трудоемкость перебора вариантов до величины  $O(n^3)$ , где  $n$  – количество наблюдаемых целей.

Ключевые слова: обработка радиолокационной информации, завязка траекторий.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Радиолокационные станции дальнего обнаружения зачастую сталкиваются с проблемой разрешения нескольких КО, находящихся вблизи друг к другу. Наиболее характерным примером данной ситуации является проблема разрешения КО в ограниченном объеме при групповых запусках малых космических аппаратов. В этом случае при траекторной обработке радиолокационной информации в вычислительное устройство РЛС поступают отметки от неизвестного числа целей при неизвестном их местоположении в области контроля.

Первым этапом траекторной обработки является этап завязки (обнаружения) траекторий, сущность которого заключается в отождествлении наблюдаемых отметок целей (и соответствующих указанным отметкам координат) с соответствующим набором траекторий. С увеличением количества движущихся КО, одновременно находящихся в зоне обзора РЛС, резко возрастает вычислительная сложность (и временные затраты) задачи завязки траекторий, что может служить причиной пропуска целей. Одновременно с этим растет вероятность неправильного отождествления наблюдаемых отметок целей с соответствующими траекториями, что может служить причиной «размножения» целей, т. е. появления большого количества ложных траекторий. Причиной указанных явлений являются особенности задачи завязки траекторий, заключающиеся в использовании перебора вариантов, вычислительная трудоемкость которого резко возрастает с увеличением количества одновременно наблюдаемых целей, а также неустраняемые ошибки используемых в процедурах сопоставления наблюдаемых отметок траекториям эвристических методов.

Таким образом, построение как можно более быстрых, а также более точных методов и алгоритмов завязки траекторий является актуальной задачей, которой и посвящена данная статья.

Затрагиваемая проблематика периодически находит свое отражение в литературе. В частности, необходимую терминологию, постановки типовых вычислительных задач и обзор наиболее распространенных методов завязки траекторий можно найти в работе [1]. Пути решения проблемы завязки траекторий многопозиционными радиолокационными комплексами

ми, основанные на математическом аппарате кластерного анализа, представлены в работе [2]. Двухэтапная схема завязки траекторий, в которой кроме этапа собственно завязки присутствует этап подтверждения обнаруженной траектории, основанный на расчете отношений правдоподобия, изложен в работе [3]. Возможно, перспективным методом завязки траекторий и последующего сопровождения целей, могут оказаться методы цифровой фильтрации, освещенные в работе [4]. Список работ можно продолжить, но представление детального обзора литературы выходит за рамки данной статьи.

Целью исследования является построение конструктивных (быстрых и точных) критериев завязки траекторий, пригодных для использования в соответствующих алгоритмах.

### КРИТЕРИЙ ЗАВЯЗКИ ТРАЕКТОРИЙ НА ОСНОВЕ ГИПОТЕЗЫ О БЛИЗОСТИ ЗАКОНА ДВИЖЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОГО ОБЪЕКТА К РАВНОМЕРНОМУ И ПРЯМОЛИНЕЙНОМУ

Предположим, что некоторый объект на некотором заданном временном интервале движется в пространстве равномерно и прямолинейно. В этом случае его координаты в произвольной прямоугольной системе координат будут подчиняться следующим зависимостям:

$$\begin{pmatrix} x(t) \\ y(t) \\ z(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \cdot t \Leftrightarrow X(t) = X_0 + V \cdot t. \quad (1)$$

Пусть имеется некоторый набор, содержащий  $m$  измерений координат объекта, сделанных через одинаковые промежутки времени  $\Delta t$ :

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x} \\ \mathbf{y} \\ \mathbf{z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_m \\ y_1, y_2, \dots, y_m \\ z_1, z_2, \dots, z_m \end{pmatrix} = \mathbf{X} = (X_1 \quad X_2 \quad \dots \quad X_m). \quad (2)$$

В силу выражения (1) указанные координаты для  $i = 1, 2, \dots, m$  будут иметь следующий вид:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + i \cdot \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} \cdot \Delta t \Leftrightarrow X_i = X_0 + i \cdot V \cdot \Delta t. \quad (3)$$

Если соотношения (1) и (3) выполнены строго, т. е. ошибки в измерениях координат отсутствуют, и объект действительно движется равномерно и прямолинейно, то при  $i = 1, 2, \dots, m-2$  координаты удовлетворяют следующим условиям:

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{pmatrix} - 2 \cdot \begin{pmatrix} x_{i+1} \\ y_{i+1} \\ z_{i+1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x_{i+2} \\ y_{i+2} \\ z_{i+2} \end{pmatrix} = 0 \Leftrightarrow X_i - 2 \cdot X_{i+1} + X_{i+2} = 0. \quad (4)$$

Пусть

$$A = \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_p \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_p \end{pmatrix}, f(A, B, C) = \max_{i=1,2,\dots,p} |a_i - 2 \cdot b_i + c_i|. \quad (5)$$

Очевидно, что для точных данных  $\mathbf{X}$  в силу соотношений (4) и (5) для  $i = 1, 2, \dots, m-2$  выполняются условия

$$f(X_i, X_{i+1}, X_{i+2}) = 0. \quad (6)$$

Рассмотрим ситуацию, когда имеется  $n$  одновременно наблюдаемых через равные промежутки времени  $\Delta t$  объектов, движущихся равномерно и прямолинейно по несовпадающим траекториям. Обозначим их измеренные координаты как

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}^j \\ \mathbf{y}^j \\ \mathbf{z}^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1^j, x_2^j, \dots, x_m^j \\ y_1^j, y_2^j, \dots, y_m^j \\ z_1^j, z_2^j, \dots, z_m^j \end{pmatrix} = \mathbf{X}^j = (X_1^j \quad X_2^j \quad \dots \quad X_m^j). \quad (7)$$

В силу сделанных выше предположений для  $i = 1, 2, \dots, m$  и  $j = 1, 2, \dots, n$  выполняются условия

$$X_i^j = X_0^j + i \cdot V^j \cdot \Delta t. \quad (8)$$

В силу приведенных выше выражений для  $j = 1, 2, \dots, n$  и  $i = 1, 2, \dots, m-2$  справедливы соотношения, аналогичные соотношениям (4) и (6):

$$X_i^j - 2 \cdot X_{i+1}^j + X_{i+2}^j = 0, \quad (9)$$

$$f(X_i^j, X_{i+1}^j, X_{i+2}^j) = 0. \quad (10)$$

Рассмотрим задачу

$$\Phi = \max_{i=1,2,\dots,m-2} \left\{ f(X_i^j, X_{i+1}^j, X_{i+2}^j), \right. \\ \left. j_i = 1, 2, \dots, n; k_i = 1, 2, \dots, n; l_i = 1, 2, \dots, n \right\} \rightarrow \min (= \Phi^*). \quad (11)$$

В силу (9) и (10),  $\Phi^* = 0$  и минимум функции  $\Phi$  достигается, в частности, при  $(j_i^* = k_i^* = l_i^*) = 1, 2, \dots, n$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$ , условие  $j_i^* = k_i^* = l_i^*$  не является обязательным и минимум функции  $\Phi$  может достигаться на произвольных  $j_i^*, k_i^*, l_i^*$  при выполнении условий

$$X_0^{j^*} - 2 \cdot X_0^{k^*} + X_0^{l^*} = 0, \quad (12)$$

$$V^{j^*} - 2 \cdot V^{k^*} + V^{l^*} = 0. \quad (13)$$

При наличии ошибок измерений и отклонений закона движения от равномерного и прямолинейного, соотношения (9), (10) для набора координат вида

$$\begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{x}}^j \\ \tilde{\mathbf{y}}^j \\ \tilde{\mathbf{z}}^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{x}_1^j, \tilde{x}_2^j, \dots, \tilde{x}_m^j \\ \tilde{y}_1^j, \tilde{y}_2^j, \dots, \tilde{y}_m^j \\ \tilde{z}_1^j, \tilde{z}_2^j, \dots, \tilde{z}_m^j \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{X}}^j = (\tilde{X}_1^j \quad \tilde{X}_2^j \quad \dots \quad \tilde{X}_m^j) \quad (14)$$

будут выполняться приближенно, в результате чего будет выполняться условие  $\Phi^* > 0$ . Кроме того, минимум функции  $\Phi$  необязательно будет достигаться при выполнении условия  $j = k = l$ .

При малых величинах погрешностей и малых отклонениях закона движения наблюдаемого объекта от равномерного прямолинейного движения, значение  $\Phi$  будет достаточно малым, т. е. найдутся такие индексы  $j_i^*, k_i^*, l_i^*$ , что выполнится условие

$$\Phi < \varepsilon_1, \quad (15)$$

где  $\varepsilon_1$  – некоторое малое число.

Предположим, что соответствие наблюдаемых координат конкретным траекториям неизвестно, т. е. в записях  $X_i^q, \tilde{X}_i^q$  индекс  $i = 1, 2, \dots, m$  по-прежнему привязан к моменту времени  $t_i = t_0 + i \cdot \Delta t$ , а индекс  $q = 1, 2, \dots, n$  означает не номер объекта (номер траектории), а номер набора координат, полученного в момент времени  $t_i$ . Тогда при использовании точных координатных данных движущихся равномерно и прямолинейно объектов в процессе решения задачи (11) найдутся наборы индексов  $j_i^*, k_i^*, l_i^*$ , характеризующие распределение наблюдаемых объектов по траекториям.

При этом можно указать дополнительные условия, которым должны отвечать указанные наборы индексов:

$$k_2^* = j_2^*, l_3^* = k_3^* = j_3^*, \dots, l_{m-2}^* = k_{m-2}^* = j_{m-2}^*, l_{m-1}^* = k_{m-1}^*. \quad (16)$$

Условия (16) гарантируют непрерывность цепочки координат траектории некоторого объекта, наблюдаемого «в скользящем окне», соответствующей моментам времени  $(t_1, t_2, t_3), (t_2, t_3, t_4), \dots, (t_{m-2}, t_{m-1}, t_m)$ .

Таким образом, для объектов, движение которых (в пределах отдельно взятого «скользящего окна») незначительно отличается от равномерного и прямолинейного, а координаты измерены с ошибками, в качестве конструктивного координатного критерия завязки траекторий можно предложить совокупность условий (15) и (16). Анализируя соотношения (11), (15) и (16), можно сделать вывод, что трудоемкость соответствующих вычислений составляет величину  $O(n^3)$ .

### КРИТЕРИЙ ЗАВЯЗКИ ТРАЕКТОРИЙ НА ОСНОВЕ ГИПОТЕЗЫ О МАЛОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕКТОРА СКОРОСТИ ОБЪЕКТА

В качестве второго критерия завязки траекторий используем критерий на основе гипотезы о малости изменения вектора скорости объекта.

Пусть

$$\varphi(A, B) = \max_{i=1,2,\dots,p} |a_i - b_i|, \quad (17)$$

где  $A, B$  определены по формулам (5).

Измеренные в моменты времени  $t_1, \dots, t_m$  скорости объекта с номером  $j$  определены по формуле (18):

$$\begin{pmatrix} \tilde{v}_x^j \\ \tilde{v}_y^j \\ \tilde{v}_z^j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{v}_{X_1}^j, \tilde{v}_{X_2}^j, \dots, \tilde{v}_{X_m}^j \\ \tilde{v}_{Y_1}^j, \tilde{v}_{Y_2}^j, \dots, \tilde{v}_{Y_m}^j \\ \tilde{v}_{Z_1}^j, \tilde{v}_{Z_2}^j, \dots, \tilde{v}_{Z_m}^j \end{pmatrix} = \tilde{\mathbf{V}}^j = (\tilde{V}_1^j \quad \tilde{V}_2^j \quad \dots \quad \tilde{V}_m^j), \quad j = 1, 2, \dots, n. \quad (18)$$

Измерения выполнены с «достаточно малыми» погрешностями, предположение о равномерности и прямолинейности движения объекта не делается. В выражении для скоростей (18), как и в использованном ранее выражении для координат (14), предполагается, что привязка измерений к объектам (траекториям) уже выполнена. Данное предположение упрощает запись выражение «близости» векторов скорости объекта в пределах «скользящего окна», соответствующего моментам времени  $(t_1, t_2), (t_2, t_3), \dots, (t_{m-1}, t_m)$ :

$$\max_{i=1,2,\dots,m-1} \left\{ \varphi(\tilde{\mathbf{V}}_i^j, \tilde{\mathbf{V}}_{i+1}^j) \right\} \leq \varepsilon_2, \quad (19)$$

где  $\varepsilon_2$  – некоторое малое число.

Предположим, что соответствие наблюдаемых координат конкретным траекториям неизвестно. В этом случае, по аналогии с (11) и (15), следует рассмотреть систему неравенств

$$\Psi = \max_{i=1,2,\dots,m-2} \left\{ \varphi(\tilde{\mathbf{V}}_i^{j_i}, \tilde{\mathbf{V}}_{i+1}^{k_i}), \quad \left. \begin{matrix} j_i = 1, 2, \dots, n; \\ k_i = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \right\} \leq \varepsilon_2. \quad (20)$$

Указанная система неравенств может быть выбрана в качестве дополнительного [по отношению к условиям (15) и (16)] конструктивного критерия завязки траекторий. Анализ выражения (20) дает оценку вида  $O(n^3)$  трудоемкости указанного критерия.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе изложенного можно сделать следующие выводы:

1. Совершенствование алгоритмов вторичной обработки радиолокационной информации является одной из приоритетных задач развития РЛС дальнего обнаружения.
2. Предложенные новые критерии завязки траекторий на основе гипотезы о близости закона движения наблюдаемого объекта к равномерному и прямолинейному позволяет и критерий завязки траекторий на основе гипотезы о малости изменения вектора скорости объекта позволяют без потери качества решения задачи завязки траекторий КО, находящихся вблизи друг к другу, снизить трудоемкость перебора вариантов завязки траекторий до величины  $O(n^3)$ , где  $n$  – количество наблюдаемых целей.
3. Вычислительные эксперименты, проведенные на основе модельных данных, показали, что использование предложенных критериев в классических алгоритмах вторичной обработки радиолокационной информации позволит повысить оперативность завязки траекторий КО, одновременно наблюдаемых в ограниченном объеме зоны обзора РЛС.

## Список используемых источников

1. Ворошилина Е.П., Ворошилин Е.П., Тисленко В.И. Алгоритмы завязки траекторий подвижных объектов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2009. – № 2 (20). – С. 48–52.
2. Коновалов А.А. Алгоритм завязки траектории при многопозиционном сопровождении радиолокационной цели // Материалы конференции «Научно-технические и инновационные технологии в решении проблем прогнозирования и предотвращения чрезвычайных ситуаций и их последствий». – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – С. 83–88.
3. Коновалов А.А., Воробьев Е.Н. Алгоритм последовательного обнаружения траектории радиолокационной цели // Материалы международной конференции по мягким вычислениям и измерениям. – СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. – Т. 1. – С. 89–93.
4. Поздняков А.А., Калинин Т.В. Пути совершенствования методов радиолокационного сопровождения целей // Вестник Российского нового университета. Сер.: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2018. – № 4. – С. 35–43.

Я.А. Илюшин\*;  
А.М. Падохин\*

\* Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

## МОНИТОРИНГ УРОВНЯ ВЗВОЛНОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТИ МОРЯ МЕТОДОМ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ РЕФЛЕКТОМЕТРИИ

Представлены результаты численного моделирования эксперимента по интерференционной рефлектометрической альтиметрии уровня взволнованной морской поверхности по сигналам радиомаяков Глобальных Спутниковых Навигационных Систем (ГСНС). Оценены систематические ошибки определения уровня моря, обусловленные морским волнением. Исследовано влияние частичного затенения профиля взволнованной поверхности при наблюдении радиомаяка в направлениях, близких к горизонтали.

Ключевые слова: глобальные навигационные системы, рефлектометрия, интерферометрия, уровень моря, пассивная радиолокация.

### ВВЕДЕНИЕ

По мере роста антропогенной нагрузки на окружающую среду глобальные изменения в природе и климате, связанные с хозяйственной деятельностью человечества, становятся все более и более заметными на фоне естественных природных процессов. Мониторинг глобального уровня поверхности моря всегда имел большое значение для населения прибрежных государств и территорий [1]. В большом числе таких регионов организованы и длительно проводятся местные наблюдения с помощью мареографов, объединенных в глобальные сети мирового масштаба [2, 3]. Однако традиционные мареографические измерения чувствительны не только к изменениям абсолютного уровня водной поверхности, но также и к современным вертикальным движениям земного грунта [4]. Это означает, что указанные измерения требуют соответствующей коррекции. В настоящее время для этих целей мареографы на станциях наблюдения, как правило, объединяются с приемниками глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Перспективной альтернативой традиционным методам измерений являются системы непосредственной регистрации уровня моря методами интерференционной рефлектометрии. С помощью таких систем оказывается возможным одновременная регистрация изменений уровня моря и смещений береговой суши путем непосредственного определения координат приемной станции штатными средствами ГНСС-позиционирования. Интерференционная рефлектометрия сигналов спутников глобальных навигационных систем [5] представляет собой относительно дешевый метод для местных измерений уровня морской поверхности. Метод основан на наблюдении интерференции падающей и отраженной волны и оценке высоты точки наблюдения над уровнем отражающей поверхности по разности фаз падающей и отраженной волн (рис. 1). При известных с высокой точностью координатах радиоприемного устройства это позволяет определять уровень моря в моменты заходов или восходов спутников над горизонтом. Таким образом, системы ГНСС-рефлектометрии оказываются способными практически полностью заменить комбинированные системы на основе мареографов, снабженных приемниками ГНСС как вспомогательными средствами позиционирования. Этот метод, однако, подвержен влиянию ошибок, связанных с мелкомасштабными возмущениями уровня моря, в том числе ветровым волнением. Эти возмущения могут вносить в результаты измерений не только случайные, но и систематические ошибки.

Целью данной работы является исследование влияния морского волнения на точность определения уровня морской поверхности по данным интерференционной ГНСС-

рефлектометрии. Для решения поставленной задачи в настоящем исследовании проводилось компьютерное моделирование отражения от возмущенной морской поверхности сигналов спутниковых навигационных радиомаяков, в первую очередь спутников глобальной навигационной системы GPS на основной рабочей частоте L1 (1575,42 МГц). В спутниковой интерференционной альтиметрии уровня моря интерес представляют отражения электромагнитной волны от поверхности морского волнения в общем случае не малой по сравнению с длиной волны высоты. Кроме того, отражение происходит при малых углах скольжения, т. е. в направлениях, близких к горизонтали. В такой ситуации известные приближенные подходы к расчету отражения работают плохо, причем в значительной степени выражено затенение профиля поверхности. Наиболее надежным подходом в этом случае являются точные решения электромагнитных уравнений для объекта заданной геометрической формы.

Наблюдения в длинных периодах уровня морской поверхности крайне важны для понимания закономерностей его изменения и влияния на все сферы жизни и деятельности в этих районах. Перспективной альтернативой традиционным методам измерений являются системы непосредственной регистрации уровня моря методами интерференционной рефлектометрии. С помощью таких систем оказывается возможным одновременная регистрация изменений уровня моря и смещений береговой суши путем непосредственного определения координат приемной станции штатными средствами ГНСС-позиционирования. Таким образом, системы ГНСС-рефлектометрии оказываются способными практически полностью заменить комбинированные системы на основе мареографов, снабженных приемниками ГНСС как вспомогательными средствами позиционирования.

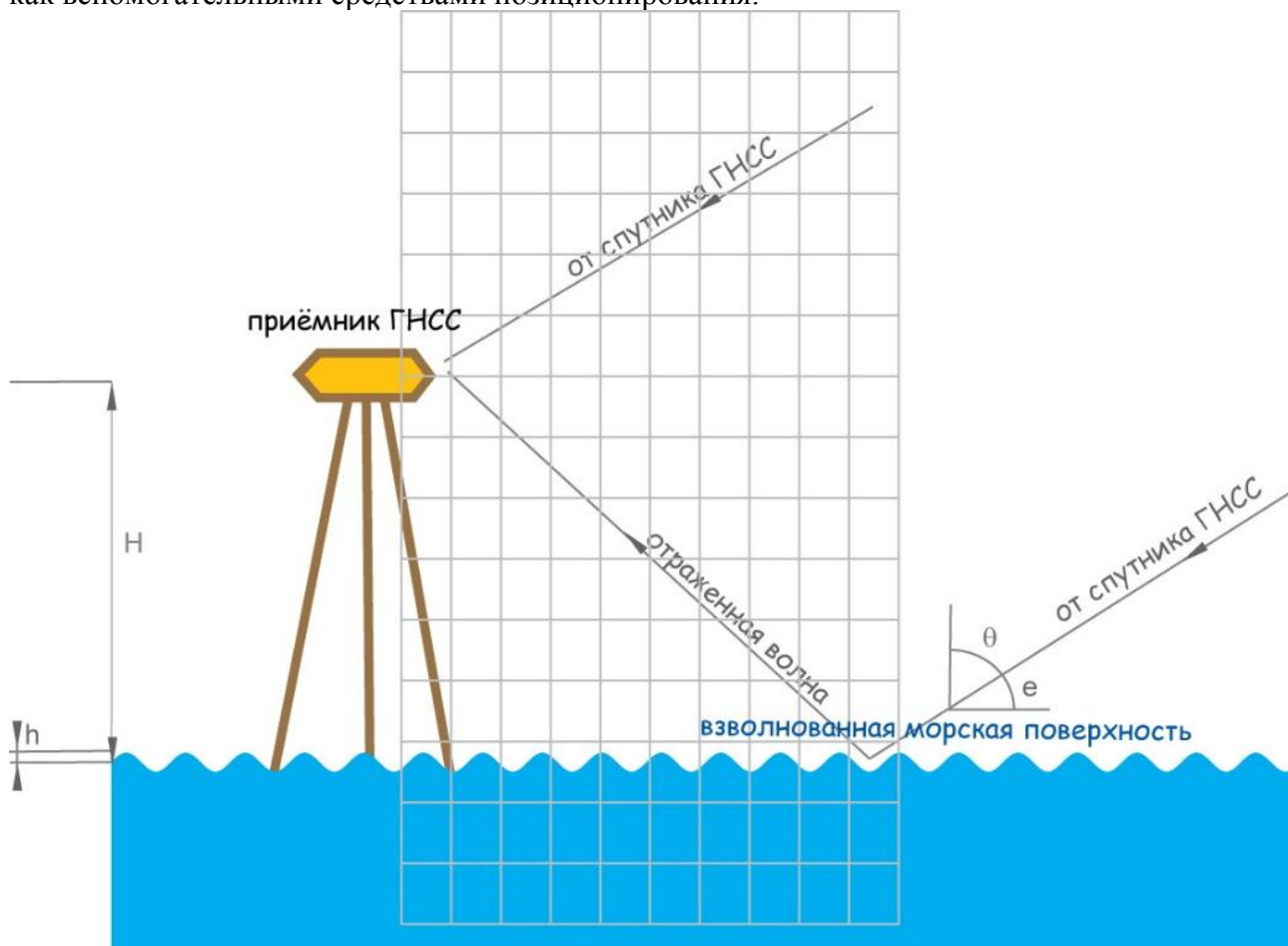


Рис. 1. Схематическое изображение эксперимента по интерференционной рефлектометрии уровня морской поверхности. Область численного расчета поля методом FDTD условно показана сеткой



## ПРИНЦИП ФАЗОВОЙ АЛЬТИМЕТРИИ

На рис. 1 показано схематическое изображение геометрии эксперимента по интерференционной рефлектометрии сигналов ГНСС. Очевидно, что вариации запаздывания отраженного сигнала определяются динамическими изменениями морской поверхности. Соответственно, также будет претерпевать изменения пространственное положение отражения антенны. Математическое соотношение между высотой антенны над поверхностью моря и запаздыванием распространения отраженного сигнала выражается простой формулой

$$\Delta\rho = 2H \sin(e),$$

где  $\rho$  – разность длин фазовых путей прямой и отраженной волн;  
 $H$  – высота приемной антенны над уровнем отражающей (морской) поверхности;  
 $e$  – угол возвышения спутника ГНСС над горизонтом.

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ОТ РЕЛЬЕФНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Численное моделирование отражения электромагнитной волны от шероховатой поверхности в общем случае представляет собой достаточно сложную расчетную задачу. В общем случае, такое моделирование должно также учитывать поляризацию электромагнитной волны, что особенно существенно при наклонном падении.

В спутниковой интерференционной альтиметрии уровня моря интерес представляют отражения электромагнитной волны от поверхности морского волнения в общем случае не малой по сравнению с длиной волны высоты. Кроме того, отражение происходит при малых углах скольжения, т. е. в направлениях, близких к горизонтали. Наиболее надежным подходом в этом случае являются точные решения электромагнитных уравнений для объекта заданной геометрической формы.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Численное моделирование методом FDTD [6] проводилось для периодического гармонического профиля ветрового волнения. Геометрия расчетной области показана на рис. 2.

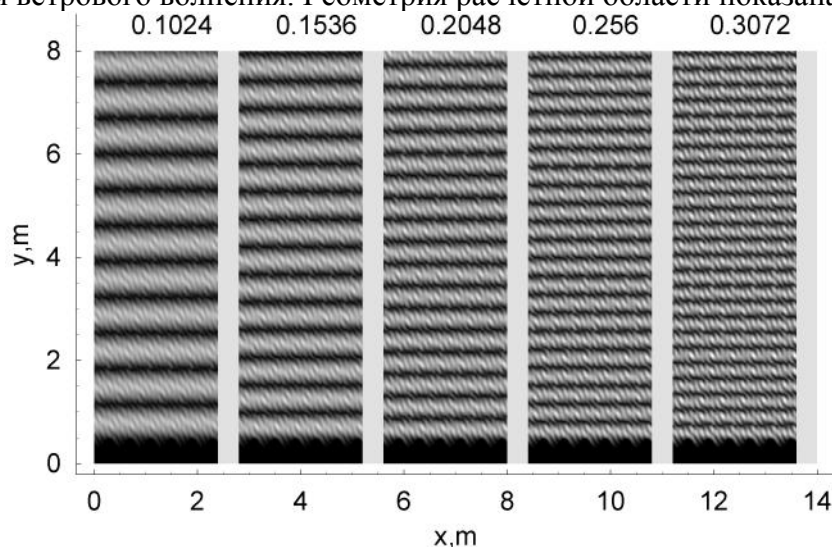


Рис. 2. Интерференционные картины поля спутникового радиомаяка над взволнованной морской поверхностью при различных косинусах зенитного угла спутника

В работе проведено несколько циклов расчетов на высокопроизводительном вычислительном оборудовании с периодом поверхностного волнения 0,4 м для амплитуд вертикального профиля волны в интервале 0–0,2 м и с периодом 0,8 м с диапазоном амплитуд вертикального профиля 0–0,8 м. Интерференционные картины (интенсивность поля в расчетной области) при различных значениях косинуса угла падения волны  $\cos\theta$  показаны на рис. 2. Горизонтальный период морского волнения – 0,8 м, высота профиля волнения – 0,4 м. Можно заметить осложнение интерференционной картины с увеличением высоты профиля волны и косинуса угла падения, связанное с усилением побочных дифракционных максимумов рассеяния электромагнитного излучения на периодическом профиле морской волны.

Соответствующие высотные спектры интерференционных картин приведены на рис. 3. Смещение максимума спектра, являющегося индикатором измеряемого уровня, и систематическая ошибка измерения растет с ростом высоты волнения. Горизонтальный период морского волнения – 0,8 м.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отражение сигналов радиомаяков глобальных навигационных спутниковых систем от взволнованной морской поверхности исследовано путем численного моделирования методом FDTD. Оценена систематическая ошибка определения уровня морской поверхности, связанная с присутствием ветрового волнения на поверхности моря. Показано, что вызываемая ветровым волнением ошибка оценки уровня практически равна высоте ветрового волнения в пределах ограниченной разрешающей способности метода.

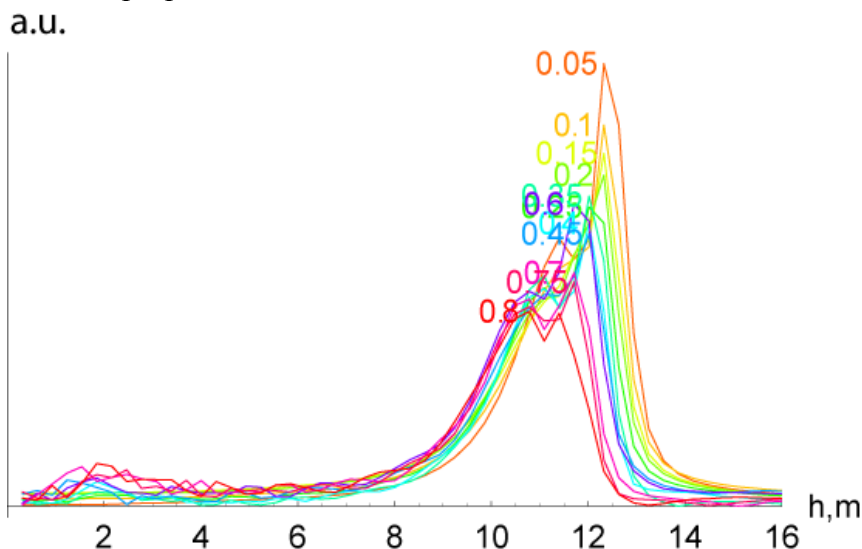


Рис. 3. Высотные спектры интерференционных картин в зависимости от высоты профиля морского волнения

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова [7]. Исследование поддержано грантом Российского Научного Фонда (РНФ) №17-77-20087.

## Список используемых источников

1. Estimates of coastal populations / J. Cohen, C. Small, A. Mellinger, J. Gallup, J. Sachs // Science. – 1997. – Vol. 278, № 5341. – P. 1209–1213.

2. *Schöne T., Schön N., Thaller D.* IGS tide gauge benchmark monitoring pilot project (TIGA): Scientific benefits // *Geodesy*. – 2009. – Vol. 83, №3–4. – P. 249–261.
3. Towards worldwide height system unification using ocean information / P.L. Woodworth, C.W. Hughes, R. J. Bingham, T. Gruber // *Geodetic Science*. – 2012. – Vol. 2, № 4. – P. 302–318.
4. *Larson K.M., Löfgren J.S., Haas R.* Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver // *Advances Space Research*. – 2013. – Vol. 51, № 8. – P. 1301–1310.
5. *Liu W.* Coastal Sea-Level Measurements Based on GNSS-R Phase Altimetry: A Case Study at the Onsala Space Observatory, Sweden // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*. – 2017. – Vol. 55, № 10. – P. 5625.
6. *Yee K.* Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 1966. – Vol. 14. – P. 302–307.
7. Практика суперкомпьютера Ломоносов / В.В. Воеводин, С.А. Жуматий, С.И. Соболев и др. // *Открытые системы*. – 2012. – №. 7. – С. 36–39.

В.П. Лопатин\*;  
В.Ф. Фатеев\*,  
доктор технических наук, профессор

\* Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, п.г.т. Менделеево

## ИССЛЕДОВАНИЕ БИСТАТИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ СИГНАЛОВ GPS/ГЛОНАСС В БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ

Представлена пассивная бистатическая радиолокационная система на основе сигналов ГНСС. Такая система является перспективной для определения высоты приемного устройства, скорости приповерхностного ветра, взволнованности водной поверхности и др. Эксперименты в БЭК показали возможность использования фазовых измерений для определения изменения высоты приемника над отражающей поверхностью. Эксперименты показали высокую точность относительного фазового метода бистатической ГНСС-радиолокации с СКО измерений не более 0,2 см.

Ключевые слова: ГНСС-радиолокация, бистатическая РЛС, GNSS-R, альтиметрия, БЭК.

### ВВЕДЕНИЕ

ГНСС-рефлектометрия (GNSS-Reflectometry) – это метод пассивной бистатической радиолокации, основанный на использовании спутников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в качестве передатчиков. В настоящее время ГНСС-рефлектометрия используется для определения уровня воды, степени взволнованности водной поверхности, скорости приповерхностного ветра, солености воды, влажности почвы, характеристик льда и др. Аппаратура бистатической радиолокации может быть установлена, как на океанографических платформах и наземных станциях, так на самолетах и спутниках [1–3].

Принцип работы бистатической системы на основе сигналов ГНСС основывается на приеме прямых сигналов навигационных космических аппаратов (НКА) слаборазнесенной антенной, направленной в «зенит», и отраженных сигналов – с помощью антенны, направленной в «надир». Отражение сигналов от водной поверхности в окрестности точки зеркального отражения происходит в соответствии с законом «угол падения равен углу отражения» (рис. 1). Чтобы решить задачу определения высоты до отражающей поверхности необходимо определить разность времени распространения прямого и отраженного сигналов, координаты и скорости приемника и НКА. Кроме того, необходимо знать мощность принимаемого сигнала, модель отражающей поверхности, тропосферную и ионосферную задержки [4–6].

Бистатическая система радиовысотометрии, использующая сигналы ГНСС, имеет неоспоримое преимущество перед классической моностатической альтиметрией за счет большого количества одновременно обрабатываемых профилей значений высот вдоль подспутниковой трассы на поверхности воды. Количество этих профилей может равняться количеству одновременно видимых спутников ГНСС и достигать 20–30. Таким образом, повышается пространственный охват акватории за один сеанс измерений [7].

В настоящее время используются несколько методов бистатической радиолокации на основе сигналов ГНСС.

Ширина полосы сигналов ГНСС (1–50 МГц) намного уже по сравнению с традиционными альтиметрами (~300 МГц), что подразумевает более низкую точность одного измерения. Теоретические исследования показали, что точность бистатической кодовой ГНСС-радиовысотометрии при интервале измерений 1 с может варьироваться от 0,2 до 3 м, в зависимости от расположения НКА и алгоритма обработки [8, 9].

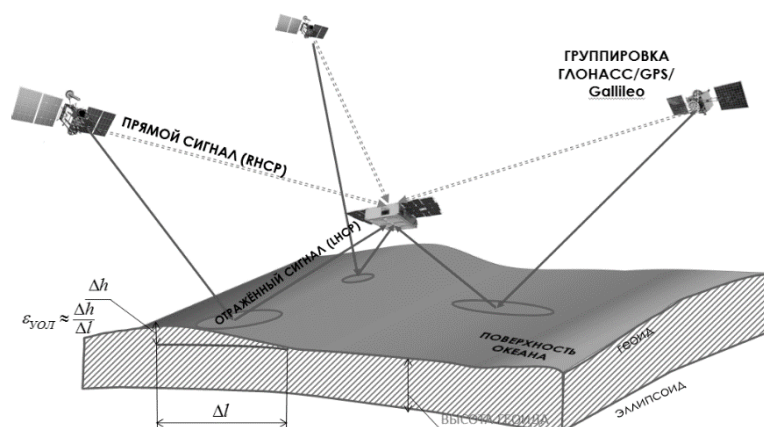


Рис. 1. Принцип работы бистатической системы на основе сигналов ГНСС

Для проведения экспериментов по определению максимально достижимой точности ГНСС-рефлектометрии была выбрана безэховая экранированная камера (БЭК), в которой расположено оборудование, имеющее широкие возможности в части формирования навигационного поля ГНСС [10].

Применение методов полунатурного моделирования в условиях БЭК позволяет:

- минимизировать переотражения радиосигналов от рядом стоящих объектов;
- сформировать пространственное навигационное поле сигналов ГНСС;
- изменять уровень мощности сигналов;
- выполнять измерения как на кодовой, так и на фазовой задержке сигнала.

Эксперименты в БЭК обладают рядом особенностей. Во-первых, рабочая зона в БЭК определяется ее габаритными размерами и характеристиками радиопоглощающего материала. Во-вторых, предельная длительность воспроизведения навигационных сигналов зависит от моделируемой динамики объекта-носителя НАП.

Для проведения экспериментов по ГНСС-рефлектометрии во ФГУП «ВНИИФТРИ» создан комплекс технических средств (КТС) для имитации пространственного навигационного поля ГНСС в состав которого входят:

- безэховая экранированная камера;
- многоканальный имитатор сигналов ГНСС;
- генераторы помех;
- антенно-фидерная система;
- средства калибровки.

Созданный КТС, формирующий пространственно-распределенную систему навигационных сигналов ГНСС с нормированными характеристиками, позволил провести эксперимент с полной имитацией фазовой ГНСС-рефлектометрии.

## ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

При проведении эксперимента использовались две антенны. Первая антенна с правой круговой поляризацией ориентировалась в «зенит» и принимала прямой навигационный сигнал, а вторая антенна с левой круговой поляризацией ориентировалась в «надир» и принимала сигнал, отраженный от фольгированного покрытия (рис. 2). В эксперименте использовалось штатное приемное устройство, которое имеет возможности изменения настроек. Настройка комплекса такова, что в объеме камеры без отражающего покрытия прямой сигнал, принимаемый спиральной антенной с левой круговой поляризацией, имел низкий уровень. Поэтому можно с уверенностью сказать, что спиральная антенна принимает только значительный по мощности сигнал, отраженный от фольгированного покрытия.

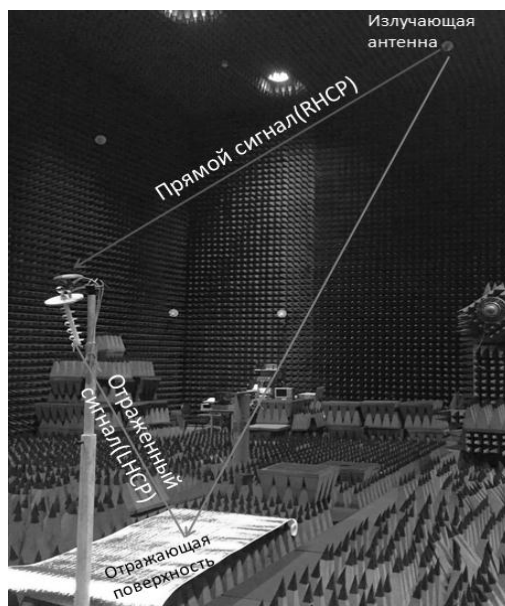


Рис. 2. Схема эксперимента в БЭК

Ввиду высоких метрологических характеристик КТС и БЭК было принято решение проверить точность относительного фазового метода ГНСС-рефлектометрии. В эксперименте можно было изменять шероховатость отражающей поверхности, углы возвышения НКА и мощность излучаемых сигналов.

На рис. 3 представлены результаты измерений разностей псевдодальностей и псевдофаз прямого и отраженного сигналов GPS при статическом расположении антенн. После 360-й секунды уровень мощности сигнала был снижен на 10 дБ, вследствие чего СКО измерений увеличилось в три раза, как для кодовых, так и для фазовых измерений.

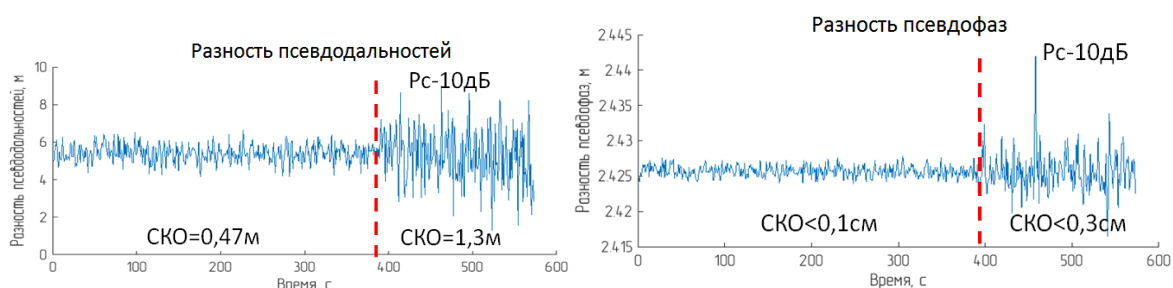


Рис. 3. Результаты эксперимента

Ровная фольгированная пленка является отражающим покрытием, удовлетворяющим критерию Релея

$$\frac{8\sigma \cos \theta}{\lambda} \ll 1,$$

где  $\sigma$  — средняя высота неровностей;  
 $\lambda$  — длина волны сигнала ГНСС;  
 $\theta$  — угол падения сигнала.

Если выполняется критерий Релея, то поверхность считается гладкой и преобладает механизм зеркального отражения.

Из рис. 3 видно, что фазовые измерения имеют более высокую точность, нежели кодовые, но такие измерения неоднозначны из-за неопределенности начального целого числа периодов фазового сдвига. Но если необходимо определить изменение (приращение) высоты до отражающей поверхности, то фазовые измерения могут быть использованы как более точные.

Изменение высоты пропорционально изменению разности псевдофаз:

$$\Delta h = \frac{\Delta\varphi_i}{2\sin\theta_i} - \frac{\Delta\varphi_j}{2\sin\theta_j},$$

где  $\Delta\varphi$  – разность псевдофаз прямого и отраженного сигналов.

Такое равенство возможно, если при измерениях не происходит срыва фазы и высота расположения приемного устройства не более нескольких километров.

Во втором эксперименте антенны, принимающие прямой и отраженный сигналы, располагались на мачте с переменной высотой. На рис. 4 представлены полученные результаты измерения разности псевдофаз прямого и отраженного сигналов при увеличении высоты мачты. СКО измерений составило не более 0,2 см.

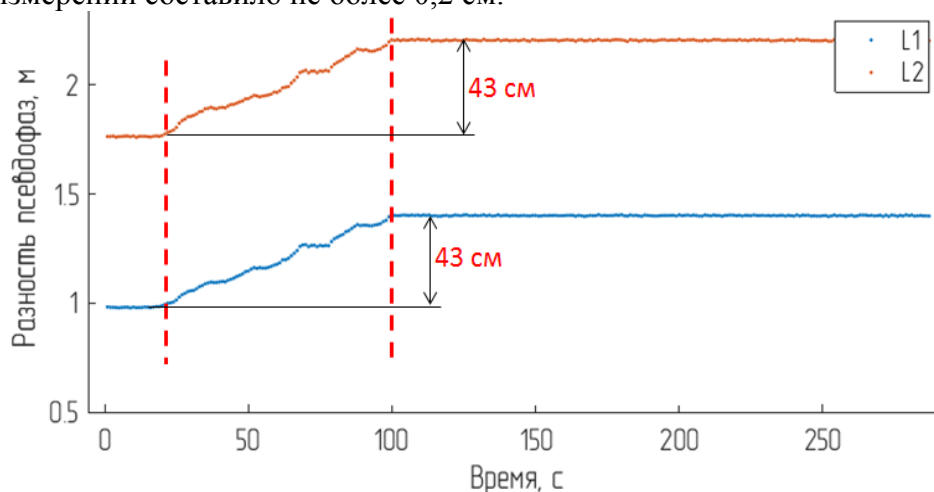


Рис. 4. Результаты эксперимента при увеличении высоты мачты

На рис. 5 представлены результаты при опускании и дальнейшем поднятии мачты.

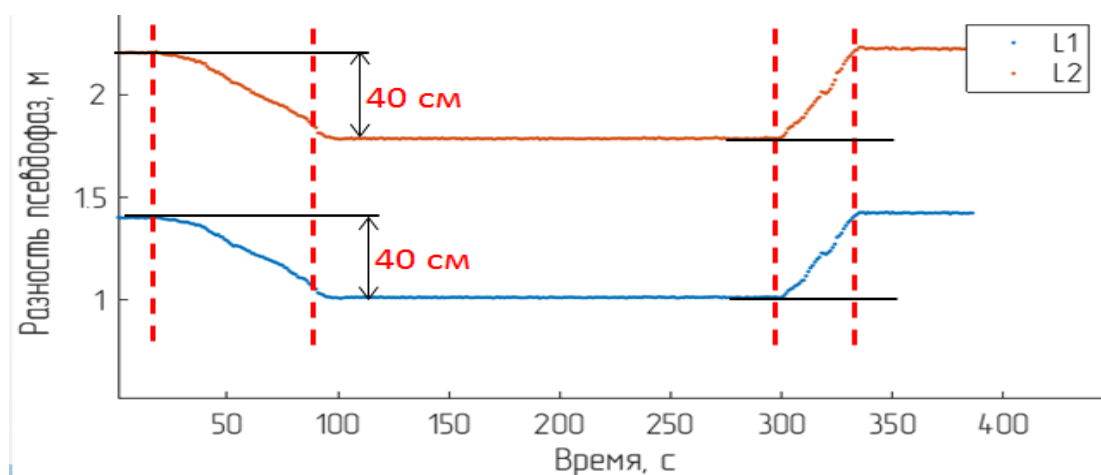


Рис. 5. Результаты эксперимента при уменьшении и дальнейшем увеличении высоты мачты

Видно, что даже при быстром изменении высоты, начиная с 300-й секунды (40 см за 30 с), не происходило срывов фаз. Антенна, принимающая отраженные сигналы, не оборудована малошумящим усилителем, поэтому отношение мощности прямого и отраженного сигналов к спектральной мощности шума составило 49 и 40 дБГц. СКО измерений составило не более 0,2 см.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ГНСС-рефлектометрия является перспективным подходом для определения высоты приемного устройства, скорости приповерхностного ветра, взволнованности водной поверхно-

сти. При большом числе одновременно принимаемых навигационных сигналов одна бортовая система ГНСС-рефлектометрии способна дать намного больше измерительной информации, чем активный альтиметр. Избыточность измерений является необходимым условием для решения задачи определения высот водной поверхностью с высокой точностью.

Успешные эксперименты в БЭК показали возможность использования фазовых измерений для определения изменения высоты приемника над отражающей поверхностью. Эксперименты показали высокую точность относительного фазового метода ГНСС-рефлектометрии с СКО измерений не более 0,2 см. Этот факт делает возможным использование реальных фазовых измерений для определения изменения уровня отражающей водной поверхности. Но определение высоты с использованием фазовых измерений является сложной задачей из-за срывов фазы и задержек в атмосфере.

Дальнейшие эксперименты в БЭК позволят определить оптимальные углы возвышения НКА, допустимые уровни шероховатости и методы обработки сигналов, при которых точность фазовых определений высоты будет максимальной.

### Список используемых источников

1. Малый космический аппарат обзора морской поверхности с использованием сигналов спутниковых радионавигационных систем / И.В. Сахно, Е.А. Ткачев, Д.А. Гаврилов и др. // Известия вузов. Приборостроение. – 2009. – № 4. – С. 34–39.
2. *Awange J.* GNSS Reflectometry and Applications. GNSS Environmental Sensing // Environmental Science and Engineering. – Cham: Springer, 2018. – P. 173–182.
3. *Jin S., Komjathy S.* GNSS reflectometry and remote sensing: new objectives and results // Advances in Space Research. – 2010. – № 46(2). – С. 111–117.
4. *Zavorotny V.U., Voronovich A.G.* Scattering of GPS signals from the ocean with wind remote sensing application // IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing. – 2000. – № 38. – P. 951–964.
5. Detection and processing of bistatically reflected GPS signals from low Earth orbit for the purpose of ocean remote sensing / S.T. Gleason, S. Hodgart, S. Yiping, C.P. Gommenginger, S. Mackin, M. Adjrard, M. Unwin // IEEE Transactions Geoscience Remote Sensing. – 2005. – № 43. – P. 1229–1241.
6. *Jin S., Cardellach E., Xie F.* GNSS Remote Sensing. – 2013. – P. 175–214.
7. *Фатеев В.Ф., Давлатов Р.А., Лопатин В.П.* Навигационная аппаратура ГНСС на борту наноспутника: возможности применения // Известия вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61, № 5. – С. 437–445.
8. GNSS-R altimetry performance analysis for the GEROS Experiment on board the International Space Station / A. Camps, H. Park, I. Sekulic, J.M. Rius // Sensors. – 2016. – № 17(7). – P. 1583–1601.
9. Analysis of GNSS-R altimetry for mapping ocean mesoscale sea surface heights using high-resolution model simulations / Z. Li, C. Zuffada, S.T. Lowe, T. Lee, V. Zlotnicki // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2016. – № 9(10). – P. 4631–4642.
10. Аппаратура имитации пространственного навигационного поля глобальных навигационных спутниковых систем. Системы связи и навигации / А.А. Фролов, А.М. Каверин, В.Б. Пудловский и др. // Сборник тезисов под ред. В.Ф. Шабанова. – СПб.: НПП «Радиосвязь», 2017. – С. 80–82.
11. CYGNSS (Cyclone Global Navigation Satellite System). – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cygnss> (дата обращения: 28.11.2019).



А.В. Мелешко\*,

кандидат технических наук;

А.Ю. Онуфрей\*\*,

доктор технических наук, профессор;

В.В. Пятков\*\*,

доктор технических наук, профессор

\* Научно-производственное предприятие «Радар ммс», г. Санкт-Петербург;

\*\* Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО МНОГОМЕРНОГО СЛЕДЯЩЕГО ИЗМЕРИТЕЛЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА

В статье рассмотрены следящие радиолокационные системы по дальности и угловым координатам. Приведен синтез цифровых дискриминаторов в составе систем измерения дальности и угловых координат. Предложен цифровой временной дискриминатор с каналом компенсации динамической ошибки слежения.

Ключевые слова: радиолокационная станция, фазированная антенная решетка, стробирование, дискриминатор, измерение координат.

### ВВЕДЕНИЕ

В радиолокационных станциях (РЛС) с фазированными антенными решетками (ФАР) и моноимпульсным методом измерения координат цели на прием используется группа из четырех парциальных лучей (диаграмм направленности), формируемая с помощью определенного объединения в группы излучателей (квадранты) фазированной антенной решетки (рис. 1) [1, 2].

В режиме сопровождения цели приемники суммарного и разностного каналов стробируются по времени (открываются в начале строба сопровождения и закрываются в его окончании так, что центр строба совпадает с моментом ожидаемого прихода сигнала от цели, соответствующего экстраполированной координаты дальности  $r_3$ ). В направлении экстраполированных угловых координат  $u_3$  и  $v_3$  выставляется равносигнальное направление (РСН) группы парциальных лучей (ожидаемое направление на цель).

Отраженный от цели сигнал преобразуется в четырех блоках квадрантов (или облучателей) антенно-фидерной системы (АФС) РЛС в соответствующие выходные сигналы  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$  и  $u_4(t)$ , которые поступают на суммарно-разностный преобразователь (СРП) для того, чтобы создать суммарный  $u_{\Sigma}(t)$  и два разностных сигнала  $u_{\Delta u}(t)$  и  $u_{\Delta v}(t)$  на высокой частоте (рис. 1).

Данные сигналы формируются из выходных сигналов блоков квадрантов в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma}(t) &= u_1(t) + u_2(t) + u_3(t) + u_4(t); \\ u_{\Delta u}(t) &= [u_1(t) + u_3(t)] - [u_2(t) + u_4(t)]; \\ u_{\Delta v}(t) &= [u_1(t) + u_2(t)] - [u_3(t) + u_4(t)]. \end{aligned} \quad (1)$$

После суммарно-разностного преобразователя сигналы  $u_{\Sigma}(t)$ ,  $u_{\Delta u}(t)$  и  $u_{\Delta v}(t)$  поступают на соответствующие три идентичных приемника. С выходов приемников сигналы подаются на соответствующие усилители промежуточной частоты, выходы которых подключены к АЦП единого сигнального процессора (СП) или СП каждого канала [3]. В каждом канале осуществляются операции стробирования, дискретизации по времени и квантования по уровню в АЦП сигнального процессора входных непрерывных сигналов промежуточной частоты. Таким образом, с помощью указанных операций формирования цифровых кодов сиг-

налов от целей в суммарном и разностных каналах реализуется цифровой многомерный дискриминатор следащего измерителя координат цели, на выходе которого и формируются три составляющие ( $u_{\Delta r}$ ,  $u_{\Delta u}$  и  $u_{\Delta v}$ ) вектора сигнала:

$$\mathbf{u}_{\Delta}(n) = [u_{\Delta r}(n), u_{\Delta u}(n, \Delta u, \Delta v), u_{\Delta v}(n, \Delta u, \Delta v)]^T, \quad (2)$$

зависящие от ошибок слежения  $\Delta r(n)$ ,  $\Delta u(n)$  и  $\Delta v(n)$  по координате дальности  $r$  и каждой из угловых координат  $u$ ,  $v$ .

Момент времени  $n=t/T_d$ ;  $t$  – текущее время, а  $T_d$  – период дискретизации по времени.

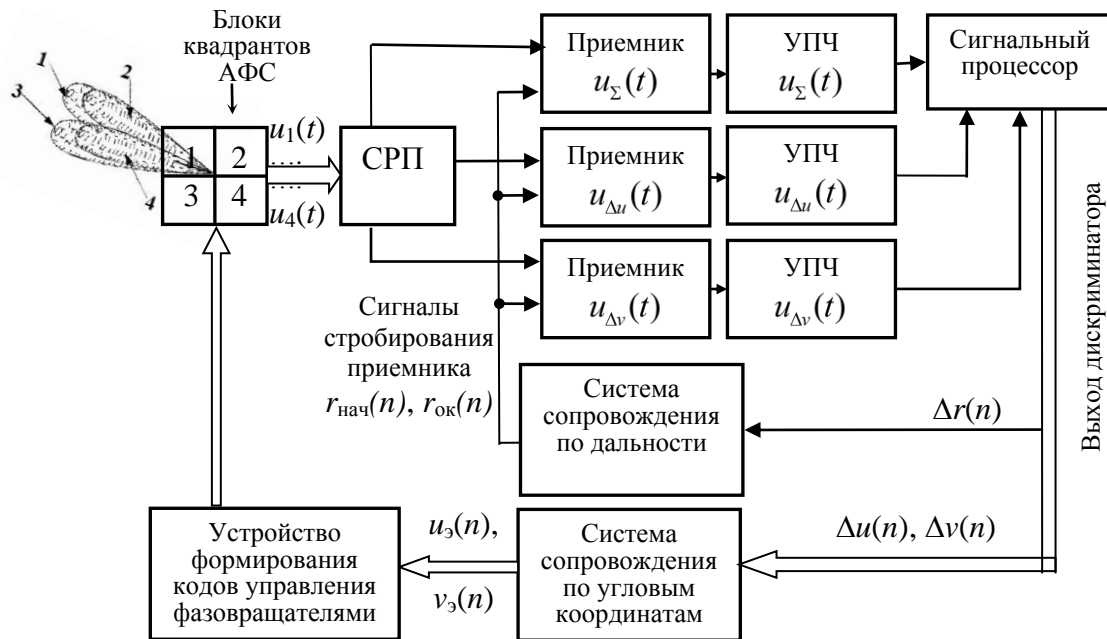


Рис. 1. Трехканальная следащая система измерения координат в моноимпульсной РЛС

Учитывая, что цифровые временной и угловой дискриминаторы реализуются с помощью сигнального процессора, актуальным является задача синтез структуры оптимального многомерного цифрового радиолокационного дискриминатора в составе сигнального процессора (рис. 1).

## МОДЕЛЬ НАБЛЮДЕНИЯ ВХОДНОГО СИГНАЛА

На одном сигнальном процессоре можно реализовать алгоритм формирования невязок  $u_{\Delta r}(t)$  (по информации сигнала суммарного канала  $u_{\Sigma}(t)$ ) и двух сигналов разностных каналов  $u_{\Delta u}(t)$  и  $u_{\Delta v}(t)$ . В простейшем случае невязка  $u_{\Delta r}(t)$  характеризуется разностью  $u_{\Sigma}(t) - u_3(t)$ , где  $u_3(t)$  – это сигнал соответствующий экстраполированной координате дальности до цели.

При условии наличия цели и аддитивного характера вносимых измерительных шумов измерений представим входной сигнал АЦП  $\mathbf{u}_{\Delta}(t)$  в векторном виде аддитивной смесью полезного сигнала  $\mathbf{S}(t, \mathbf{z}(t))$  и измерительного шума (помехи)  $\mathbf{f}(t)$ :

$$\mathbf{u}_{\Delta}(t) = \mathbf{S}(t, \mathbf{z}(t)) + \mathbf{f}(t),$$

где  $\mathbf{u}_{\Delta}(t)$  – входной сигнал АЦП,  $\mathbf{u}_{\Delta}(t) = [u_{\Delta r}(t) \ u_{\Delta u}(t) \ u_{\Delta v}(t)]^T$ ;

$\mathbf{S}_{uv}(t, \mathbf{z}(t))$  – полезный сигнал,  $\mathbf{S}_{uv}(t, \mathbf{z}(t)) = [S_r(t, \mathbf{z}(t)) \ S_u(t, \mathbf{z}(t)) \ S_v(t, \mathbf{z}(t))]^T$ ;

$\mathbf{f}(t)$  – измерительный шум (помеха),  $\mathbf{f}(t) = [f_r(t) \ f_u(t) \ f_v(t)]^T$ ;

$\mathbf{z}(t)$  – вектор искомых параметров, в частности дальности  $r(t)$  и угловых координат цели  $u(t)$  и  $v(t)$ ,  $\mathbf{z}(t) = [r(t) \ u(t) \ v(t)]^T \subset \Omega$ .

## СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОГО ЦИФРОВОГО ДИСКРИМИНАТОРА

В результате обработки принятых радиолокационных сигналов в сигнальном процессоре в дискретные моменты времени  $n$  определяются составляющие  $r(n), u(n), v(n)$  вектора измеренных координат  $\mathbf{z}(n) = [r(n), u(n), v(n)]^T$  и вектора ошибок слежения (2). Каждая из составляющих вектора  $\mathbf{u}_\Delta(n)$  обрабатывается соответствующей следящей системой.

Задав статистические свойства сигналов и помех, формируемых на входах и выходах АЦП, можно синтезировать оптимальную структуру дискриминатора на основе теории статистических решений аналогично, как показано в [4].

Используя априорную информацию о плотности вероятностей сигналов  $\mathbf{S}(t, \mathbf{z}(t))$  и  $\mathbf{f}(t)$ , воспользовавшись теоремой свертки [5], можно получить выражение для плотности вероятности  $\omega(\mathbf{u}_\Delta, \mathbf{z})$  параметров сигнала  $\mathbf{u}_\Delta(t)$ , принадлежащего множеству значений  $U(\mathbf{u}_\Delta(t) \subset U)$ . Оценки  $\hat{\mathbf{z}}(t)$  определяются, исходя из заданных решающей функции  $\gamma(\mathbf{u}_\Delta)$  и функции штрафов  $c(\mathbf{z}, \gamma)$ . Функцию  $\gamma(\mathbf{u}_\Delta)$  минимизирует средний риск:

$$\delta = \int \int_{U \Omega} c(\mathbf{z}, \gamma(\mathbf{u}_\Delta)) \omega(\mathbf{u}_\Delta, \mathbf{z}) d\mathbf{u}_\Delta d\mathbf{z} = \int \int_{U \Omega} c(\mathbf{z}, \gamma(\mathbf{u}_\Delta)) \omega(\mathbf{u}_\Delta / \mathbf{z}) \omega(\mathbf{z}) d\mathbf{u}_\Delta d\mathbf{z}.$$

Здесь в выражении присутствуют априорная плотность вероятности  $\omega(\mathbf{z})$  и функция правдоподобия  $\omega(\mathbf{u}_\Delta / \mathbf{z})$ .

На выходе АЦП в результате пространственной и временной дискретизаций сигнала  $\mathbf{u}_\Delta(t)$  будет фигурировать дискретная последовательность  $\mathbf{L}(n)$ . Ввиду редукции выборочного пространства  $U \Rightarrow \tilde{U}$  на выходе АЦП будет наблюдаться дискретное многомерное распределение  $\tilde{\omega}(\mathbf{L}, \mathbf{z})$ . На практике такое распределение описывается дискретной марковской цепью с  $r$  состояниями и связностью  $\eta$ . Здесь  $r$  – количество комбинаций двоичного кода на выходе АЦП.

С учетом временной корреляции процесса  $\mathbf{L}(n)$ , используем односвязные марковские цепи [6], широко применяемые на практике в аналогичных системах. При этом интервалы корреляции  $\tau_k$  наблюдаемого сигнала  $\mathbf{u}_\Delta(t)$  соизмеримы с интервалами  $T_d$  его временных отсчетов, а импульсы временной дискретизации  $\tau_d \ll T_d$ .

В результате редукции выборочного пространства  $U \Rightarrow \tilde{U}$  формируется распределение  $\tilde{\omega}(\mathbf{L} / \mathbf{z})$ , которое обеспечивает допустимое значение среднего риска  $\delta$ . В отдельный момент времени  $n$  на выходе АЦП имеется неразделимая совокупность сигналов в суммарном и разностных каналах  $\mathbf{L}(n)$ . Каждый из двух компонент реализации  $\mathbf{L}(n)$  может принимать  $r$  значений.

Совместное распределение вероятностей выборочного вектора  $\Lambda = (\mathbf{L}(0), \mathbf{L}(1), \mathbf{L}(2), \dots, \mathbf{L}(n-1))^T$  аппроксимируемой для простоты односвязной цепью Маркова последовательности  $\mathbf{L}(i), i = 0, 1, 2, \dots, n-1$ , каждая из которых может принимать  $r$  значений  $L_1, L_2, \dots, L_r$ , представляется как [4]:

$$\omega(\Lambda) = \tilde{\omega}(\mathbf{L}(0)) \cdot \tilde{\omega}(\mathbf{L}(1) / \mathbf{L}(0)) \cdot \tilde{\omega}(\mathbf{L}(2) / \mathbf{L}(1)) \cdot \dots \cdot \tilde{\omega}(\mathbf{L}(n-1) / \mathbf{L}(n-2)) = \prod_{\alpha=1}^r \left[ p_{0\alpha}^{d_\alpha} \prod_{n=1}^{k-1} \prod_{\beta=1}^r p_{\alpha\beta}^{d_{\alpha\beta}^{(n)}}(n) \right].$$

В выражении обозначены:

- вероятность начального состояния  $p_{0\alpha}$ ;

- индикатор начального состояния  $d_\alpha$  (при этом  $d_\alpha = 1$ , если  $L(0) = L_\alpha$  и  $d_\alpha = 0$ , если  $L(0) \neq L_\alpha$  ( $\sum_{\alpha=1}^r d_\alpha(0) = 1$ ));
- вероятность  $p_{\alpha\beta}(n)$  того, что  $L(n-1) = L_\alpha$ , а  $L(n) = L_\beta$ ;
- индикатор  $d_{\alpha\beta}(n)$  перехода из  $L_\alpha$  в  $L_\beta$  ( $d_{\alpha\beta}(n) = 1$  при  $L(n-1) = L_\alpha$ ,  $L(n) = L_\beta$  и  $d_{\alpha\beta}(n) = 0$  при  $L(n-1) = L_\alpha$  и  $L(n) \neq L_\beta$ ).

Для многомерных распределений полезного сигнала  $\omega(\Lambda/\mathbf{z})$  и помехи  $\omega_\Pi(\Lambda)$  имеют место соответствующие вероятности  $p_{0\alpha}$ ,  $p_{\alpha\beta}(n/\mathbf{z})$  и  $p_{0\alpha\Pi}$ ,  $p_{\alpha\beta\Pi}(n)$ . Применим широко используемые на практике квадратичную функцию штрафов  $c(\mathbf{z}, \hat{\mathbf{z}})$ , равномерное распределение  $\omega(\mathbf{z})$  и симметричное апостериорное распределение  $\omega(\mathbf{z}/\Lambda)$ . Тогда решающая функция  $\gamma(L)$  будет определяться из следующего уравнения правдоподобия [4, 5]:

$$\omega(\Lambda, \hat{\mathbf{z}}) = \max_{\mathbf{z} \in \Omega} \omega(\Lambda/\mathbf{z}).$$

Процедуре измерения предшествует результат обнаружения сигнала на фоне помех. Операция обнаружения реализуется с помощью условного коэффициента правдоподобия [4]:

$$K(\Lambda/\mathbf{z}) = \frac{\omega(\Lambda/\mathbf{z})}{\omega_\Pi(\Lambda)} = \frac{\prod_{\alpha=1}^r \left[ p_{0\alpha}^{d_\alpha} \prod_{n=1}^{k-1} \prod_{\beta=1}^r p_{\alpha\beta}^{d_{\alpha\beta}(n)}(n/\mathbf{z}) \right]}{\prod_{\alpha=1}^r \left[ p_{0\alpha\Pi}^{d_\alpha} \prod_{n=1}^{k-1} \prod_{\beta=1}^r p_{\alpha\beta\Pi}^{d_{\alpha\beta}(n)}(n) \right]}. \quad (3)$$

Используем этот коэффициент для получения искомых оценок  $\hat{\mathbf{z}}$ . Условным коэффициентом правдоподобия  $K(\Lambda/\mathbf{z})$  мы заменили функцию правдоподобия  $\omega(\Lambda/\mathbf{z})$  ввиду того, что

$$\omega(\Lambda/\mathbf{z}) = \omega_\Pi(\Lambda) \cdot \omega(\Lambda/\mathbf{z}) / \omega_\Pi(\Lambda) = \omega_\Pi(\Lambda) \cdot K(\Lambda/\mathbf{z}).$$

Закон распределения помехи  $\omega_\Pi(\Lambda)$  не зависит от параметров  $\mathbf{z}$ , что приводит к совпадению точек максимумов  $\omega(\Lambda/\mathbf{z})$  и  $K(\Lambda/\mathbf{z})$  [4].

Произведя логарифмирование (3), получим:

$$\ln K(\Lambda/\mathbf{z}) = \sum_{\alpha=1}^r d_\alpha w_\alpha(0) + \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{\alpha,\beta} d_{\alpha\beta}(n) \cdot w_{\alpha\beta}(n/\mathbf{z}).$$

Здесь  $w_\alpha(0) = \ln(p_{0\alpha}(\mathbf{z})/p_{0\alpha\Pi})$ ,  $w_{\alpha\beta}(n) = \ln(p_{\alpha\beta}(n/\mathbf{z})/p_{\alpha\beta\Pi}(n))$  являются весовыми коэффициентами.

Фильтры сглаживания следящих систем конструируются так, чтобы ошибка слежения сводилась к нулю. Следовательно, вектор  $\mathbf{z}_0$  экстраполированных координат будет попадать в область близкую к максимуму коэффициента правдоподобия  $K(\Lambda/\mathbf{z})$ .

Разложим в окрестности точки  $\mathbf{z}_0$  логарифм  $\ln K(\Lambda/\mathbf{z})$  в ряд Тейлора. Ограничивая разложение слагаемым со второй производной, будем иметь следующее выражение:

$$\begin{aligned} \ln K(\Lambda/\mathbf{z}) \approx \ln K(\Lambda/\mathbf{z}) \Big|_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_0} + \sum_{i=1}^2 (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_{0i}) \frac{\partial \ln K(\Lambda/\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}_i} \Big|_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_0} + \\ + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (\mathbf{z}_i - \mathbf{z}_{0i})(\mathbf{z}_j - \mathbf{z}_{0j}) \frac{\partial^2 \ln K(\Lambda/\mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}_i \partial \mathbf{z}_j} \Big|_{\mathbf{z}=\mathbf{z}_0}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для упрощения записи обозначим производные  $\ln K(\Lambda / \mathbf{z})$  следующим образом:

$$A_{\alpha i} = \left. \frac{\partial \ln K(\Lambda / \mathbf{z})}{\partial z_i} \right|_{z=z_0}, \quad B_{\alpha i} = \left. \frac{\partial^2 \ln K(\Lambda / \mathbf{z})}{\partial z_i \partial z_j} \right|_{z=z_0}. \quad (5)$$

Подставим два предыдущих выражения в уравнение:

$$\frac{\partial \ln K(\Lambda / \mathbf{z})}{\partial \mathbf{z}} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \sum_{n=0}^{k-1} \sum_{\alpha\beta}^r d_{\alpha\beta}(n) w_{\alpha\beta}(n / \mathbf{z}) = 0.$$

Получим в матричном виде систему уравнений:

$$\mathbf{A}_3 + \mathbf{B}_3(\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}_3) = \begin{bmatrix} A_{31} \\ A_{32} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{311} & B_{312} \\ B_{321} & B_{322} \end{bmatrix} (\hat{\mathbf{z}} - \mathbf{z}_3) = 0. \quad (6)$$

Решив данную систему уравнений относительно  $\hat{\mathbf{z}}$ , можем получить уравнение оптимального дискриминатора:

$$\hat{\mathbf{z}} = \mathbf{z}_3 - \mathbf{B}_3^{-1} \mathbf{A}_3, \quad (7)$$

где  $\mathbf{B}_3^{-1}$  – является матрицей, обратной  $\mathbf{B}_3$  в выражении (6).

Второе слагаемое и будет соответствовать искомому вектору  $\mathbf{u}_\Delta(n) = [u_{\Delta r}(n), u_{\Delta u}(n, \Delta u, \Delta v), u_{\Delta v}(n, \Delta u, \Delta v)]^T$   $\mathbf{z}(n) = [r(n), u(n), v(n)]^T$ , так как в выражении (7) при условии линейной характеристики дискриминатора производится нормировка выходных сигналов дискриминатора (приведение их к входным сигналам  $\Delta r$ ,  $\Delta u$  и  $\Delta v$ ).

В режиме сопровождения для улучшения селективных свойств РЛС производится стробирование приемников по времени (дальности). Например, в [1] такой принцип стробирования поясняется рис. 2.

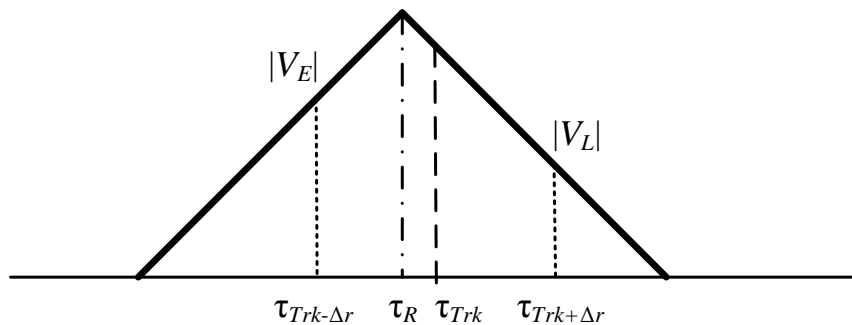


Рис. 2. Стробирование сигнала от цели

В частности, сигнал ошибки слежения по дальности  $\Delta r$  формируется некоторой вариацией уравнения:

$$\Delta r = K_r \frac{|V_L| - |V_E|}{|V_L| + |V_E|},$$

где  $|V_E|$  – амплитуда сигнала в начале строба сопровождения;

$|V_L|$  – амплитуда сигнала в конце строба сопровождения;

$K_r$  – коэффициент преобразования.

Значения амплитуд сигналов определяются следующими выражениями:

$$|V_E| = |G_\Sigma u_{\Sigma 0}(\tau_{Trk} - \Delta\tau)|,$$

$$|V_L| = |G_\Sigma u_{\Sigma 0}(\tau_{Trk} + \Delta\tau)|,$$

где  $\tau_{Trk}$  – экстраполированный момент времени прихода сигнала от сопровождаемой цели;

$\Delta\tau$  – полуширина строба сопровождения, на практике равная половине (или величине) сжатого радиоимпульса [1];

- $G_{\Sigma}$  – коэффициент усиления суммарного канала;  
 $u_{\Sigma 0}(\dots)$  – сигналы, соответствующие выходным сигналам суммарного канала, прошедшим через парные стробы слежения (приходящие от соответствующего генератора стробов).

## РЕАЛИЗАЦИЯ ЦИФРОВОГО ВРЕМЕННОГО ДИСКРИМИНАТОРА

Для увеличения скорости преобразования ошибки слежения  $\Delta r$  в цифровой код с одновременной компенсацией динамической ошибки слежения, обусловленной отклонением закона движения цели от заложенной в экстраполяторе модели, предлагается схема (рис. 3) с АЦП на реверсивном счетчике, дополненная соответствующим компенсационным каналом [7]. Данная схема в полной мере реализует принцип стробирования, представленный на рис. 2. Схема учитывает замкнутый контур системы автосопровождения по дальности (см. рис. 1).

Первые входы первой и второй схем «И» цифрового временного дискриминатора (рис. 3) соединены и являются входом устройства, а их вторые входы подключены к выходу генератора импульсов шкалы времени. Генератор строба и первый блок задержки, формируют два последовательных импульса стробов. Сигнал с выхода первой схемы «И» поступает на первый вход реверсивного счетчика, а с выхода второй схемы «И» – на второй вход счетчика. Сигнал тактовой нулевой установки подается на третий вход счетчика. На выходе реверсивного счетчика и формируется цифровой код невязки (ошибки слежения по дальности).

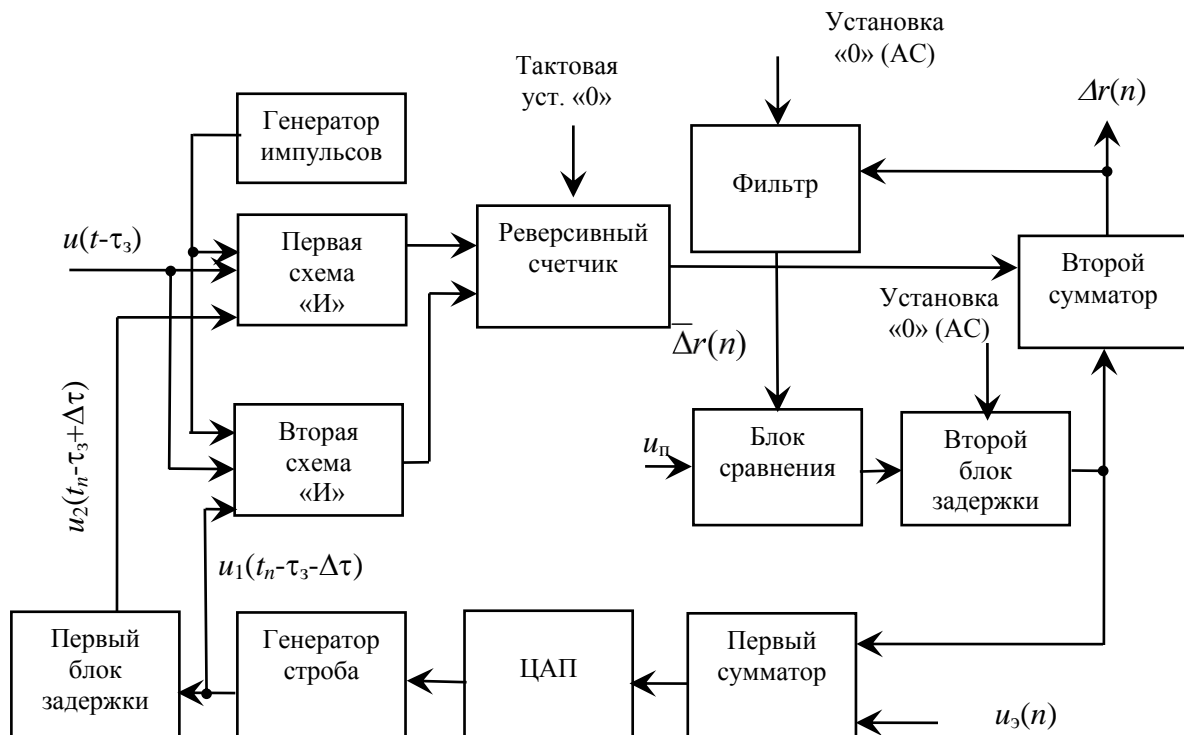


Рис. 3. Функциональная схема цифрового временного дискриминатора с каналом компенсации входной динамической ошибки слежения

Компенсационный канал динамической ошибки представлен совокупностью фильтра ошибки слежения, двух сумматоров блока сравнения и второго блока задержки. При превышении усредненного кода  $\bar{\Delta}r(n)$  величины порога  $u_{п}$  через блок задержки на первый сумматор подается код  $\bar{\Delta}r(n)$ , сдвигающий стык стробов слежения к временному положению сигнала от цели. Компенсация принудительного сдвига стробов на выходе цифрового дис-

криминатора с целью получения истинного значения невязки осуществляется через второй сумматор. За счет оперативной коррекции сигнала отрицательной обратной связи следящей системы производится эквивалентное расширение квазилинейного рабочего участка дискриминаторной характеристики. Это является несомненным преимуществом представленного устройства в сравнении с известными цифровыми временными дискриминаторами.

На ближних дистанциях движения целей целесообразно аналогично предложенному методу осуществлять компенсацию динамической ошибки слежения по угловым координатам [8].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для моноимпульсной РЛС, использующей пачечный сигнал, на основе метода максимального правдоподобия и теории марковских цепей синтезирована структура оптимального многомерного цифрового дискриминатора радиолокационного следящего измерителя дальности до цели и ее угловых координат.

Из условий физической реализуемости предложен канал компенсации динамической ошибки слежения дальности до цели за счет расширения линейного участка дискриминаторной характеристики.

## Список используемых источников

1. *Mervin C., Budge, J., Shawn R.* Basic Radar Analysis. – Boston – London: Artech House Radar Library, 2015. – 784 p.
2. *Леонов А. И.* Моноимпульсная радиолокация. – М.: Книга по Требованию, 2012. – 184 с.
3. *Mahafza B.R.* Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB. – Boca Raton: CRC Press, 2013. – 772 p.
4. Синтез структуры цифрового углового дискриминатора радиолокационной станции с фазированной антенной решеткой / В.В. Пятков, А.Ю. Онуфрей, А.В. Мелешко и др. // Радиотехника. – 2016. – № 9. – С. 155–163.
5. *Пятков В.В., Онуфрей А.Ю., Мелешко А.В.* Синтез цифрового измерителя угловых координат протяженной цели на основе оптимального дискриминатора // Труды XXIX Всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2015. – Вып. 11. – С. 524–536.
6. *Liu Y., Kosut O., Willsky A.* Sampling From Gaussian Markov Random Fields Using Stationary and Non-Stationary Subgraph Perturbations // IEEE Transactions Signal Processing, 2015. – Vol. 53. – P. 576–589.
7. Патент № 2445728. Цифровой временной дискриминатор / В.В. Пятков, А.В. Мелешко; заявитель и патентообладатель АО «НИИ Телевидения». – № 2011108159/08; завл. 02.03.2011; опубл. 20.03.2012, бюлл. № 8. – 11 с.
8. Патент № 2444038. Цифровая следящая система / В.В. Пятков, А.В. Мелешко; заявитель и патентообладатель АО «НИИ Телевидения». – № 2010153634/08; завл. 27.12.2010; опубл. 27.02.2012, бюлл. № 6. – 11 с.

А.И. Мухин;  
кандидат технических наук;  
Л.В. Петрова;  
И.А. Пучкова

## СПОСОБ МОНИТОРИНГА СУДОВ С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ СПУТНИКОВ СВЯЗИ В УСЛОВИЯХ ОТСУТСТВИЯ ИЗЛУЧЕНИЙ AIS-ТРАНСПОНДЕРОВ

В статье рассмотрена неэффективность автоматической идентификационной системы в случаях отсутствия радиоизлучений от AIS-транспондеров. При возникновении таких ситуаций, с целью обеспечения безопасного мореплавания, предложен альтернативный способ мониторинга судов, основанный на составлении радиоэлектронного портрета объекта по результатам приема радиосигналов, излучаемых от других бортовых радиоэлектронных средств. В результате анализа принятых радиоизлучений осуществляется идентификация объекта и занесение его в базу данных судов и портов.

Ключевые слова: мониторинг судов, AIS-транспондер, энергетическая доступность, коммуникационный спутник.

### ВВЕДЕНИЕ

С целью уменьшения риска столкновения судов, начиная с 2000 года, была разработана и внедрена на многие плавсредства автоматическая идентификационная система (АИС), или *Automatic Identification System (AIS)*. Система AIS предназначена для отображения актуальной надводной обстановки на цифровой карте движения судов. Информация о судне транслируется в эфир с помощью бортового AIS-транспондера, который автоматически отправляет сообщения на радиочастотах 161,975 и 162,025 МГц.

Сообщения AIS принимаются экипажами других судов, береговыми службами, отвечающими за безопасность на акватории, службами поиска и спасения, коммуникационными спутниками типа *Orbcomm-G2*, а также обычными радиолюбителями. В соответствии с Международной конвенцией по охране человеческой жизни на море (*SOLAS*) все суда валовой вместимостью более 300 регистрационных тонн должны быть оборудованы АИС [1]. Однако в случаях захвата судна пиратами, или возникновения аварий, а также в момент выхода корабля в плавание или по иным причинам, может произойти отключение (поломка) AIS-транспондеров, что создает предпосылки к столкновениям и катастрофам [2].

Таким образом, разработка и применение альтернативного способа мониторинга судов при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров позволят обеспечить безопасное мореплавание. Для реализации способа необходимо провести анализ излучений от других бортовых радиоэлектронных средств.

### АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ РАДИОИЗЛУЧЕНИЙ КОРАБЕЛЬНЫХ РЭС

На гражданских судах, помимо AIS-транспондеров, устанавливаются дополнительные радиоэлектронные средства (РЭС). Полный список судовых станций (*The List of Ship Stations - List V*) ежегодно публикуется в виде специального справочника Международной морской организации [3]. Все представленные в справочнике судовые станции отвечают требованиям Регламента радиосвязи [4].

В целях распределения радиочастот, земной шар разделен на несколько районов. В справочнике представлены суда, на которых установлены связные и метеорологические РЭС, и отмечены суда, оснащенные различной спасательной аппаратурой и навигационными ра-



диолокационными станциями (РЛС). Навигационные РЛС как отечественного, так и зарубежного производства, предназначены для обнаружения и сопровождения таких надводных объектов как: суда, корабли, айсберги, острова, береговые линии.

Анализ характеристик радионавигационных РЛС позволил сделать следующие выводы:

– излучение радиосигналов происходит на трех несущих частотах:  $X$ -диапазон 9,375 ГГц,  $S$ -диапазон 3,05 ГГц,  $K$ -диапазон 33,2 ГГц (как правило, используется береговыми РЛС);

- мощность излучений составляет от 2 до 12 кВт,
- точность измерения углов 1–3°;
- разрешающая способность по углу 1–3°;
- разрешающая способность по дальности 30–100 м;
- дальность действия от 10 до 40 морских миль;
- одновременное отслеживание до 10 судов.

Выбор для радиолокационного излучения  $X$ -,  $S$ - и  $K$ -диапазонов частот не случаен и обоснован тем, что именно на этих частотах происходит меньшее затухание электромагнитной волны в слое тропосферы, особенно при неблагоприятных условиях – в случаях дождя высокой интенсивности [5].

Приблизительное значение дальности обнаружения надводных объектов (в милях) при нормальном (атмосферное давление 760 мм, температура воздуха 15 С°, относительная влажность 60%) состоянии атмосферы рассчитывается по формуле

$$D = 2,39(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_o}), \quad (1)$$

где  $h_a$  – высота антенны РЛС над уровнем моря, м;

$h_o$  – высота отражающей части объекта над уровнем моря, м.

Помимо дальности обнаружения надводных объектов, радионавигационные РЛС обладают следующими техническими характеристиками:

- однозначная дальность действия,
- разрешающая способность по скорости,
- разрешающая способность по углу.

Однозначная дальность действия оценивается по формуле

$$D_{\text{одн}} = \frac{cT}{2}, \quad (2)$$

где  $T$  – период следования импульсов.

Разрешающая способность РЛС по радиальной скорости рассчитывается как

$$\Delta\theta_r = \frac{\lambda}{2\tau_{\text{и}}}, \quad (3)$$

где  $\lambda$  – длина радиоволны;

$\tau_{\text{и}}$  – длительность импульса.

Разрешающая способность по углу (или по направлению) в горизонтальной плоскости – минимальный угол  $a$  между направлениями на два равноудаленных точечных объекта, при котором отраженные сигналы от этих целей принимаются и отображаются на индикаторе (мониторе) раздельно. Различают разрешающие способности: реальная  $a_p$ , потенциальная  $a_{\text{п}}$  и индикаторная  $a_{\text{и}}$ . Для разных шкал дальностей в радионавигационных радарх применяются определенные длительности и частоты следования импульсов. В табл. 1 представлены соотношения между дальностями действия (морские мили), длительностями импульсов и частотами следования импульсов [6].

Таблица 1

## Соотношения варьируемых параметров

Шкалы дальности, мм	Длительность импульса, мкс	Частота следования импульсов, Гц
0,25–1,5	0,08–0,12	1800–2200
2,0–3,0	0,3	1200–1300
4,0–48,0	0,8	600
72,0–120,0	1,2	450–500

Анализ технических характеристик современных радионавигационных РЛС позволяет сделать вывод о том, что реальная разрешающая способность по дальности на шкалах 1–2 мили составляет 15–25 м, а по направлению составляет 0,8–1,5°, что является относительно неплохими показателями. Однако при сильной качке судна, а также в условиях выпадения обильных гидрометеоров (града, снега, ливня) у навигационных РЛС может значительно снизиться точность обнаружения объектов (на 30–50%), что не удовлетворяет требованиям безопасного судовождения [7].

На современных кораблях устанавливаются специфические РЭС, позволяющие выполнять характерную для определенного типа корабля задачу. Поэтому по излучениям РЭС существует возможность распознавания типов кораблей. Корабельные РЭС периодически подвергаются модернизации. Модернизация может заключаться в изменении вида антенн и параметров излучаемых радиосигналов. В силу разных причин модернизация РЭС на всех классах кораблей проходит не одновременно. Поэтому анализ радиоэлектронного портрета объекта в ряде случаев позволяет распознавать не только тип корабля, но и осуществлять их распознавание по экземплярам. Анализ источников позволяет сделать вывод о том, что все специфические РЭС (посадки летательного аппарата, воздушного обзора, навигации и т. п.) излучают в строго определенном и отличном друг от друга диапазоне радиочастот [8].

Перед тем как распознать корабль по радиоизлучениям его бортовых РЭС, необходимо оценить энергетическую доступность излучений для спутников связи [9].

Мощность сигнала на входе радиоприемного устройства спутников может быть представлена в виде

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{пер}} G_{\text{пер}} G_{\text{пр}} \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{пр}} \lambda^2}{16\pi^2 d^2 L_{\text{доп}}}, \quad (4)$$

- где  $P_{\text{пер}}$  – мощность излучаемого радиосигнала РЭС;  
 $G_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны;  
 $G_{\text{пр}}$  – коэффициент усиления приемной антенны;  
 $\eta_{\text{пер}}$  – коэффициент передачи волноводного тракта;  
 $\eta_{\text{пр}}$  – коэффициент приема волноводного тракта;  
 $\lambda$  – длина волны радиосигнала РЭС;  
 $d$  – наклонная дальность (расстояние между целью и спутником связи);  
 $L_{\text{доп}}$  – дополнительные потери на радиолинии.

Необходимо учитывать дополнительные потери на радиолинии. Дополнительные потери на радиолинии земля-космос рассчитывают с учетом благоприятных условий (БУ) и неблагоприятных условий (НБУ).

Оценить чувствительность приемной аппаратуры спутника связи можно с помощью формулы

$$P_{\text{ч}} = k \cdot T_{\text{ш}} \cdot \Delta f, \quad (5)$$

- где  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К);  
 $T_{\text{ш}}$  – эквивалентная суммарная шумовая температура всей приемной системы с учетом внутренних и внешних шумов (1000 К);  
 $\Delta f$  – полоса пропускания радиоприемного устройства (РПУ) (12 МГц).

Оценить отношение сигнал/шум на выходе РПУ можно с применением следующего соотношения:

$$\left( \frac{P_c}{P_{\text{ш}}} \right) = (P_{\text{пр}} - P_{\text{ч}}). \quad (6)$$

Если значения отношения сигнал/шум находится в пределах от 10 до 15 дБ, то существует возможность только обнаружения радиосигналов РЭС. Если это отношение превышает 15 дБ, то существует возможность обнаружения и технического анализа сигналов РЭС.

На рис. 1 представлены зависимости ослабления мощности сигнала РЭС при увеличении наклонной дальности спутника связи. При расчетах использовалась самая маломощная навигационная РЭС (со средней мощностью излучения 1 кВт), учитывались БУ и НБУ, возможность приема по главному (ГЛ) и боковому лепестку (БЛ). Анализ рис. 1 позволяет сделать вывод о том, что существующие и перспективные спутники связи практически всегда способны принимать излучения от корабельных РЭС [5].

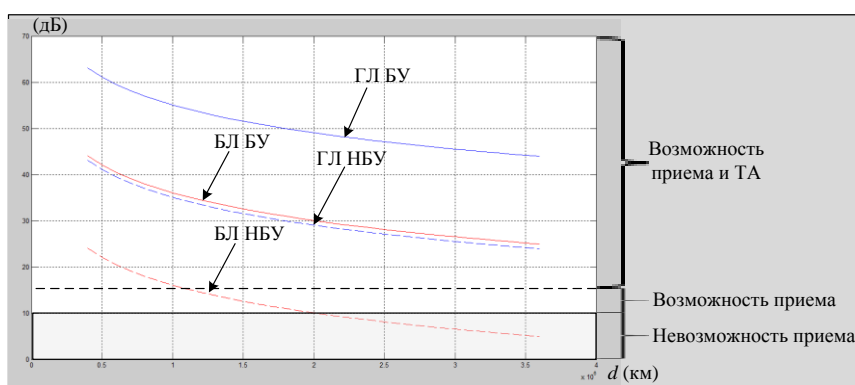


Рис. 1. Зависимости ослабления мощности сигнала маломощной навигационной РЭС при увеличении наклонной дальности спутника связи

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен альтернативный способ мониторинга судов для обеспечения безопасного мореплавания при отсутствии радиоизлучений от AIS-транспондеров. Внедрение способа в общую систему идентификации судов позволит:

- составить радиоэлектронные портреты кораблей на основе принятых радиоизлучений,
- осуществить распознавание и идентификацию кораблей с последующим занесением объектов в базу данных судов и портов,
- обеспечить безопасное мореплавание.

Также в статье проведен анализ параметров радиоизлучений корабельных РЭС и рассчитана их энергетическая доступность для современных и перспективных спутников связи. По результатам исследования сделан вывод, что указанные спутники практически всегда способны принимать рассматриваемые радиоизлучения.

## Список используемых источников

1. Сухоруков Ю.А. Вместе мы выстроим устойчивое и светлое будущее для отрасли // Морской профсоюзный вестник. – 2018. – № 6 (123). – С. 54–58. – URL: [www.sur.ru/upload/MPV6\\_123\\_2018\\_preview\\_filename\\_54\\_19\\_878\\_.pdf](http://www.sur.ru/upload/MPV6_123_2018_preview_filename_54_19_878_.pdf) (дата обращения: 15.03.2019).
2. Войтенко М.А. Как современный эсминец может столкнуться с гражданским судном? // Русская служба. Новости. – URL: [news.tut.by/world/557016.html?crnd=64736](http://news.tut.by/world/557016.html?crnd=64736) (дата обращения: 15.03.2019).

3. Радиосвязь: издание для моряков / Международная морская организация (ИМО). – URL: [www.imodocs.ru/k1\\_1737.php](http://www.imodocs.ru/k1_1737.php).
4. Регламент радиосвязи: справочник – Швейцария, Женева: Библиотечно-архивная служба Международного союза электросвязи (МСЭ), 2016. – 442 с. – URL: <http://search.itu.int/history/HistoryDigitalCollectionDocLibrary/1.43.48.ru.601.pdf> (дата обращения: 15.03.2019).
5. *Маринич А.Н., Приотнюк А.В.* Современные судовые и береговые радиолокационные станции (радары) отечественных и зарубежных фирм: монография. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2012. – 166 с.
6. *Рембовский А.М., Ашихнин А.В., Козьмин В.А.* Автоматизированные системы радио-контроля и их компоненты. – СПб.: Горячая линия – Телеком, 2017. – 428 с. – URL: [www.techbook.ru/book.php?id\\_book=923](http://www.techbook.ru/book.php?id_book=923) (дата обращения: 15.03.2019).
7. *Бобков А.А.* Авиационные средства дальнего радиолокационного обнаружения и управления иностранных государств (Е-2С) // Зарубежное военное обозрение. – 2006. – № 1. – С. 15–16.
8. *Нечаев Е.Е., Дерябин К.С.* Современные бортовые радиолокационные станции и антенные решетки многофункциональных авиационных комплексов военного назначения // научный вестник МГТУ ГА. – М.: МГТУ ГА, 2015. – С. 33–37.
9. *Аскинази Г.Б.* Справочник по спутниковой связи и вещанию. – М.: Радио и связь, 1983. – 284 с.

А.П. Смирнов\*,  
доктор технических наук

\* Научно-производственная фирма «Диполь», г. Санкт-Петербург

## **АБСОЛЮТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ**

Предложен метод измерений эффективной площади рассеяния (ЭПР) объектов с использованием *GTEM*-камер. Метод основан на методиках косвенных расчетов напряженности поля излучаемых помех в *GTEM*-камерах, широко используемых при тестировании электромагнитной совместимости. Сочетание возможностей *GTEM*-камер для тестирования устойчивости к излучению и для измерений эмиссии излучаемых помех позволяет через оценивание *S*-параметров камеры с размещенным объектом проводить оценку ЭПР. Преимущество предложенного подхода состоит в возможности измерений ЭПР в низкочастотном диапазоне менее 0,5–1 ГГц, который недоступен традиционными средствами измерений. Проведенные экспериментальные измерения на сферических отражателях показали чрезвычайную близость результатов измерений к теоретическим оценкам.

Ключевые слова: ЭПР, *GTEM*-камера, *S*-параметры, измерения, электромагнитная совместимость.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Измерения эффективной площади рассеяния (ЭПР) относятся к области радиотехнических измерений, предполагающих измерения амплитудных характеристик электромагнитного поля. В процессе измерений радиолокационные измерительные комплексы (РИК) фактически имитируют работу радара, а оценивание ЭПР выполняют методом измерений замещением или сравнением с мерой. Так, входящие в состав РИК комплексы мер ЭПР позволяют провести градуировку измерительного тракта и избежать многих источников погрешностей. Несмотря на историческую продолжительность радиолокационных измерений, развитие и появление новых типов РИК, включая закрытые коллиматорные системы, их рабочий частотный диапазон ограничен снизу частотой около 0,5–1 ГГц. Между тем ожидаемая эффективность радиолокационных обнаружителей более низкого частотного диапазона заставляет искать пути получения экспериментальных оценок ЭПР на данных частотах. При этом с одной стороны проблематично создать РИК для таких больших длин волн, в основном из-за крупногабаритных антенных или полеобразующих систем, с другой стороны существенно возрастает погрешность мер ЭПР с большими номинальными значениями, необходимыми для градуировки в этом частотном диапазоне типа уголкового или цилиндрических отражателей. Очевидно, что развитие альтернативных методов измерений ЭПР в низкочастотном диапазоне хотя бы для ограниченных по габаритам объектов представляет практический интерес и является актуальным.

### **ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРОБОВАНИЯ**

Одними из вероятных направлений данного развития являются следующие пути:

- переход от относительных методов измерений ЭПР к абсолютным методам, использующим для измерений более широко формализованное определение ЭПР;
- использование опыта и методик измерения электромагнитных полей в данном низкочастотном диапазоне, реализованных в смежных прикладных областях.

Классическое определение ЭПР включает в себя значения падающего и рассеянного поля и формулируется выражением:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{E_{\text{рас}}^2}{E_{\text{пад}}^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – ЭПР объекта;

$E_{\text{пад}}$  – напряженность падающего поля непосредственно у объекта;

$E_{\text{рас}}$  – напряженность рассеянного поля на расстоянии  $R$  от объекта измерений.

Стремление к бесконечности расстояния  $R$  необходимо для независимости величины ЭПР от расстояния. В реальности же достаточно выбрать расстояние  $R$ , начиная с которого пространственная зависимость напряженности  $E_{\text{рас}}$  от расстояния имеет характер обратно пропорциональной зависимости, а падающее электромагнитное поле подобно плоской волне.

Непосредственная реализация методики измерений ЭПР по (1) включала бы два измерения напряженности поля и фактически означала бы непосредственную реализацию измерений физической величины, в данном случае ЭПР, по определению. Первое измерение включало бы оценку падающего поля, второе измерение – оценку рассеянного поля. Но пока данный подход не нашел распространение по ряду причин.

Между тем указанные измерительные задачи весьма похожи на задачи из области тестирования характеристик электромагнитной совместимости (ЭМС) относительно излучаемых помех. Так, задача создания и измерений характеристик падающего поля идентична задаче тестирования устойчивости к излучаемым помехам, а измерение напряженности рассеянного поля подобна задаче измерений эмиссии излучаемых помех. При этом, несмотря на то, что в ЭМС данные задачи разнесены по времени или пространству, указанные проблемы генерирования и измерений электромагнитных полей проявляются в той же степени. Примечательна схожесть и тенденций развития радиолокационных измерительных комплексов и измерительно-испытательных систем ЭМС. В общем-то, как и в радиолокационных измерениях, так и в области оценки характеристик ЭМС, проявились как минимум два этапа развития средств измерений. Если первый этап основывался на измерениях на открытых площадках, то второй этап характеризуется переходом в закрытые полигоны, размещаемые в безэховых камерах. Можно также выделить и третий этап в каждой из областей, общим для которого является внедрение методов моделирования и методик измерений, на основании преобразования данных первичных измерений в окончательные характеристики.

С точки зрения использования методического аппарата испытаний ЭМС применительно к радиолокационным измерениям примечательным стал тот факт, что наиболее развитый частотный диапазон в испытаниях ЭМС является сейчас востребованным для радиолокационных измерений. В частности, наиболее интенсивно измерение эмиссии излучаемых помех выполняется в диапазоне 30–1000 МГц, а тестирование устойчивости – в диапазоне 80–1000 МГц. Для инструментальных средств наиболее предпочтительными являются универсальные средства тестирования ЭМС как по эмиссии, так и по устойчивости, поскольку измерение ЭПР, как известно, предполагает одновременное облучение полем и измерение напряженности поля. В этой связи следует обратить внимание на полеобразующие структуры типа *GTEM*-камер и связанные с ними методики измерений эмиссии излучаемых помех и методики тестирования устойчивости [1]. По сути, *GTEM*-камера – это полосковая нерегулярная структура с согласованной нагрузкой на одной стороне. Центральный проводник (так называемый *septum*) представляет собой плоскую панель, смещенную несколько в сторону от оси камеры для увеличения рабочего объема. Хотя изначально эти структуры использовались только для создания облучающего поля при тестировании устойчивости к излучаемым помехам, но замкнутый характер камеры обуславливает возможность косвенной оценки эмиссии излучаемых помех.

Основными свойствами *GTEM*-камер являются:

- частотный диапазон (полный и рабочий);
- допустимые габаритные размеры объекта испытаний.

Полный частотный диапазон *GTEM*-камеры как полосковой структуры широк и занимает частоты практически от 0 Гц до 18–20 ГГц (по данным производителей, *TESEQ*, *ETS Lindgren* и т. д.). Рабочий частотный имеет более низкие высокие частоты, которые ограничиваются допустимым КСВН или вариациями поля в рабочем объеме.

Размеры рабочего объема, определяемые положением центрального проводника, составляют 1/3 от высоты центрального проводника. При этом максимальные габаритные размеры объектов испытаний не должны превышать длины волны.

При таких условиях модель представления объекта в виде случайно ориентированного вибратора, что допускает методика, является адекватной. В то же время, не смотря на то, что в целом частотный диапазон работы *GTEM*-камеры широкий и достигает практически от 0 Гц до десятков гигагерц, методика измерений допускает измерения только до 1 ГГц [1]. Целью измерений эмиссии излучаемых помех является оценка максимально возможной напряженности поля помех на заданном расстоянии. Знание полной излученной мощности позволяет провести подобную оценку. Согласно [1] такая оценка проводится по результатам измерений выходных напряжения *GTEM*-камеры с размещенным внутри объектом испытаний при трех ортогональных его положений. И затем полная излученная мощность используется для оценки напряженности поля помех. В целом расчетные соотношения могут быть объединены в одну формулу, связывающую непосредственно выходное напряжение *GTEM*-камеры (среднеквадратическое значение трех компонент) и напряженность создаваемого поля помех на заданном расстоянии. Тогда итоговая формула для напряженности поля помех описывается выражением:

$$E_{\text{изл}} = \frac{1}{R} \frac{\eta k}{2\pi e_N} \frac{U_{\text{вых}}}{\sqrt{z_c}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{изл}}$  – напряженность поля помех;

$R$  – измерительное расстояние;

$\eta$  – волновое сопротивление свободного пространства,  $120\pi$  [Ом];

$k$  – волновое число,  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ ;

$\lambda$  – длина волны;

$e_N$  – градуировочный коэффициент *GTEM*-камеры в режиме генерации поля в рабочей зоне и связывающий входную мощность  $P_{\text{вх}}$  и напряженность падающего поля  $E_{\text{пад}}$ ,  $e_N = \frac{E_{\text{пад}}}{\sqrt{P_{\text{вх}}}} = \frac{\sqrt{Z_c}}{d}$ ;

$$E_{\text{пад}}, e_N = \frac{E_{\text{пад}}}{\sqrt{P_{\text{вх}}}} = \frac{\sqrt{Z_c}}{d};$$

$z_c$  – волновое сопротивление линии, номинально 50 [Ом];

$d$  – расстояние между проводниками в *GTEM*-камере в сечении рабочего объема;

$U_{\text{вых}}$  – модуль выходного напряжения по результатам измерений выходных напряжений для трех ортогональных положений  $(x, y, z)$  объекта испытаний,

$$U_{\text{вых}} = \sqrt{U_{x \text{ вых}}^2 + U_{y \text{ вых}}^2 + U_{z \text{ вых}}^2}.$$

При этом напряженность падающего поля просто оценивается исходя из входного напряжения  $U_{\text{вх}}$  и высоты рабочего объема:

$$E_{\text{пад}} = \frac{U_{\text{вх}}}{d}. \quad (3)$$

Таким образом, если внутри камеры разместить объект и на вход камеры подать некоторое входное напряжение  $U_{\text{вх}}$ , создающее падающее поле  $E_{\text{пад}}$ , то возникшее выходное напряжение  $GTEM$ -камеры  $U_{\text{вых}}$  позволит рассчитать напряженность поля  $E_{\text{изл}}$  на расстоянии  $R$ , созданное объектом. Поскольку напряжения  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$  измеряются в одном сечении  $GTEM$ -камеры, то можно их отношение выразить в терминах  $S$ -параметров. При измерениях ЭПР наиболее часто измеряются ЭПР на согласованных поляризациях. При традиционном положении объекта облучающее поле является вертикально поляризованным. Следовательно, в рассеянном сигнале также интерес представляет единственная вертикальная компонента. Поэтому формально полагая, что

$$E_{\text{рас}} = E_{\text{изл}}, \quad (4)$$

и подставляя в (1), получается выражение для оценки ЭПР при единственном положении объекта внутри  $GTEM$ -камеры:

$$\sigma = 4\pi \left( \frac{\eta d^2 U_{\text{вых}}}{\lambda z_c U_{\text{вх}}} \right)^2, \quad (5)$$

или к следующему окончательному выражению в терминах  $S$ -параметров:

$$\sigma = 4\pi \left( \frac{\eta d^2}{\lambda z_c} \right)^2 |S_{11}|. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) отражает принцип разработанного абсолютного метода измерений ЭПР с учетом ограничений и условий применимости [1]. Развитая на его основе методика измерений не требует использования мер ЭПР.

Для опробования методики и проверки заложенного принципа были проведены экспериментальные измерения ЭПР металлических сфер диаметрами 81 и 112 мм. Измерительная установка представляла собой совокупность векторного анализатора цепей *Keysight* и  $GTEM$ -камеры *TESEQ* (тип  $GTEM$ -250, высота проводника 250 см).

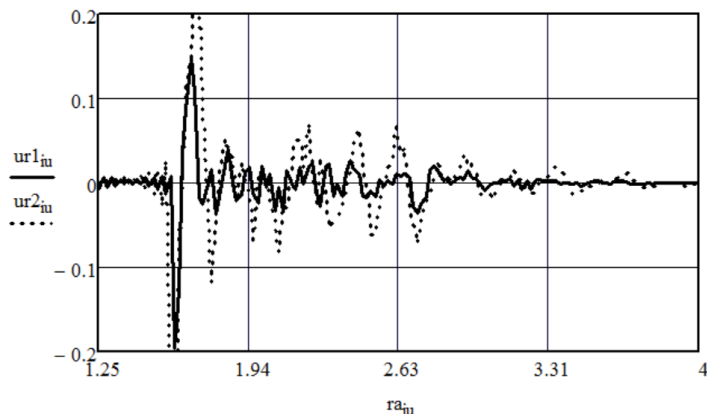


Рис. 1. Импульсные характеристики сфер, расположенные внутри  $GTEM$ -камеры: сплошная линия – сфера 81 мм; пунктирная линия – сфера 112 мм

Процедура измерений не отличается от традиционной для подобных случаев и включает в себя для каждого объекта следующее:

- последовательные измерения частотной зависимости отраженного фонового сигнала и сигнала объекта с последующим вычитанием фонового сигнала;
- преобразование частотной зависимости во временную область и временное стробирование полезного сигнала;
- обратное преобразование в частотную область и анализ результатов.



На рис. 1 показаны измерения импульсных характеристик сфер с ярко выраженными откликами сфер и некомпенсированным фоновым сигналом, обусловленным затенением объектом части задней стенки *GTEM*-камеры.

На рис. 2 показаны завершающие результаты измерений ЭПР металлических сфер в широкой полосе частот. Наблюдается хорошее совпадение с теоретическими результатами в диапазоне до 1–1,5 ГГц, что соответствует ограничениям [1]. При этом близость к теории более характерна для сфер меньшего диаметра, что опять же соответствует [1] в части соотношения габаритного размера объекта и высоты центрального проводника (25 см для *GTEM*-250).

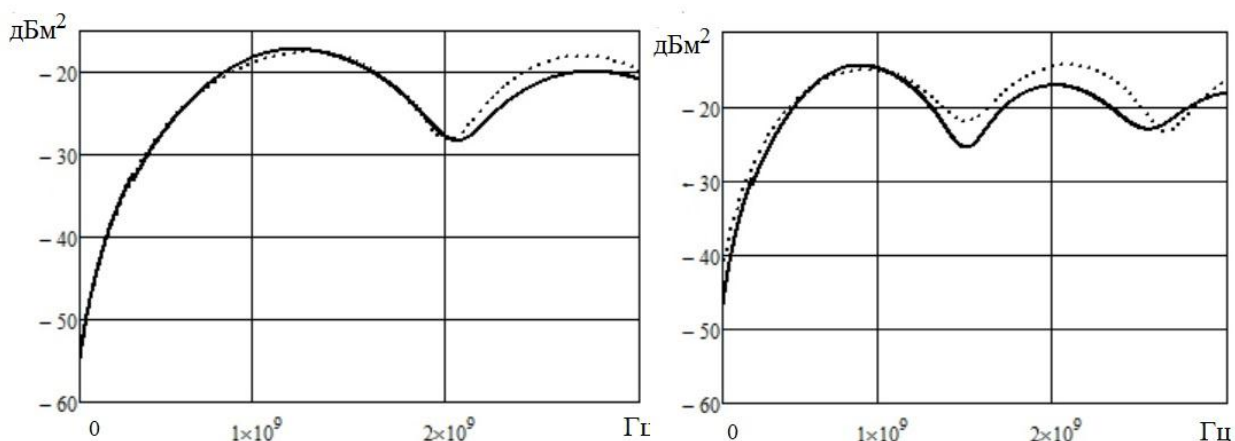


Рис. 2. Сравнительные результаты измерений и расчетов ЭПР: сплошная линия – измерения; пунктирная линия – теория; слева – сфера 81 мм; справа – сфера 112 мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом можно констатировать следующее:

1. Предложенный абсолютный метод измерений ЭПР позволяет измерять ЭПР без применения мер ЭПР.
2. Метод и связанная с ним методика позволяют проводить измерения ЭПР простейших тел в диапазоне частот менее 1 ГГц с приемлемой погрешностью.
3. В перспективе с помощью разработанного метода предполагается получать экспериментальные данные о действительных значениях мер ЭПР в рэлеевской и резонансной области тел простейших форм непрерывно по частотному диапазону.
4. Возможность получения точных результатов измерений ЭПР калибровочных отражателей позволит получить нормированные данные об ЭПР в качестве стандартных справочных данных для частотного диапазона рэлеевской и резонансной области.

## Список используемых источников

1. Смирнов А.П., Басалаев К.К., Занин Ю.М. Исследование возможностей *GTEM*-камер по тестированию ЭМС технических средств в части эмиссии излучаемых помех // Труды V Всероссийской научно-технической конференции. – М.: Грифон, 2018. – С. 117–121.
2. ИЕС 61000–4–20(2010). Электромагнитная совместимость. Ч. 4–20. Методики испытаний и измерений. Испытание на эмиссию и невосприимчивость в поперечных электромагнитных волноводах.
3. CISPR 16–1–4–2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Ч. 1–4. Аппаратура для измерения радиопомех и помехоустойчивости. – М.: Стандартинформ, 2015.

Н.В. Бахметьева\*,

*доктор физико-математических наук;*

Г.И. Григорьев\*,

*кандидат физико-математических наук;*

И.Н. Жемяков\*

\* Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижегородский исследовательский государственный университет имени Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород

## **ВОЗМОЖНОСТИ МОНИТОРИНГА МЕЗОСФЕРЫ И НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТЕНДА «СУРА»**

В работе рассматриваются возможности мониторинга мезосферы и нижней термосферы на основе метода диагностики нижней ионосферы Земли, основанного на создании искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы и обратном рассеянии ими пробных радиоволн. Неоднородности создаются излучением в зенит мощных высокочастотных радиоволн нагревным стендом «Сура». Представлены результаты определения основных параметров ионосферы и нейтральной атмосферы в интервале высот 50–130 км, обсуждаются перспективы применения и развития метода.

Ключевые слова: мезосфера, нижняя термосфера, нагрев, искусственные периодические неоднородности, вертикальное движение плазмы, волны, турбулентность, температура, плотность.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В работе обсуждается возможность использования нагревного стенда «Сура» для определения важнейших параметров регулярной (естественной) среды на высотах мезосферы и нижней термосферы (50–150 км) с целью контроля и мониторинга ее параметров. Задача контроля состояния мезосферы и нижней термосферы является одной из важных задач в исследовании околоземного космического пространства. Эта область высот является переходной от однородного состава атмосферы к диффузионному разделению газов. Она определяет поглощение и распространение коротких радиоволн, что значительно влияет на состояние радиосвязи в КВ диапазоне. Исследуемая нами область высот включает области D и E и содержит спорадические слои с повышенным относительно фонового значением электронной концентрации – спорадические слои E, которые могут обеспечить радиосвязь в КВ и УКВ диапазонах. Важность мониторинга этой области атмосферы обусловлена также влиянием, которое возмущенная среда может оказывать на работу радиосистем навигации и радиолокации, развитием новых и совершенствованием традиционных методов измерений, возрастающей возможностью использования результатов исследований в построении моделей ионосферы и нейтральной атмосферы. В мезосфере и нижней термосфере происходят многообразные природные явления и развиваются процессы разных пространственно-временных масштабов, которые влияют на характеристики плазменной и нейтральной составляющих атмосферы Земли, в том числе в периоды активного воздействия на ионосферу мощным высокочастотным радиоизлучением. Разработанный нами метод искусственного воздействия на ионосферу позволяет определять основные характеристики нейтральной и плазменной составляющих среды на высотах мезосферы и нижней термосферы.

В работе приведены некоторые результаты исследований явлений в мезосфере и нижней термосфере на основе изучения высотно-временных вариаций параметров среды методом, основанном на резонансном рассеянии радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН) ионосферной плазмы, создаваемых мощным КВ радиоизлучением нагревного стенда «Сура» (56,1°N; 46,1°E).

## СТЕНД «СУРА» И ПЕРИОДИЧЕСКИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ

Нагревный стенд «Сура» с номинальной эффективной мощностью до 350 МВт используется для воздействия на ионосферу высокочастотным радиоизлучением и создания в ней искусственных возмущений. Его основу составляют три коротковолновых радиовещательных радиопередатчика ПКВ-250 мощностью 250 кВт каждый с частотами в диапазоне 4–25 МГц и 144-элементная фазированная антенная решетка размером  $300 \times 300$  м<sup>2</sup> с диапазоном рабочих частот 4,3–9,5 МГц и коэффициентом усиления 26 дБ на средней частоте рабочего диапазона. При исследовании ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН для создания неоднородностей используется синфазное излучение мощными передатчиками стенда «Сура» радиоволн, как правило, на частотах 4,7 (4,785) и 5,6 МГц.

Для регистрации ионосферных сигналов используется приемная часть установки частичных отражений. Ее приемопередающая антенна имеет 12 вибраторов на каждой из двух линейных поляризации. Расчетная ширина диаграммы направленности антенны на уровне половинной мощности составляет 20–30°. Полоса пропускания приемного устройства 80 и 40 кГц, тактовая частота зондирования составляет 25; 50; 100 Гц. Для регистрации амплитуды и фазы рассеянного сигнала в цифровом виде используется быстродействующий 12-разрядный АЦП. Экспресс-обработка принимаемых сигналов проводится в реальном времени на ПК с помощью специально разработанных нами оригинальных программ.

Метод исследования ионосферы на основе создания ИПН и основные способы определения характеристик ионосферы и нейтральной атмосферы подробно изложены в монографии [1]. При отражении от ионосферы мощной радиоволны создаются неоднородности ионосферной плазмы вследствие неравномерного нагрева электронной компоненты в пучностях и узлах стоячей волны. В результате образуется периодическая структура температуры электронов с пространственным периодом, равным половине длины мощной радиоволны. Неравномерный нагрев приводит к тому, что плазма выталкивается в узлы стоячей волны с формированием неоднородностей электронной концентрации. Синфазное сложение волн, рассеянных всеми неоднородностями в структуре, обеспечивает высокий уровень отношения сигнал/шум. В нижней ионосфере рассеянный неоднородностями сигнал в 10–100 раз превышает уровень естественных шумов. Условие синфазного сложения волн выполняется при равенстве в плазме длин нагревной и пробной радиоволн. Процессы образования ИПН и их релаксации после прекращения воздействия на ионосферу зависят от многих физических условий: химического состава, плотности и температуры атмосферы, электронной концентрации, регулярных и турбулентных движений и др. В D-области главную роль в образовании ИПН играет температурная зависимость коэффициента прилипания электронов к нейтральным молекулам, в E-слое – диффузионное перераспределение плазмы под действием избыточного давления электронного газа. В области F плазма перераспределяется под воздействием пондеромоторной силы. Для создания ИПН в течение 3 с с периодом 15 с производится непрерывное воздействие на ионосферу, после чего стенд «Сура» переводится в импульсный режим зондирования с излучением пробных импульсов длительностью 30 мкс с частотой повторения 50 Гц. По окончании воздействия на ионосферу неоднородности разрушаются (релаксируют). На стадии разрушения неоднородностей при зондировании ИПН пробными радиоволнами рассеянный неоднородностями сигнал поступает на приемную часть установки частичных отражений, расположенную на расстоянии 1 км от нагревного стенда. Производится регистрация рассеянного сигнала в виде квадратурных компонент, по которым стандартным образом определяются его амплитуда и фаза. Анализ высотновременных зависимостей амплитуды и фазы сигнала, рассеянного периодическими неоднородностями, позволяет определить важнейшие характеристики ионизированной и нейтральной составляющих атмосферы Земли на высотах мезосферы и нижней термосферы. На основе теоретических представлений о физических процессах, влияющих на образование неоднородностей, были разработаны и применены в исследованиях ионосферы способы определе-

ния многих параметров ионосферы и нейтральной атмосферы [1–6], среди которых основными являются:

- высотный профиль электронной концентрации от E- до F-слоя, включающий межслоевую E–F-впадину;
- температура и плотность нейтральной компоненты на высотах E-области; коэффициент амбиполярной диффузии;
- скорость регулярного вертикального движения плазмы в D- и E-областях, совпадающая на этих высотах со скоростью нейтральной компоненты;
- атомная масса преобладающих ионов в спорадическом слое E ( $E_s$ ), относительные концентрации металлических и «атмосферных» ионов, эффективный коэффициент рекомбинации в слое;
- высота турбопаузы и турбулентная скорость;
- относительная концентрация отрицательных ионов кислорода, концентрации атомарного кислорода и возбужденного молекулярного кислорода в состоянии  $^1\Delta_g$  в D-области;
- электронная и ионная температуры в F-области.

Вследствие высокого пространственно-временного разрешения, составляющего 15 с по времени и 1 км по высоте, метод, основанный на резонансном рассеянии радиоволн на периодических неоднородностях, создаваемых излучением нагревного стенда, позволяет:

- проводить исследования внутренних гравитационных волн и определять их параметры,
- обнаруживать слабые спорадические слои ионизации (слои  $E_s$ ), недоступные регистрации ионозондами, исследовать их динамику;
- исследовать неоднородную структуру нижней ионосферы, обнаруживать «расслоения» в профилях электронной концентрации, начиная с нижней части D-области и до высоты максимума F-слоя,
- исследовать особенности восходных и заходных явлений, реакцию ионосферы на солнечное затмение;
- обнаруживать и исследовать возмущения ионосферы естественного и техногенного характера и определять их пространственно-временные характеристики.

## НАИБОЛЕЕ ЗНАЧИМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Длительные наблюдения в разных гео-гелиофизических условиях показали эффективность метода ИПН в исследованиях ионосферы на мезосферно-термосферных высотах. Обозначим наиболее важные результаты, часть которых представлена в [1–6].

1. Исследованы вертикальные движения плазмы в интервале высот 60–130 км в разных гео-гелиофизических условиях, получены высотные профили скорости, изучены их временные вариации.

2. Вертикальные движения плазмы обеспечивают перенос атмосферной турбулентности на высоты выше турбопаузы и коррелируют с образованием слоя  $E_s$ .

4. Получены характеристики спорадического слоя E с преобладанием ионов магния и железа в максимуме слоя, исследованы низколежащие слои и полупрозрачные слои с малыми значениями электронной концентрации.

3. Показано, что в нижней части D-области (ниже 65 км) амплитуда сигнала и время его релаксации  $\tau$  определяются вариациями плотности атмосферы и концентрации молекулярного кислорода в возбужденном состоянии  $^1\Delta_g$ , а на высотах 75–80 км – концентрацией атомарного кислорода. Неоднократно наблюдалось расслоение области D.

4. На высотных профилях электронной концентрации отмечается расслоение регулярной области E и появление дополнительных слоев в межслоевой E–F-впадине.

5. Вариации температуры и плотности нейтральной компоненты в нижней термосфере во многом определяются влиянием атмосферных волн и турбулентности.

6. Параметры атмосферных волн и неустойчивостей среды определены на основе одновременных измерений скорости вертикального движения, температуры и плотности нейтральной компоненты и анализа их высотно-временных вариаций.

7. Исследование динамики D-области после наземного промышленного взрыва показало полное разрушение ИПН вследствие распространения до этих высот внутренних гравитационных волн, инициированных взрывом.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕЗОТЕРМОСФЕРЫ

Краткий обзор результатов, полученных методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН, убедительно показывает, что использование нагревного стенда для создания и диагностики искусственных возмущений в плазме позволяет изучать широкий спектр атмосферных явлений, получать информацию о важнейших параметрах мезосферы и нижней термосферы. В перспективе все разработанные способы диагностики ионосферы и нейтральной атмосферы методом создания и локации ИПН могут быть объединены в одну комплексную методику, которая позволит проводить мониторинг окружающей среды в интервале высот 60–350 км. Регулярность применения разработанного метода обеспечит мониторинг мезосферы и нижней термосферы с высотным разрешением порядка 1 км, временным разрешением 15 с и погрешностью определения параметров не более 3–10%. Его особенность заключается в том, что методом, основанным на высокочастотном воздействии на ионосферу излучением мощного нагревного стенда, определяются параметры регулярной, то есть невозмущенной, среды. Установка для ионосферного мониторинга с помощью ИПН может быть создана на базе любого нагревного стенда. Международное сотрудничество позволит реализовать данный метод диагностики ионосферы на всех имеющихся нагревных стендах и проводить скоординированные исследования в различных широтных и долготных зонах. Разработан и апробирован в исследованиях ионосферы двухчастотный метод создания ИПН с разными пространственными масштабами, который позволяет существенно улучшить точность определения атмосферных и ионосферных параметров. Прикладным развитием метода могло бы служить создание «наклонных» ИПН двумя мощными встречно работающими передатчиками с целью осуществления дальней радиосвязи путем запитки ионосферного волноводного канала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00293), часть результатов получена в рамках государственного задания Минобрнауки (проект № 5.8092.2017/8.9).

## Список используемых источников

1. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей / В.В. Беликович, Е.А. Бенедиктов, А.В. Толмачева, Н.В. Бахметьева. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. – 155 с.

2. Заходно-восходные характеристики спорадических слоев ионизации в нижней ионосфере, наблюдаемые методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы / Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович, Л.М. Каган, А.А. Понятов // Известия вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48, № 1. – С. 16–32.

3. Нижняя ионосфера Земли во время частных солнечных затмений по наблюдениям вблизи Нижнего Новгорода / Н.В. Бахметьева, В.Д. Вяхирев, Е.Е. Калинина, Г.П. Комраков // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57, № 1. – С. 64–78.

4. Вертикальные движения в нижней ионосфере во время наземного промышленного взрыва / Н.В. Бахметьева, В.В. Беликович, Е.А. Бенедиктов и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1996. – Т. 36, № 6. – С. 43–50.

5. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Толмачева А.В. Искусственные периодические неоднородности, гидродинамические неустойчивости и динамические процессы в мезосфере – нижней термосфере // Известия вузов. Радиофизика. – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 695–711.

6. Atmospheric Turbulence and Internal Gravity Waves Examined by the Method of Artificial Periodic Irregularities / N.V. Bakhmet'eva, G.I. Grigoriev, A.V. Tolmacheva, and E.E. Kalinina // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2018. – Vol. 12, No. 3. – P. 510–521.

М.А. Бисярин,

*доктор физико-математических наук*

Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

## **ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННЫХ СВОЙСТВ ВОЛНОВОДНОГО КАНАЛА НА МОДОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОГИБАЮЩУЮ МОЩНОГО СИГНАЛА**

Исследован процесс распространения мощного импульса с амплитудной модуляцией в плоскостойком волноводном канале. Моделирование процесса осуществлено посредством обобщения нелинейного волнового уравнения, учитывающего материальную дисперсию среды. Использована реалистичная модель волноводного канала, включающая в себя его продольную неоднородность и наличие оболочечных слоев. Разработана последовательная асимптотическая процедура решения модельного уравнения, позволяющая оценить влияние материальной и волноводной дисперсии как на модовую структуру импульса, так и на нелинейную динамику его огибающей.

Ключевые слова: природный волноводный канал, материальная дисперсия, волноводная дисперсия, нелинейные волны, огибающая импульса, моды волновода, нелинейное уравнение Шрёдингера с переменными коэффициентами.

### **ВВЕДЕНИЕ**

В ходе некоторых естественных процессов или определенного целенаправленного воздействия в природных средах формируются пространственные структуры, локализирующие возбуждаемые в них волновые процессы и делающие возможным распространение сигналов на расстояния, недостижимые в обычных условиях. Сами волновые процессы могут быть различной физической природы, а канал образуется за счет соответствующего распределения скорости распространения волн. Формирование акустических каналов в атмосфере исследовалось авторами [1,2], отмечались [3] особые инфразвуковые каналы в периоды полярных сияний. Аналогичные явления исследовались для быстрых магнито-звуковых [4] и внутренних гравитационных [5] волн в атмосфере. Волноводные каналы электромагнитных волн высокочастотных диапазонов создаются путем воздействия на верхнюю ионосферу мощными импульсами [6, 7], а распространение волн низкочастотных диапазонов определяется процессами в нижней ионосфере [8].

Повышение мощности сигналов имеет следствием возбуждение в среде нелинейных эффектов: характеристики среды начинают зависеть от мощности сигнала. В работе [9] исследован нелинейный режим распространения акустического импульса и показано, что система гидродинамических уравнений Эйлера сводится к нелинейному волновому уравнению с квадратичной зависимостью скорости звука от его амплитуды. Ранее [10] это уравнение было применено к описанию распространения мощных электромагнитных импульсов в диэлектриках со специфическими профилями показателя преломления. Таким образом, волноводное распространение волн различной физической природы имеет ряд общих черт и может описываться универсальным математическим аппаратом.

При исследовании волновых процессов необходимо должным образом учитывать дисперсионные свойства среды. Вынужденные колебания электронов и ионов под действием переменного электромагнитного поля обуславливают дисперсию электромагнитных волн (например, радиоволн в ионосфере). Считается, что распространение акустических волн подвержено дисперсии незначительно. Тем не менее, при наличии термодинамически неравновесной компоненты в среде протекают релаксационные процессы, время установления термодинамических параметров становится конечным, и фазовая скорость акустических

волн начинает заметно зависеть от частоты. В дополнение к материальной дисперсии при волноводном распространении проявляются эффекты, обусловленные самим наличием волноводного канала. Распространение волн любой физической природы в соответствующем волноводном канале происходит в виде набора мод, постоянные распространения которых непропорционально зависят от частоты вследствие граничных условий (причем эта зависимость количественно различна для различных мод). Это явление называют волноводной дисперсией.

Материальная и волноводная дисперсии могут проявляться в различных соотношениях для волн различной физической природы. Актуальной остается проблема аналитического описания их совместного воздействия на процесс распространения мощного модулированного импульса в волноводном канале с продольной неоднородностью, а также реалистичного учета свойств оболочечных слоев. Разработке соответствующего аналитического метода и посвящена настоящая работа.

## МОДЕЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ И АНЗАЦ

Рассмотрим плоскостойкий волноводный канал, образованный за счет подходящей зависимости показателя преломления  $\beta(n,s)$  от поперечной координаты  $n$ , при этом допускается слабая зависимость от продольной координаты  $s$ . Мощность распространяющегося импульса предполагается достаточно высокой для возбуждения нелинейных эффектов, так что квадрат показателя преломления  $f(u^2, n, s)$  включает в себя дополнительное слагаемое, пропорциональное второй степени волнового поля  $u$ . Тем не менее, предположение о слабой нелинейности процесса означает, что эта добавка мала по сравнению с линейной частью, то есть волновое поле является величиной порядка  $\varepsilon \ll 1$ . Свойства волноводного канала могут меняться в продольном направлении, однако скорость таких изменений должна быть много меньше скорости изменения в поперечном сечении. Это обстоятельство учтем, приняв в качестве продольной переменной сжатую продольную координату  $s \sim \varepsilon^2$  с коэффициентом сжатия, пропорциональным квадрату малого параметра. Материальная дисперсия среды волноводного канала характеризуется функцией  $\Gamma(s)$ , пропорциональной  $\frac{d^2k}{d\omega^2}$  для монохроматических волн в неограниченной среде.

Моделирование распространения импульса в акустическом волноводном канале на базе нелинейного волнового уравнения [9] позволило описать волноводную дисперсию, однако без учета материальной дисперсии, заполняющей волноводный канал среды. В настоящей работе на основе анализа линейного режима распространения волнового пакета в диспергирующей среде постулируется

$$\Delta u - f(u^2; n, s) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - i\Gamma(s) \frac{\partial^3 u}{\partial t^3} = 0 \quad (1)$$

в качестве модельного уравнения. Уравнение (1) записано с использованием безразмерных координат и времени. Локализация волнового поля в пределах волноводного канала формально выражается граничным условием

$$\lim_{n \rightarrow \pm\infty} u = 0. \quad (2)$$

Представим квадрат показателя преломления в виде

$$f(u^2; n, s) = \beta^2(n, s) + \frac{1}{2} \alpha(n, s) |u|^2 \quad (3)$$

суммы линейной части и малой нелинейной добавки. Подчеркнем, что волноводная структура создается благодаря зависимости  $\beta$  от поперечной координаты  $n$ , виды такой зависимости представлены на рис. 1. Квадратичный профиль допускает полное аналитическое описание в



элементарных функциях, однако является физически неадекватным на больших расстояниях от оси. Ступенчатый же профиль более соответствует искусственным волноводам с диэлектрическим заполнением, для описания природного волноводного канала такая зависимость представляется излишне грубой.

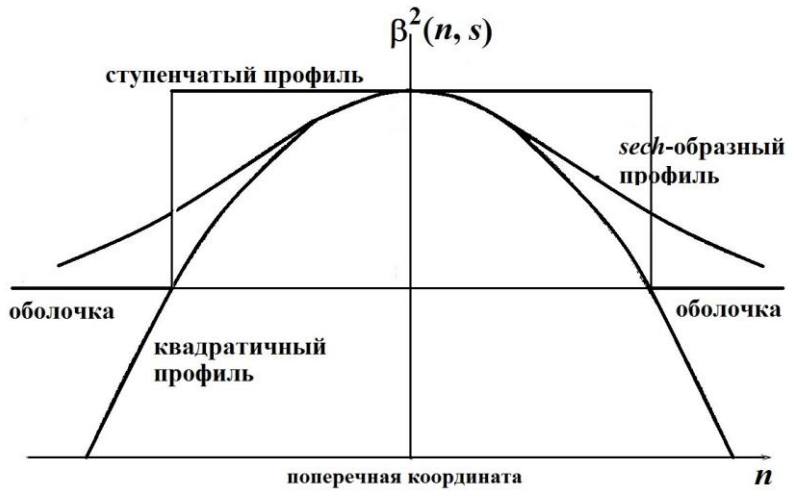


Рис. 1. Используемые при моделировании типичные профили квадрата показателя преломления в поперечном сечении волноводного канала

В данной работе принимается sech-образная зависимость

$$\beta^2(n, s) = \beta_1^2(s) + \frac{\beta_2^2(s)}{\text{ch}^2(\beta_3(s)n)} \quad (4)$$

линейной части квадрата показателя преломления. Нелинейность же процесса (второе слагаемое в (3)) проявляется в продольной динамике импульса.

Решение уравнения (1) ищется в виде

$$u = \varepsilon U(n, \theta, s, \varepsilon) \exp\left(i\left(\frac{1}{\varepsilon^2} \int_0^s r(s') ds'\right) - t\right), \quad (5)$$

где

$$\theta = \int_0^s q(s') ds' - t \quad (6)$$

представляет собой фазу огибающей. Отметим, что фаза огибающей (6) отличается от фазы несущей в (5), что является принципиальным для исследуемого процесса. Комплексная амплитуда  $U$  разлагается в ряд по степеням малого параметра  $U(n, \theta, s, \varepsilon) = \sum_{j=0}^{\infty} \varepsilon^j U_j(n, \theta, s)$ , все

члены этого ряда должны удовлетворять условию (2).

## ПОСТОЯННЫЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ПОЛЯ МОД

Подставляя анзац (5), (6) и выражение (3) в модельное уравнение (1), получаем серию уравнений относительно слагаемых  $U_j$ . Условие (2) накладывает ограничения на их правые части, и условия разрешимости вместе с самими уравнениями позволяют определить все характеристики импульса. В главном порядке по  $\varepsilon$  получается уравнение

$$\frac{\partial^2 U_0}{\partial n^2} + (\beta^2(n, s) - r^2(s) + \Gamma(s)) U_0 = 0 \quad (7)$$

с условием локализации (2). Это задача Штурма – Лиувилля на бесконечном интервале по  $n$ , ее собственные числа  $r^2(s)$  и собственные функции  $U_0$  могут быть представлены в явном виде для поперечных профилей, изображенных на рис. 1. Для профиля (4) без учета материальной дисперсии ( $\Gamma=0$ ) задача (7) рассматривалась в работе [11]. С использованием методов [10] в данной работе оценивается влияние оболочки с показателем преломления  $\beta_1(s)$  и материальной дисперсии на исследуемый процесс.

Структура уравнения (7) допускает представление решения в виде произведения  $U_0(n, \theta, s) = V(n, s)E(\theta, s)$ , в котором функция  $V$  нормирована условием  $\int_{-\infty}^{\infty} V^2(n, s)dn = 1$ . Ею описывается поперечное распределение поля распространяющейся моды, медленно меняющееся вследствие зависимости от продольной координаты. Функция  $E(\theta, s)$  характеризует огибающую импульса, ее динамика определяется на последующем шаге асимптотической процедуры.

Используя результаты [11], можно показать, что собственное число задачи (7)

$$r^2(s) = \beta_1^2(s) + \beta_3^2(s)K^2(s) + \Gamma(s). \quad (8)$$

Здесь  $K(s) = \sqrt{\frac{\beta_2^2(s)}{\beta_3^2(s)} + \frac{1}{4}} - l - \frac{1}{2}$ , модовый индекс  $l$  опускаем, так как считаем, что несущая

импульса образована единственной модой. Волноводная дисперсия предполагает зависимость постоянной распространения  $r(s)$  от частоты, эта зависимость восстанавливается при подстановке в (8) размерных физических величин. Поперечное распределение поля  $V(n, s)$  выражается через гипергеометрическую функцию [11].

Ранее в [10] были получены формулы для  $r^2(s)$  и  $V(n, s)$  в случае квадратичного профиля квадрата показателя преломления. Сравнение результатов показывает, что при реалистичном профиле (4) постоянные распространения приобретают большие значения.

## ОГИБАЮЩАЯ ИМПУЛЬСА

Следуя методике [10], получаем уравнение для огибающей

$$2ir(s)\frac{\partial E}{\partial s} + (g_1(s) + g_2(s))\frac{\partial^2 E}{\partial \theta^2} + ir'(s)E + h(s)|E|^2 E = 0, \quad (9)$$

нелинейное уравнение Шрёдингера с коэффициентами, различными для различных мод и зависящими от продольной координаты. Как и в случае постоянных коэффициентов, это уравнение имеет солитоноподобные решения (огибающая короткого импульса), причем коэффициент  $g_1(s) + g_2(s)$  в значительной степени обуславливает свойства солитона. В уравнении (9) функции  $g_1(s)$  и  $h(s)$  определяются аналогичными соотношениями из [9, 10],  $g_1(s)$  отражает волноводную дисперсию, в то время как величина  $g_2(s)$  характеризует эффект материальной дисперсии. Формулы для коэффициентов не приведены из-за их громоздкости.

В случае электромагнитных волн вклад волноводной дисперсии составляет примерно 0,7% для профиля (4) и еще менее – для квадратичного профиля. В волновых процессах акустической природы материальная дисперсия проявляется незначительно, и для них вклады материальной и волноводной дисперсий могут оказаться соизмеримыми.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нелинейная динамика огибающей короткого импульса в плоскостойном волноводном канале значительно зависит от дисперсионных свойств этой пространственной структуры.

Существовавшая методика описания процесса распространения, основанная на нелинейном волновом уравнении, удовлетворительно определяла частотные зависимости постоянных распространения, обусловленные структурой и параметрами канала, но не учитывала материальную дисперсию среды заполнения. Предложенная модернизация исходного модельного уравнения обеспечивает включение материальной дисперсии в рассмотрение и позволяет отдельно оценить влияние материальной и волноводной дисперсии на характеристики распространяющихся мод несущей и на нелинейную динамику огибающей. Численные оценки показывают вклады обоих видов дисперсии в параметры импульса. Они подтверждают необходимость учета материальной дисперсии и оболочечных слоев, и предложенная методика адекватно этот учет осуществляет.

### Список используемых источников

1. *Diamond M.* Sound channels in the Atmosphere // *Journal of Geophysical Research.* –1963. – Vol. 68, № 11. – P. 3459–3464.
2. *Sorokin A.G., Lobycheva I.Y.* On simulation of the atmospheric acoustic channel for some nuclear tests in former Soviet test site Semipalatinsk // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics.* –2011. – Vol. 73. – P. 1629–1635.
3. *Wilson C.R.* Auroral infrasonic waves // *Journal of Geophysical Research.* –1969. –Vol. 74, № 7. – P. 1812–1836.
4. *Белашов В.Ю., Белашова Е.С.* Нелинейная динамика 3D пучков БМЗ волн, распространяющихся в плазме ионосферы и магнитосферы // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2016. – Т. 56, № 6. – С. 755–762.
5. Внутренние гравитационные волны в нижней термосфере с линейным профилем температуры: теория и эксперимент / Н.В. Бахметьева, Г.И. Григорьев, А.В. Толмачева, Е.Е. Калинина, М.Н. Егерев // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2017. – Т. 60, № 2. – С. 113–123.
6. *Черкашин Ю.Н., Ерёмченко В.А.* Искусственное поддержание нелинейных волноводов в нестационарной плазме // *Сборник докладов XXIII Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн.* – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2011. – Т. 1. – С. 129–134.
7. Диагностика генерации, релаксации и переноса искусственных плазменных возмущений с помощью коротких импульсов мощного радиоизлучения / Е.Н. Сергеев, С.М. Грач, В.Л. Фролов, А.В. Шиндин // *Известия вузов. Радиофизика.* – 2016. – Т. 59, № 11. – С. 977–990.
8. Пространственно-временные распределения электронной плотности в ионосфере по данным регистрации полного электронного содержания и фазы ОНЧ-сигналов / Б.Г. Гаврилов, Ю.И. Зецер, А.Н. Ляхов, Ю.В. Поклад, И.А. Ряховский // *Геомагнетизм и аэронавигация.* – 2017. – Т. 57, № 3. – С. 500–509.
9. *Бисярин М.А.* Нелинейное распространение акустического сигнала в неоднородном волноводном канале // *Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского.* – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 653. – С. 25–29.
10. *Молотков И.А., Вакуленко С.А., Бисярин М.А.* Нелинейные локализованные волновые процессы. – М.: Янус-К, 1999. – 176 с.
11. *Бисярин М.А.* Влияние неоднородной оболочки градиентного оптического волновода на модовые характеристики и характеристики огибающей солитонного импульса // *Оптика и спектроскопия.* – 2013. – Т. 114, № 6. – С. 993–997.

Н.Ф. Благовещенская\*,  
*доктор физико-математических наук;*  
Т.Д. Борисова\*,  
*кандидат физико-математических наук;*  
Т. Йоман\*\*,  
*доктор наук;*  
А.С. Калишин\*,  
*кандидат технических наук*

\* Арктический и антарктический научно-исследовательский институт Росгидромета, г. Санкт-Петербург;

\*\* Лейсестерский университет, г. Лейсестер

## МЕЛКОМАСШТАБНЫЕ ИСКУССТВЕННЫЕ ИОНОСФЕРНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ: НАБЛЮДЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик, условий и возможных механизмов генерации мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН) в F-области высокоширотной ионосферы, вызванных контролируемой инъекцией мощных КВ радиоволн. Результаты базируются на большом объеме экспериментов, выполненных в 2010–2016 годах на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating вблизи г. Тромсё. Основное внимание уделено характеристикам МИИН при воздействии на ионосферную плазму мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации при нагреве на частотах как выше, так и ниже критической частоты слоя F2.

Ключевые слова: мощная КВ радиоволна, поляризация, высокоширотная ионосфера, искусственные ионосферные неоднородности, неустойчивость, механизм генерации.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение особенностей взаимодействия мощных КВ радиоволн с ионосферной плазмой Земли относится к числу активно разрабатываемых проблем физики ионосферной плазмы. Для модификации верхней ионосферы (F-область) традиционно на всех нагревных комплексах мира используются мощные КВ радиоволны обыкновенной поляризации (O-мода) на частотах нагрева  $f_H$ , ниже критической частоты слоя F2 ( $f_H < foF2$ ). Это объясняется тем, что в соответствии с теоретическими представлениями мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода) не может возбуждать искусственную ионосферную турбулентность в F-области [1, 2]. Тем не менее, результаты многочисленных экспериментов, выполненных специалистами ААНИИ на КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating, убедительно продемонстрировали, что мощная КВ радиоволна необыкновенной поляризации (X-мода), инжектируемая в высокоширотную F-область ионосферы параллельно магнитному полю (в магнитный зенит) вызывает генерацию мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), искусственное оптическое излучение в красной (630 нм) и зеленой (557,7 нм) линиях атомарного кислорода, возбуждение ленгмюровских и ионно-акустических плазменных волн и разнообразных спектральных компонент в узкополосном искусственном радиоизлучении [3–7]. Следует подчеркнуть, что искусственные ионосферные возмущения оказывают критическое влияние на работу радиотехнических систем различного назначения, включая загоризонтную радиолокацию, системы связи (в том числе и спутниковые) и приводят к навигационным ошибкам при использовании ГЛОНАСС и GPS.

Целью настоящей работы является исследование условий и механизмов генерации, а также характеристик мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей (МИИН), возбуждаемых в F-области высокоширотной ионосферы мощной КВ радиоволной X-поляризации. Предполагается также выполнить сравнение характеристик МИИН при O- и X-нагреве в диапазоне частот нагрева  $f_H = 4,0–8,0$  МГц при различных отношениях частоты нагрева к критической частоте слоя F2.

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЙ

Для модификации высокоширотной  $F$ -области ионосферы мощными КВ радиоволнами использовался КВ нагревной комплекс EISCAT/Heating ( $69,6^\circ\text{N}$ ,  $19,2^\circ\text{E}$ ,  $L=6,2$ ,  $I=78^\circ$ ), расположенный в г. Тромсё, северная Норвегия. Эксперименты проводились в 2010–2016 годах в дневные и вечерние часы. Мощная КВ радиоволна обыкновенной (О-мода) или необыкновенной (Х-мода) поляризации излучалась на частотах от 4,0 до 8,0 МГц в направлении магнитного зенита (диаграмма направленности антенны комплекса EISCAT/Heating была наклонена на  $12^\circ$  от вертикали к югу). Эффективная мощность излучения в различных экспериментах составляла  $P_{\text{эфф}} = 100\text{--}650$  МВт. Просачивание О-волны при Х-нагреве и Х-волны при О-нагреве не превышала 1%.

Диагностика МИИН осуществлялась с использованием когерентного КВ радар CUTLASS (SuperDARN) [8] в Финляндии ( $63^\circ\text{N}$ ,  $27^\circ\text{E}$ ), находящегося примерно на 1000 км южнее КВ нагревного комплекса в Тромсё. CUTLASS излучал на узконаправленную антенну с шириной луча примерно  $3.3^\circ$ , ориентированную на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё («луч» 5). Измерения проводились на трех частотах с разрешением по дальности 15 км. Дополнительно использовался многоканальный приемный КВ доплеровский комплекс, установленный на обсерватории ААНИИ «Горьковская» под г. С.–Петербург, который обеспечивал прием диагностических КВ сигналов, ракурсно рассеянных от МИИН. Для анализа результатов привлекался EISCAT радар некогерентного рассеяния радиоволн (НР) на частоте 930 МГц, расположенный в непосредственной близости от нагревного комплекса. Выбор и контроль частот нагрева осуществлялся по данным ионозонда в Тромсё.

## РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ результатов многочисленных экспериментов по диагностике мелкомасштабных искусственных неоднородностей (МИИН) при Х-нагреве высокоширотной  $F$ -области ионосферы в широком диапазоне частот нагрева ( $f_{\text{H}} = 4,0\text{--}8,0$  МГц) показал, что возбуждение МИИН происходило при спокойных магнитных условиях (отсутствие высыпаний, спорадических слоев в Е-области, продольных токов, электроджета). При этом генерация МИИН при Х-нагреве происходила на частотах нагрева как ниже, так и существенно выше (до 2 МГц) критической частоты слоя  $F2$  ( $f_{\text{H}}/foF2 \leq 1$  и  $f_{\text{H}}/foF2 > 1$ ). Отметим, что возбуждение МИИН при О-нагреве принципиально возможно только при  $f_{\text{H}} \leq foF2$ .

На рис. 1 приведены результаты наблюдений рассеянных на МИИН сигналов одновременно на нескольких частотах с помощью радара CUTLASS (SuperDARN) в Ханкасалми (Финляндия) в период экспериментов 26.10.2013 и 20.10.2016. Мощная КВ радиоволна О- или Х-поляризации излучалась в направлении магнитного зенита циклами 10 мин нагрев, 5 мин пауза. Двадцатого октября 2016 года (рис. 1, а, б) мощная КВ радиоволна излучалась на низкой частоте  $f_{\text{H}} = 4,543$  МГц с эффективной мощностью излучения  $P_{\text{эфф}} = 150$  МВт. Двадцать шестого октября 2013 года (рис. 1, в, г) волна накачки излучалась на высокой частоте  $f_{\text{H}} = 6,96$  МГц с  $P_{\text{эфф}} = 550$  МВт. Измерения выполнялись одновременно на трех частотах от 12 до 20 МГц, соответствующих обратному рассеянию от МИИН с поперечными масштабами  $l_{\perp}$  от 12,5 до 7,5 м. Разрешение по дальности (range gate) составляло 15 км, при этом «первые ворота» начинались с дальности 480 км. Регистрация рассеянных на МИИН сигналов проводилась в диапазоне дальностей от 780 до 1080 км, соответствующих «воротам» с 20 до 40. В период эксперимента 20 октября 2016 года значения  $foF2$  постепенно уменьшались от 5,5 МГц в 14:15 UT до 4,1 МГц в 16:00 UT, т. е. нагрев на частоте 4,543 МГц проводился на частотах сначала ниже, а затем с 15:30 UT – выше критической частоты. Двадцать шестого октября 2013 года, когда значения  $foF2$  плавно уменьшались от 7,9 МГц в 16:00 UT до 6,8 МГц в 16:45 UT, нагрев ионосферы производился на частотах ниже и вблизи  $foF2$ .

Анализ всего объема экспериментальных данных позволил установить, что на низких частотах нагрева ( $f_H = 4,0\text{--}5,4$  МГц) время релаксации МИИН при Х-нагреве существенно больше, чем на высоких частотах нагрева ( $f_H = 6,0\text{--}8,0$  МГц). При этом время релаксации МИИН существенно зависят от предыстории нагрева. Для определения порогов возбуждения МИИН при Х-нагреве была выполнена серия экспериментов при ступенчатом возрастании эффективной мощности излучения. Результаты этих экспериментов показали, что пороги возбуждения МИИН при Х-нагреве выше, чем при О-нагреве. Характеристики МИИН при О- и Х-нагреве сведены в табл. 1.

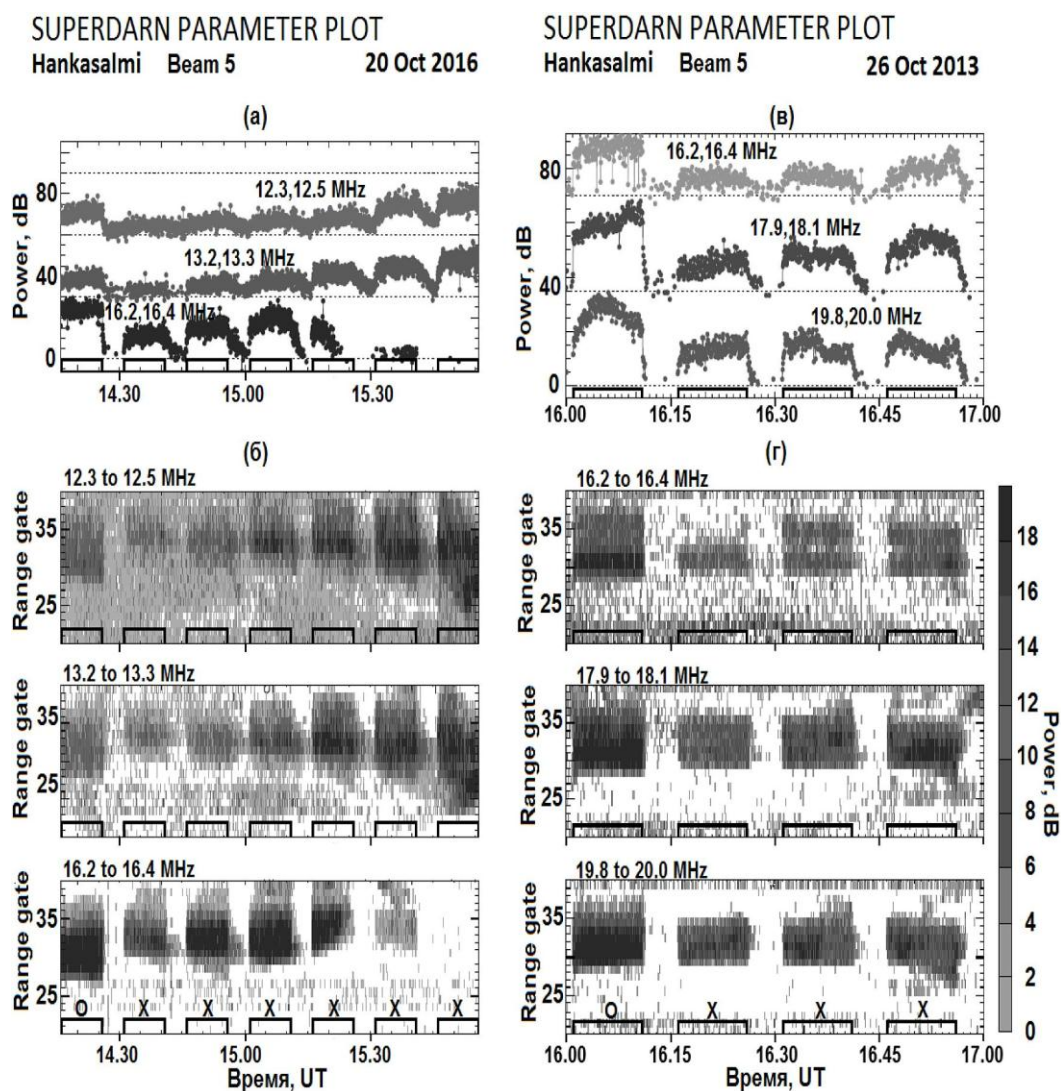


Рис. 1. Данные наблюдений с помощью когерентного КВ доплеровского радара CUTLASS в Ханкасалми, Финляндия (луч 5, ориентированный на искусственно возмущенную область ионосферы над Тромсё) в период экспериментов:

а, б – 20 октября 2016 года на частоте нагрева  $f_H = 4,543$  МГц;

в, г – 26 октября 2013 года на  $f_H = 6,96$  МГц

На панелях (а) и (в) приведены усредненные мощности рассеянных на МИИН сигналов в искусственно возмущенной области ионосферы на трех частотах. Панели (б) и (г) показывают поведение мощности рассеянных на МИИН сигналов в зависимости от дальности (range gate) и мирового времени UT. Циклы нагрева и используемая поляризация мощной КВ радиоволны показаны на нижней панели на оси времени.

Таблица 1

**Характеристики мелкомасштабных искусственных ионосферных неоднородностей при X- и O-нагреве F-области высокоширотной ионосферы**

Характеристика	X-мода поляризации	O-мода поляризации
Условия возбуждения	$f_H \leq foF2; f_H > foF2$ (до 2 МГц)	$f_H \leq foF2$
Масштаб, $l_{\perp}$ , м	7,5–15	7,5–15
Время нарастания, с	12–120	3–9
Время релаксации, с	40–300 и более	12–30
Порог возбуждения на низкой частоте нагрева ( $f_H = 4,0$ МГц), МВт	60	8–10
Порог возбуждения на высокой частоте нагрева ( $f_H = 8,0$ МГц), МВт	150	26

Механизм генерации МИИН при X-нагреве на частотах как  $f_H \leq foF2$ , так и  $f_H > foF2$ , остается недостаточно ясным. В работе [8] был предложен двухступенчатый механизм генерации МИИН при X-нагреве. На первом этапе образуются крупномасштабные неоднородности вследствие самофокусирующей неустойчивости. На втором этапе вследствие температурной градиентно-дрейфовой неустойчивости возбуждаются мелкомасштабные МИИН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По данным многочисленных экспериментов ААНИИ, выполненных на высокоширотном КВ нагревном комплексе EISCAT/Heating (2010–2016), впервые показана возможность и исследованы характеристики интенсивных возмущений в высокоширотной F-области ионосферы, вызванных воздействием мощных КВ радиоволн необыкновенной (X-мода) поляризации.

2. Показано, что мелкомасштабные искусственные ионосферные неоднородности (МИИН) с поперечными к магнитному полю масштабами  $l_{\perp} \approx 7,5–15$  м при X-нагреве высокоширотной F-области ионосферы возбуждаются в регулярной ионосфере при спокойных условиях (отсутствие высыпаний, спорадических слоев в E-области, продольных токов, электроджета). При этом генерация МИИН при X-нагреве происходит на частотах нагрева как ниже, так и существенно выше (до 2 МГц) критической частоты слоя F2, в то время как возбуждение МИИН при O-нагреве принципиально возможно только при  $f_H \leq foF2$ .

3. Установлено, что характеристики МИИН при X-нагреве (время нарастания и релаксации, пороговые мощности возбуждения) существенно зависят от предыстории и частоты нагрева.

4. МИИН, возбуждаемые при O- и X-нагреве, имеют существенно различное время нарастания и релаксации и пороги возбуждения. В диапазоне частот нагрева  $f_H \leq foF2$  генерация МИИН при X-нагреве сосуществует с возбуждением интенсивных ленгмюровских и ионно-акустических волн в течение всего цикла нагрева.

## Список используемых источников

1. Гуревич А.В. Нелинейные явления в ионосфере // Успехи физических наук. – 2007. – Т. 177, № 11. – С. 1145–1177.
2. Robinson T.R. The heating of the high latitude ionosphere by high power radio waves // Physics Reports. – 1989. – Vol. 179. – P. 79–209.

3. Artificial field-aligned irregularities in the high-latitude F region of the ionosphere induced by an X-mode HF heater wave / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T. Yeoman T. et al. // *Geophysical Research Letters*. – 2011. – Vol. 38. – P. 100–120.
4. Optical and Ionospheric Phenomena at EISCAT under Continuous X-mode HF Pumping / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, M. Kosch et al. // *Geophysical Research Space Physics*. – 2014. – Vol. 119. – P. 10483–10498.
5. Modification of the high latitude ionosphere F region by X-mode powerful HF radio waves: Experimental results from multi-instrument diagnostics / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, T.K. Yeoman et al. // *Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. – 2015. – Vol. 135. – P. 50–63.
6. First observations of electron gyro-harmonic effects under X-mode HF pumping the high latitude ionospheric F-region / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, A.S. Kalishin et al. // *Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*. – 2017. – Vol. 155. – P. 36–49.
7. Сравнение эффектов воздействия мощных КВ радиоволн обыкновенной (О-мода) и не-обыкновенной (Х-мода) поляризации на высокоширотную F-область ионосферы / Н.Ф. Благовещенская, Т.Д. Борисова, А.С. Калишин и др. // *Космические исследования*. – 2018. – Т. 56, №1. – С. 14–29.
8. *Borisov N., Honary F., Li H.* Excitation of plasma irregularities in the F-region of the ionosphere by powerful HF radio waves of X-polarization // *Geophysical Research Space Physics*. – 2018. – Vol. 123. – P. 5246–5260.



К.Л. Восканян\*,  
кандидат физико-математических наук;  
И.С. Заморин\*;  
А. Д. Кузнецов\*,  
доктор физико-математических наук, профессор;  
О. С. Сероухова\*,  
кандидат физико-математических наук, доцент;  
Т. Е. Симакина\*,  
кандидат физико-математических наук, доцент;  
А. С. Солонин\*\*,  
доктор физико-математических наук, профессор

\* Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург;

\*\* ООО «Институт радарной метеорологии»

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ ДОПЛЕРОВСКИМИ ЛОКАТОРАМИ

Дана оценка способности обнаружения метеорологических объектов доплеровскими МРЛ, установленными в аэропорту Пулково и по адресу Малоохтинский пр., 98 города Санкт-Петербурга, по массиву из 2100 случаев опасных явлений погоды.

Ключевые слова: доплеровские метеорологические радиолокаторы, наземные метеорологические станции, опасные явления погоды, грозы, атмосферные осадки.

### ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы являлась оценка способности обнаружения таких опасных явлений погоды, как грозы и ливни двумя доплеровскими МРЛ, установленными в аэропорту Пулково города Санкт-Петербурга и на здании РГГМУ. Схема такого расположения ДМРЛ представлена на рис. 1, а.

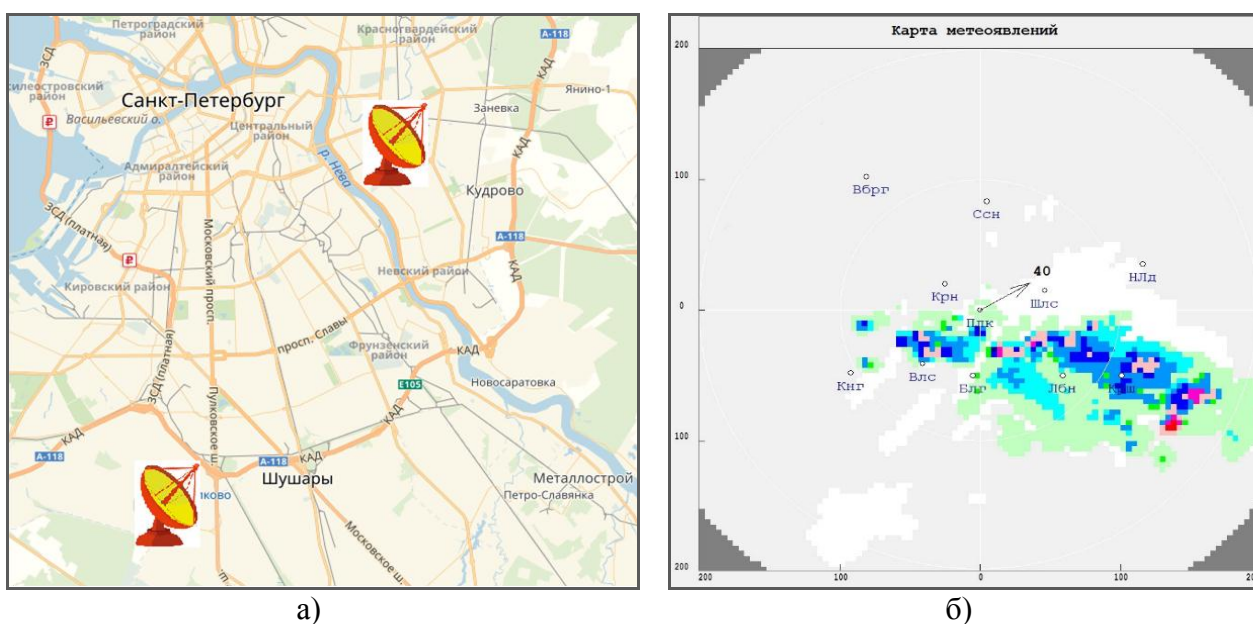


Рис. 1. Схема местоположения ДМРЛ (а) и наземных метеорологических станций (отмечены кружками) на фоне радиолокационных данных (б)

Для оценки эффективности работы ДМРЛ в работе оценивались оправдываемость обнаружения и вероятности пропуска ОЯП доплеровскими МРЛ, а также значения достоверности обнаружения и вероятности «ложной тревоги». Для получения указанных оценок данные ДМРЛ сравнивались с показаниями десяти наземных метеорологических станций (МС) Ленинградской области. Схема расположения этих станций представлена на рис. 1, б. Сопоставление данных МС и ДМРЛ проводилось в радиусе 140 км относительно ДМРЛ. Сравнивались грозы и ливни за четыре месяца летних периодов 2012–2013 годов, при этом было рассмотрено 2100 случаев с ОЯП.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Пример результатов, полученных при вычисления вероятностей оправдываемости и достоверности гроз и осадков, представлен на рис. 2. Синие столбцы – вероятности осадков по данным ДМРЛ РГГМУ, красные – по данным ДМРЛ Пулково.

Средние значения рассчитанных показателей для двух локоаторов представлены в табл. 1.

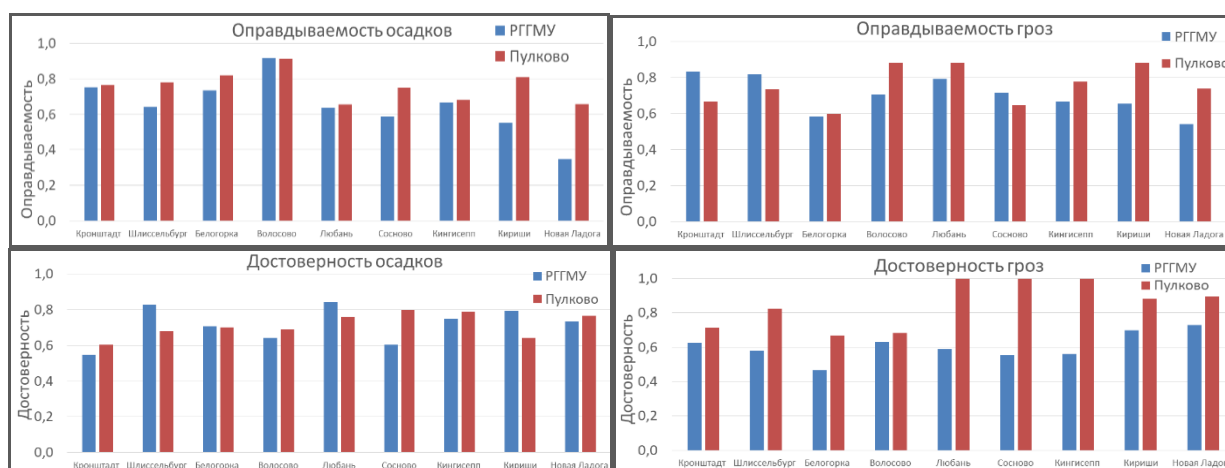


Рис. 2. Оправдываемость и достоверность гроз и осадков по данным ДМРЛ РГГМУ и Пулково

Таблица 1

### Показатели эффективности обнаружения метеорологических объектов двумя ДМРЛ

Показатели	ДМРЛ РГГМУ	ДМРЛ Пулково
<i>Осадки</i>		
Средняя оправдываемость $P_O$	0,65	0,76
Средняя достоверность $P_D$	0,72	0,71
Вероятность пропуска	0,35	0,24
Вероятность «ложной тревоги»	0,28	0,29
Корреляция $P_O$ РГГМУ – $P_O$ Пулково	0,68	
Корреляция $P_D$ РГГМУ – $P_D$ Пулково	0,20	
<i>Грозы</i>		
Средняя оправдываемость $P_O$	0,70	0,76
Средняя достоверность $P_D$	0,60	0,85
Вероятность пропуска	0,30	0,24
Вероятность «ложной тревоги»	0,40	0,15
Корреляция $P_O$ РГГМУ – $P_O$ Пулково	0,13	
Корреляция $P_D$ РГГМУ – $P_D$ Пулково	0,13	

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате сравнения массива радиолокационных обзоров с измерениями на десяти метеостанциях за теплые месяцы 2012–2013 годов сделаны следующие выводы.

Оправдываемость обнаружения гроз и осадков двумя локами находится в диапазоне 0,55–0,9, за исключением станции в Новой Ладого, где оправдываемость обнаружения осадков локом РГГМУ составила 0,35. Оправдываемость обнаружения осадков локом Пулково несколько выше, чем локом РГГМУ, следовательно вероятность пропустить осадки ниже по данным Пулково. Коэффициент корреляции между значениями оправдываемости осадков 0,7. В оправдываемости обнаружения гроз ни у какого лока преимущества нет. В среднем значения оправдываемости осадков двумя ДМРЛ отличаются на 11%, гроз – на 5%.

Достоверность обнаружения гроз обоими ДМРЛ составила интервал 0,5–1, осадков – 0,6–0,8. Причем достоверность гроз, определенная пулковским локом, выше в среднем на 25%, поэтому вероятность «ложной тревоги» ниже, чем по данным лока РГГМУ. Достоверность обнаружения осадков примерно одинакова у двух локов, отличия составили в среднем 1%.

Пространственный анализ эффективности обнаружения метеорологических объектов локами представлен на рис. 3.

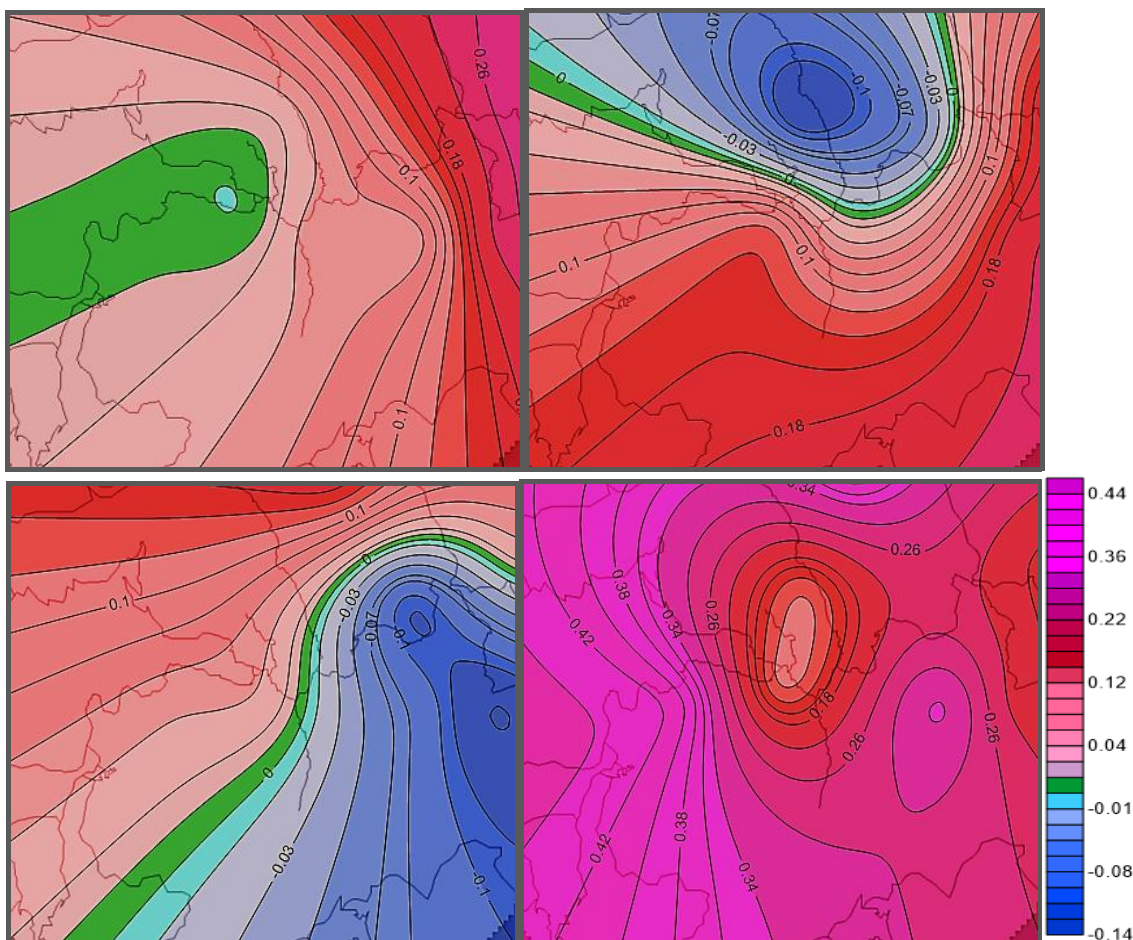


Рис. 3. Разность оправдываемости и достоверности осадков и гроз по данным ДМРЛ Пулково и РГГМУ. Положительные значения – преимущество ДМРЛ Пулково, отрицательные – ДМРЛ РГГМУ

С помощью интерполяции рассчитанных значений вероятностей методом радиальных базовых функций сформированы поля оправдываемости и достоверности осадков и гроз. Затем вычитанием изображений каждого параметра для двух локов получены изображения раз-

ности. Изолинии разности значений вероятностей двух ДМРЛ отражают распределение преимущества того или иного локатора в обнаружении ОЯП на территории Ленинградской области. Верхний ряд отражает разность оправдываемости осадков и гроз соответственно, нижний ряд – достоверности осадков и гроз. Зеленым цветом обозначена область с нулевой разностью вероятностей, т. е. на этой территории значения соответствующего параметра для двух локаторов равны. Градации красных оттенков соответствуют положительным разностям, т. е. большей достоверности или оправдываемости пулковского локатора, синих оттенков – отрицательным разностям, т. е. преимуществу локатора РГГМУ.

### Список используемых источников

1. *Fitzpatrick N.* Verification of Met Éireann Weather Radar // *Met Éireann. Technical Note.* – Glasnevin Hill, Dublin 9, 2013. – N. 62. – P. 1–26.
2. К вопросу об обнаружении облачности и осадков по данным доплеровского метеорологического радиолокатора / Л.И. Дивинский, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, А.С. Солонин, Т.Е. Симакина // *Ученые записки РГГМУ.* – СПб.: РГГМУ, 2015. – № 39. – С. 87–98.
3. Верификация обнаружения осадков доплеровским метеорологическим радиолокатором / Л.И. Дивинский, А.Д. Кузнецов, М.М. Латонин, О.С. Сероухова // *Ученые записки РГГМУ.* – СПб.: РГГМУ, 2015. – № 38. – С. 87–92.
4. Оценка продолжительности осадков по радиолокационным характеристикам конвективной облачности / А.В. Капустин, В.А. Колбин, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, Т.Е. Симакина // *Труды ГГО.* – 2018. – Вып. 589. – С. 114–124.
5. К вопросу о методике радиолокационного измерения интенсивности атмосферных осадков / К.Л. Восканян, А.Д. Кузнецов, О.С. Сероухова, А.С. Солонин // *Ученые записки РГГМУ.* – СПб.: РГГМУ, 2013. – № 27. – С. 63–70.
6. *Жуков В.Ю., Кузнецов А.Д., Сероухова О.С.* Интерпретация данных доплеровских метеорологических радиолокаторов. – СПб.: РГГМУ, 2018. – 119 с.
7. *Павлюков Ю.Б., Серебрянник Н.И., Карнов Б.Н.* Валидация радиолокационных наблюдений опасных явлений погоды на сети ДМРЛ по данным наземной наблюдательной сети Росгидромета // *Труды МФТИ.* – М.: МФТИ, 2016. – Т. 8, № 1. – С. 95–100.

А.С. Грибков\*,  
*кандидат технических наук;*  
В.С. Грибков\*;  
С.И. Моряков\*,  
*кандидат технических наук;*  
Д.А. Слухаева\*,

Центральный научно-исследовательский институт Войск воздушно-космической обороны  
Министерства обороны Российской Федерации, г. Тверь

## **СПОСОБ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВКЛАДОВ ОТРАЖЕНИЙ ОТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ОБЪЕКТОВ ПО ИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ**

Предложен способ экспериментального определения вкладов отражений от элементов конструкции объектов, основанный на инверсном синтезировании и анализе их двумерных радиолокационных изображений. Способ позволяет за одно измерение выявить и оценить вклады элементов конструкции исследуемого объекта в отраженный от него сигнал.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, двумерные радиолокационные изображения объектов, элементы конструкции.

Наиболее эффективным способом противорадиолокационной маскировки объектов является снижение радиолокационной заметности доминирующих элементов их конструкции. Основная сложность при этом возникает на этапе поиска отражающих элементов, определения их вкладов в суммарную эффективную площадь рассеяния (ЭПР) и месторасположения на объекте.

Цель работы – обеспечение возможности оперативного выявления отражающих элементов конструкции объекта с определением их месторасположения и вкладов в отраженный объектом радиолокационный сигнал.

Известен основанный на методе экранировки способ экспериментального определения элементов конструкции объекта, отражения от которых доминируют в отраженном им сигнале.

Суть способа состоит в следующем. Экспертным методом определяются элементы конструкции объекта, которые потенциально могут вносить доминирующий вклад в уровень отраженного сигнала.

Для летательного аппарата, например, такими элементами являются:

- элементы силовой установки;
- антенны бортового радиоэлектронного оборудования;
- управляющие поверхности (крыло, хвостовое оперение);
- фонарь кабины;
- фюзеляж с неоднородностями (щели, лючки, стыки).

Далее проводятся измерения радиолокационных характеристик объекта с последовательной экранировкой наиболее отражающих элементов его конструкции.

Оценка вклада элементов конструкции в отраженный от объекта сигнал выполняется путем сравнения радиолокационных характеристик, полученных с экранировкой элемента конструкции и без нее. Например, для оценки влияния элементов силовой установки необходимо выполнить два измерения: с открытым каналом воздухозаборника силовой установки и каналом, экранированным металлизированной накладкой или радиопоглощающим материалом (покрытием). Таким образом, способ требует проведения большого количества измерений. Кроме того, трудоемкость экранировки значительно увеличивают сложность де-

монтажа управляющих поверхностей, двигательной установки, изготовление и монтаж экранов, прочие обеспечивающие работы.

Другим недостатком способа является невозможность определения вкладов элементов конструкции с незначительными уровнями отражений. Например, вклад антенн бортового радиоэлектронного оборудования в целом может составлять более 50% в отраженном от объекта сигнале, однако оценить вклад отдельной антенны на уровне фона объекта зачастую не представляется возможным. Практика использования метода экранировки показывает, что с учетом ошибок измерений и фона от экранируемого объекта выявляются элементы, вклад которых в суммарный отраженный сигнал составляет не менее 20–30%, причем места расположения локальных источников, формирующих эти отражения, точно не определяются.

Для устранения указанных недостатков предлагается способ экспериментального определения вкладов отражений от элементов конструкции объекта по его двумерным радиолокационным изображениям. На современных измерительных комплексах реализован режим формирования двумерных радиолокационных изображений (РЛИ) объектов за счет инверсного синтезирования апертуры [1].

Возможность инверсного синтезирования апертуры появляется при вращении объекта вокруг своей оси и зондировании его измерительными средствами (радиолокационными станциями), использующими широкополосные когерентные сигналы и эффективные методы их обработки. Изображение объекта формируется в плоскости инверсного синтезирования апертуры путем двумерного преобразования Фурье отраженных от объектов сигналов, измеренных в полосе частот зондирования и заданных секторах углов поворота объекта.

Оператор формирования двумерного РЛИ объекта по амплитуде  $E(x, z)$  отраженного объектом и зарегистрированного сигнала  $E(\varphi, f)$  в координатах «пространственных частот»  $f_x, f_z$  для исключения искажений метрики при использовании быстрого преобразования Фурье имеет вид [2]

$$E(x, z) = \frac{1}{\Delta f_z \Delta f_x} \int_{\min f_z}^{\max f_z} \int_{\min f_x}^{\max f_x} E(f_x, f_z) e^{j2\pi(f_z z + f_x x)} df_x df_z,$$

где  $z$  – координата дальности;

$x$  – поперечная координата;

$\varphi$  – угол поворота, изменяющийся от  $\varphi_0 - \Delta\varphi$  до  $+\Delta\varphi$ ;

$\varphi_0$  – ракурс синтезируемого РЛИ;

$\pm\Delta\varphi$  – сектор углов синтезирования;

$f$  – частота зондирования, изменяющаяся в заданной полосе перестройки от  $f_{\min}$  до  $f_{\max}$ ;

$$E(f_x, f_z) = \begin{cases} E(\varphi, f), & \text{если } f_{\min} \leq f \leq f_{\max} \wedge |\varphi| \leq \Delta\varphi, \\ 0, & \text{если } f < f_{\min} \vee f > f_{\max} \vee |\varphi| > \Delta\varphi. \end{cases};$$

$$f = \frac{c}{2} \sqrt{f_z^2 + f_x^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{f_x}{f_z}, \quad \Delta f_z = \max f_z - \min f_z, \quad \Delta f_x = \max f_x - \min f_x.$$

При синтезировании РЛИ в широкой полосе частот и секторе углов обеспечивается визуализация распределения локальных источников отражения по поверхности объекта с высоким разрешением. Источники отражений имеют различную интенсивность, которая отображается цветовой палитрой (рис. 1). При этом, если измеренный сигнал был откалиброван в единицах ЭПР, то интенсивность элементов разрешения РЛИ объекта по мощности имеет ту же размерность.

Суть предлагаемого способа состоит в следующем. В условиях измерительных комплексов измеряют отраженный от вращающегося объекта радиолокационный сигнал за полный оборот. Зарегистрированный сигнал преобразуют в двумерное круговое РЛИ и выполняют его многократную фокусировку с последовательным уточнением параметров фокусировки путем приближения выявляемого на изображении контура объекта и его размеров к фактическим (рис. 2).



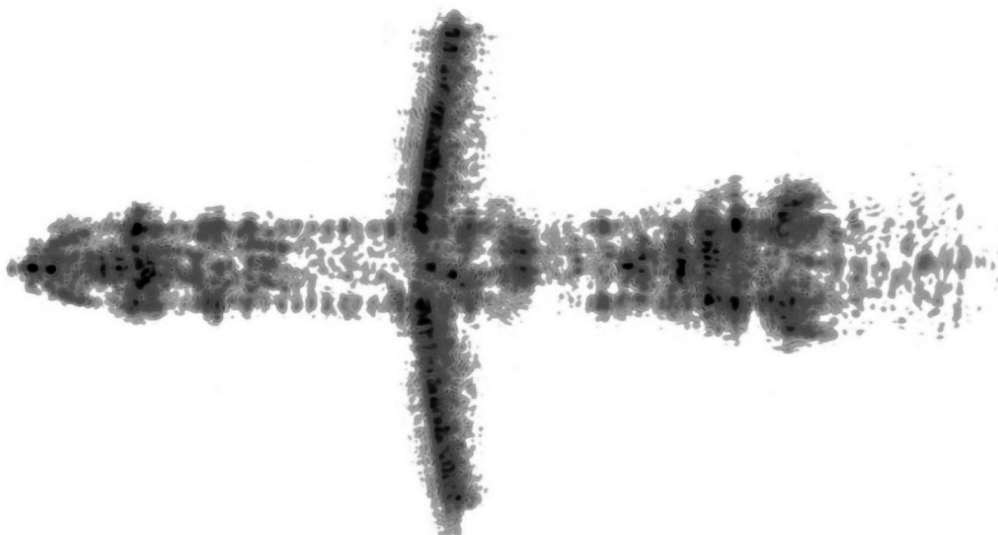


Рис. 1. Двумерное инверсно-синтезированное радиолокационное изображение объекта

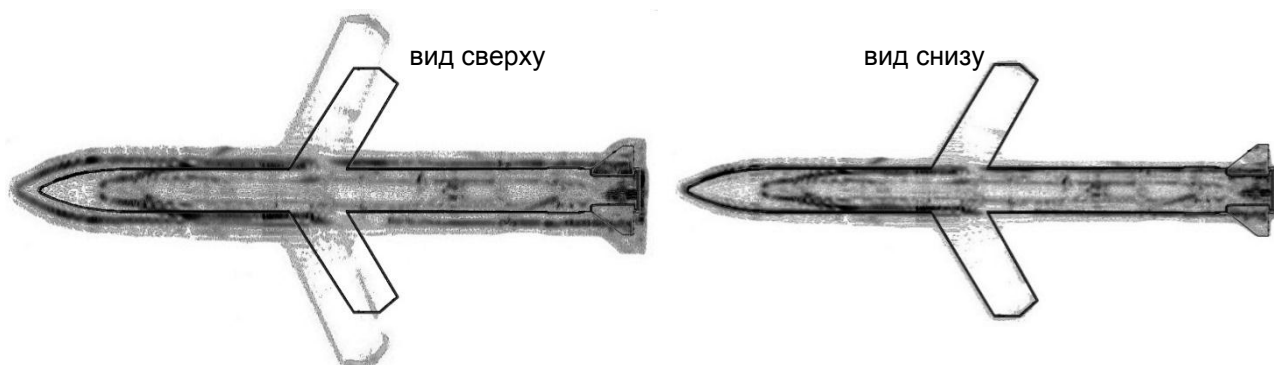


Рис. 2. Пример фокусировки двумерного радиолокационного изображения объекта

Далее с использованием полученных уточненных параметров фокусировки синтезируют РЛИ объекта в требуемых секторах углов локации. На полученные РЛИ накладывают контуры (проекции) видов объекта сверху и снизу (рис. 3), с помощью которых определяют места расположения на объекте локальных источников отражений.

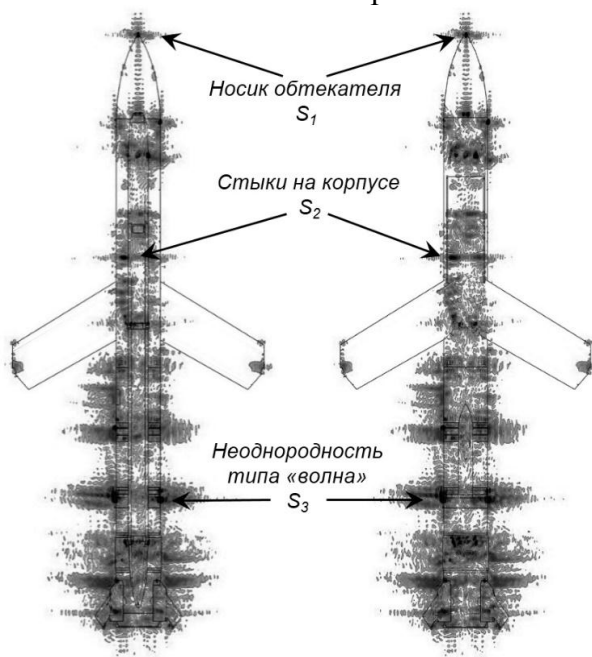


Рис. 3. Определение локальных источников отражений на двумерных РЛИ объекта

Вклад выявленных доминирующих элементов определяют как отношение суммы интенсивностей элементов разрешения участка РЛИ с выбранным локальным центром рассеяния к сумме интенсивностей всего РЛИ (рис. 4):

$$S_i [\%] = \frac{\sum_{k=1}^{K_i} \sum_{l=1}^{L_i} E^2(k, l)}{\sum_{n=1}^N \sum_{m=1}^M E^2(n, m)} \cdot 100\% ,$$

где  $E$  – амплитуда сигнала в элементе разрешения РЛИ;

$K_i, L_i$  – число элементов разрешения соответственно по горизонтали и вертикали области, накрывающей  $i$ -й элемент конструкции объекта;

$N, M$  – число элементов разрешения по горизонтали и вертикали кадра РЛИ соответственно.

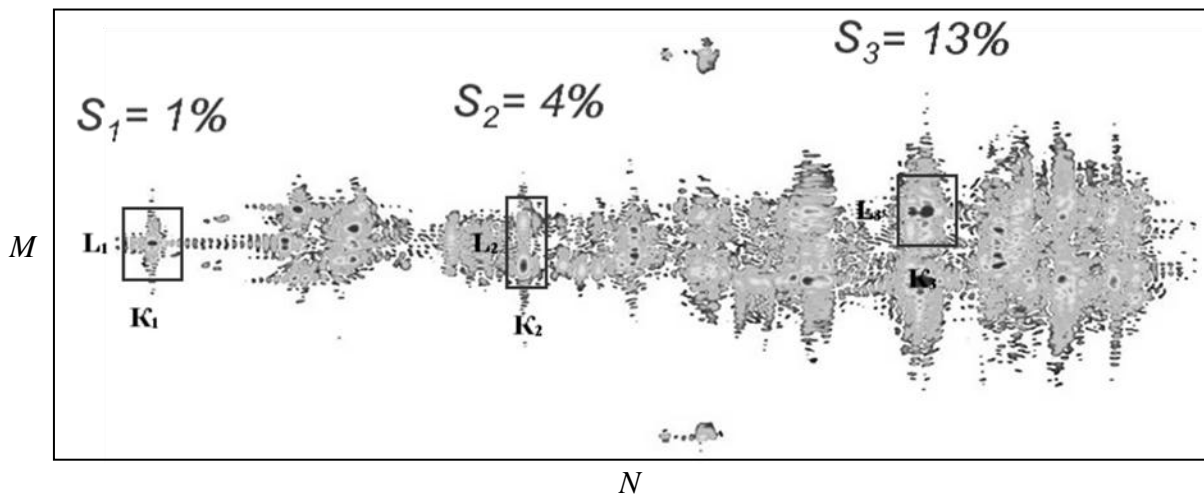


Рис. 4. Двумерное РЛИ объекта и локальные центры рассеяния

В табл. 1 и на рис. 5 приведены результаты экспериментального определения вкладов отражений от элементов конструкции типового объекта для заданных условий его локации (полоса частот, поляризация, сектор углов), полученные с использованием предложенного способа по данным одного измерения.

Таблица 1

**Вклады отражений от элементов конструкции**

№ элемента	Элемент конструкции	Вклад в суммарную ЭПР, %
1	Носик обтекателя	1
2	Элементы под радиопрозрачным обтекателем	<b>6</b>
3	Стык обтекателя с корпусом	5
4	Выступ на поверхности корпуса	1,5
5	Передний узел подвески	1,5
6	Технологический лючок	2
7	Неоднородность типа «полость» на поверхности корпуса	5
8	Щелевые образования	3
9	Передние кромки крыла	<b>8</b>
10	Передний элемент крепления объекта	1,5
11	Неоднородность на крыле	1
12	Стык отсеков	3
13	Задние кромки крыла	0,5
14	Неоднородности типа «волна» на боковой поверхности корпуса	<b>7</b>



Окончание табл. 1

№ элемента	Элемент конструкции	Вклад в суммарную ЭПР, %
15	Задний элемент крепления объекта	1,5
16	Неоднородность типа «кольцо» на боковой поверхности корпуса	<b>25</b>
17	Задний элемент подвески объекта	2,5
18	Технологические лючки на боковой поверхности корпуса	5
19	Элемент крепления хвостового оперения	1
20	Хвостовое оперение	<b>16</b>
21	Прочие элементы конструкции	3

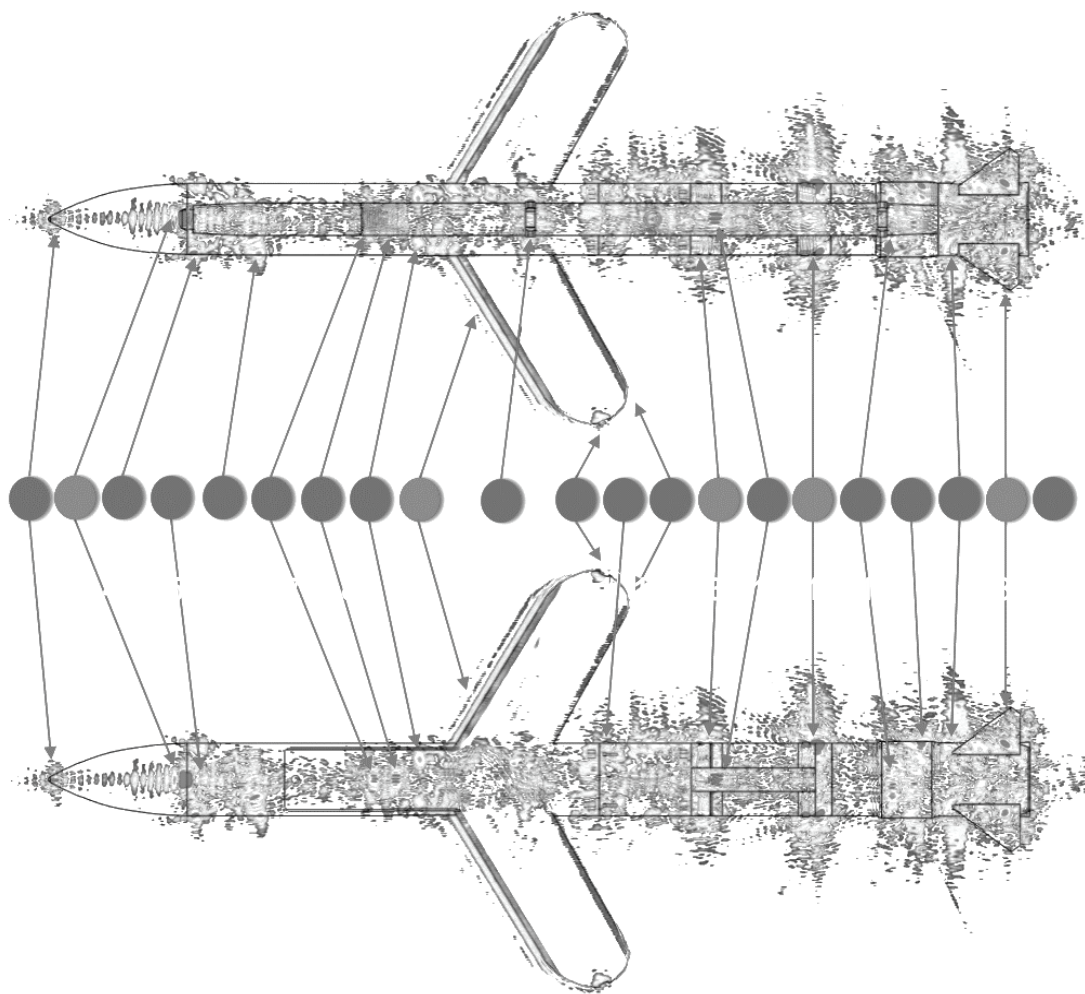


Рис. 5. Результаты экспериментального определения вкладов отражений от элементов конструкции типового объекта

Из приведенных результатов следует, что было выявлено 20 отражающих элементов конструкции объекта (в том числе локальные источники под радиопрозрачным обтекателем, передние кромки крыла, неоднородность типа «кольцо» на боковой поверхности корпуса, хвостовое оперение и др.) и определены их вклады в отраженный объектом сигнал.

Выявить на уровне фона экранированного объекта такое большое количество отражателей, 18 из которых имеют вклады в суммарный сигнал менее 10%, известным способом невозможно при любом числе вариантов измерений.

Таким образом, разработан способ экспериментального определения вкладов уровней отражений от элементов конструкций объектов на основе инверсного синтезирования их дву-

мерных РЛИ, позволяющий оперативно, за одно измерение, выявить на объекте основные источники вторичного отражения и оценить их вклады в отраженный объектом сигнал.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026А).

### **Список используемых источников**

1. *Chen V.C., Martorella M.* Inverse synthetic aperture radar imaging. Principles, Algorithms and Applications. – Edison, NJ: SciTech publishing, 2014. – P. 6–15.

2. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования: монография / под ред. С.М. Нестерова. – М.: Радиотехника, 2015. – С. 206–212.

Д.А. Денисенков,  
*кандидат физико-математических наук;*  
В.Ю. Жуков,  
*кандидат технических наук;*  
Г.Г. Щукин,  
*доктор физико-математических наук, профессор*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫХОДНЫХ ДАННЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО РАДИОЛОКАТОРА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПОЛЯ ВЕТРА**

Описываются математические модели карт ширины спектра радиальных скоростей частиц, получаемых при наблюдении метеорологическим радиолокатором сдвига ветра или вертикального потока воздуха. Приводятся результаты численного решения этих моделей. Делаются выводы о возможности эффективного использования данных карт для решения задач обнаружения указанных опасных явлений.

Ключевые слова: метеорологическая радиолокация, сдвиг ветра, ширина спектра сигнала, микропорыв.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Среди наиболее опасных для авиации явлений, связанных с неоднородностями поля ветра, можно выделить микропорыв и сдвиг ветра, поскольку именно они являются причиной большинства авиакатастроф, происшедших при взлете и посадке самолетов [9]. В настоящее время разработан ряд методов распознавания этих явлений при помощи когерентных метеорологических радиолокаторов, но, поскольку их эффективность недостаточно высока, существует необходимость в разработке новых путей решения данной проблемы.

Все существующие методы радиолокационного обнаружения указанных выше явлений, применяемые в серийно выпускаемом оборудовании, используют информацию о средней радиальной скорости гидрометеоров, однако, как показано в работах [1, 2], для реализации в сетевых метеорологических радиолокаторах более предпочтительным является метод, основанный на оценках ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров.

Для выявления взаимосвязей характеристик сдвига ветра и микропорыва с параметрами пространственного распределения ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров были построены соответствующие математические модели.

### **ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЕЙ**

Сначала рассмотрим случай сдвига ветра, который полагаем только вертикальным, так как именно он представляет опасность для авиации. По сути моделируется карта ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров (или ширины спектра принимаемого сигнала), получаемая при наблюдении радиолокатором упомянутых неоднородностей. При этом задача распадается на две:

1. Моделирование окружающего пространства;
2. Моделирование принимаемого радиолокатором сигнала, отраженного от этого пространства.

Для решения первой из поставленных задач будем учитывать тот факт, что интересующий нас слой атмосферы – от 0 до 500 м. Уверенное его наблюдение возможно в радиусе примерно 50 км. Далее начинает сказываться кривизна земной поверхности. Следовательно, считаем указанную дальность граничной, а поверхность внутри нее – плоской. Это дает нам право

представить расположенную над выбранным участком атмосферу в виде параллельных слоев, каждый из которых характеризуется своим распределением по высоте четырех параметров:

- радиолокационной отражаемости;
- скорости ветра;
- направления ветра;
- ширины спектра радиальных скоростей элементарных отражателей.

Считаем окружающее пространство слоисто однородным, т. е. значения всех четырех параметров полагаем постоянными для всех точек, находящихся на одной высоте  $h$ . Право на это в отношении параметров ветра дает заключение о том, что в горизонтальной плоскости средний вектор скорости неизменен в радиусе более 100 км [3]. Что касается двух оставшихся величин, это возможно потому, что их влияние на исследуемый нами процесс минимально и обуславливается только их средними значениями.

Максимальное количество слоев принимаем равным трем. При этом нижний (первый) и верхний (второй) характеризуются равномерным распределением по высоте вектора скорости ветра, который считаем строго горизонтальным, так как рассматриваем наблюдения только на малых углах места, когда вертикальные перемещения воздуха не способны оказать никакого влияния на отраженный сигнал. Все изменения вектора скорости считаем происходящими в расположенном между ними промежуточном слое, которые полагаем линейными.

Большое значение имеет то, как соотносятся толщина этого слоя и линейный размер элемента разрешения радиолокатора. С этой точки зрения все возможные ситуации можно разделить на три варианта [7]:

1. Трехслойный, при котором внутрь элемента разрешения радиолокатора попадают одновременно все три слоя атмосферы;
2. Двухслойный, когда антенный луч захватывает только два слоя;
3. Однослойный, характеризующийся тем, что разрешаемый объем радиолокатора полностью расположен внутри слоя с изменяющимися по высоте параметрами ветра.

Соответствующие им схемы взаимного расположения антенного луча и зоны неоднородности ветра приведены на рис. 1.

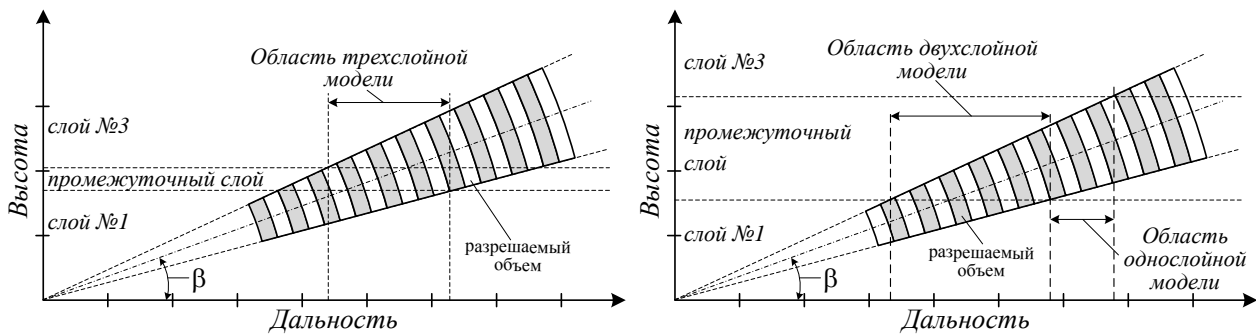


Рис. 1. Схема наблюдения радиолокатором пространства, соответствующая трехслойной (слева), двух- и однослойной (справа) моделям

Для создания модели разрешаемого элемента применяем гауссову аппроксимацию антенного луча в горизонтальной и вертикальной плоскостях

$$G(\alpha, \beta) = \exp\left(-\frac{(\alpha - \alpha_0)^2}{2\sigma^2} - \frac{(\beta - \beta_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (1)$$

- где  $\alpha$  – азимут антенны;  
 $\beta$  – ее угол места;  
 $\sigma$  – ширина луча на уровне 0,61 по мощности;  
 $\alpha_0, \beta_0$  – координаты центра разрешаемого элемента.

Ширину луча считаем одинаковой в обеих плоскостях, что характерно для подавляющего большинства метеорологических радиолокаторов.

Вдоль координаты наклонной дальности разрешаемый объем аппроксимируется функцией

$$G(r) = \begin{cases} 1, & R_0 - \frac{\tau_{\text{и}}}{2} < r < R_0 + \frac{\tau_{\text{и}}}{2}; \\ 0, & r < R_0 - \frac{\tau_{\text{и}}}{2}, \quad r > R_0 + \frac{\tau_{\text{и}}}{2}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\tau_{\text{и}}$  – длительность зондирующего импульса;

$R_0$  – координата разрешаемого элемента.

Искомую модель карты ширины спектра принимаемого сигнала получаем, задав постоянное значение угла места антенны  $\beta$  и пошагово (величина шага равна ширине антенны на уровне 0,5 мощности) изменяя азимут антенны. Для каждого из его значений в каждом элементе разрешения по дальности рассчитывается ширина спектра принимаемого сигнала в соответствии с формулой

$$\sigma_f = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} (S_{\text{сум}}(f) - S_{\text{ср}})^2 df}, \quad (3)$$

где  $S_{\text{сум}}(f)$  – спектр суммарного сигнала, определяемый выражением

$$S_{\text{сум}}(f) = \frac{1}{P_{\text{сум}}} \sum_{i=1}^3 P_i S_i(f). \quad (4)$$

Здесь  $P_{\text{сум}}$  – суммарная мощность принимаемого сигнала;

$P_i$  – мощность  $i$ -й составляющей суммарного сигнала, определяемая выражением

$$P_i = \frac{KZ_i}{R_0^3} \int_{h_i}^{h_{i+1}} \exp\left(-\frac{(h - \beta R_0)^2}{2\sigma^2 R_0^2}\right) dh, \quad (5)$$

где  $K$  – коэффициент, определяемый характеристиками радиолокатора;

$h_i$  – высота нижней границы  $i$ -го слоя;

$S_{\text{ср}}$  – средняя частота суммарного спектра, рассчитываемая по формуле

$$S_{\text{ср}} = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\text{сум}}(f) df. \quad (6)$$

Микропорыв (или другое локальное вертикальное движение воздуха) не способен создать устойчивых характерных распределений на карте ширины спектра отражений ввиду малости размеров данных явлений сравнительно со сдвигом ветра. Схема наблюдения его радиолокатором представлена на рис. 2.

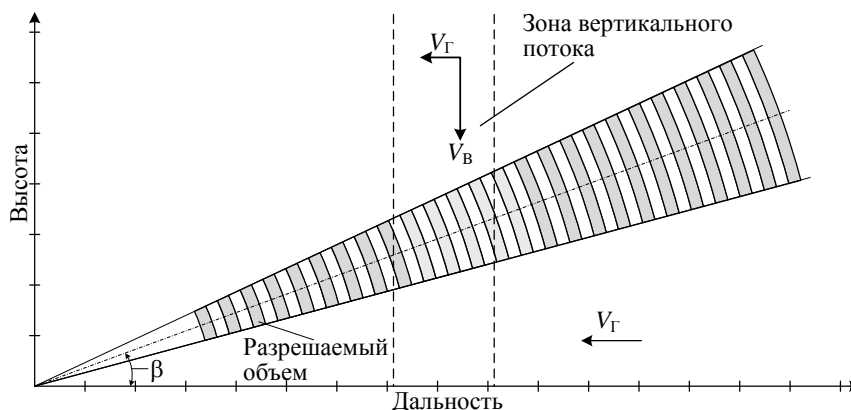


Рис. 2. Схема наблюдения радиолокатором микропорыва

Окружающее пространство в этом случае разбивается на область фона, в которой существует только горизонтальный ветер  $V_r$ , и зону вертикального потока, ветер  $V_{фон}$  внутри которой отличается от первой наличием вертикальной составляющей. Ширину спектра радиальных скоростей  $\sigma_v$  полагаем в обоих слоях одинаковой.

Соотношение мощностей составляющих суммарного сигнала и разность их средних частот зависят от многих условий – скорости вертикального движения частиц, взаимного расположения потока и элемента разрешения и т. д. – и не могут быть рассчитаны для каждого набора координат. Поэтому модель в данном случае сводится к вычислению ширины спектра амплитуды суммарного сигнала, состоящего из двух слагаемых с изменяющимся в широких пределах отношением мощностей  $\varepsilon = A_{пот} / A_{фон}$  и относительной разностью средних радиальных скоростей  $\nu = (|V_{0пот} - V_{0фон}|) / \sigma_v$ .

### ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Модель для случая наблюдения сдвига ветра решалась численным методом. Полученные карты ширины спектра радиальных скоростей гидрометеоров хорошо согласовывались с реальными, получаемыми радиолокатором картами [4]. Пример карт, полученных радиолокатором и расчетным путем для трехслойного варианта модели, приведен на рис. 3.

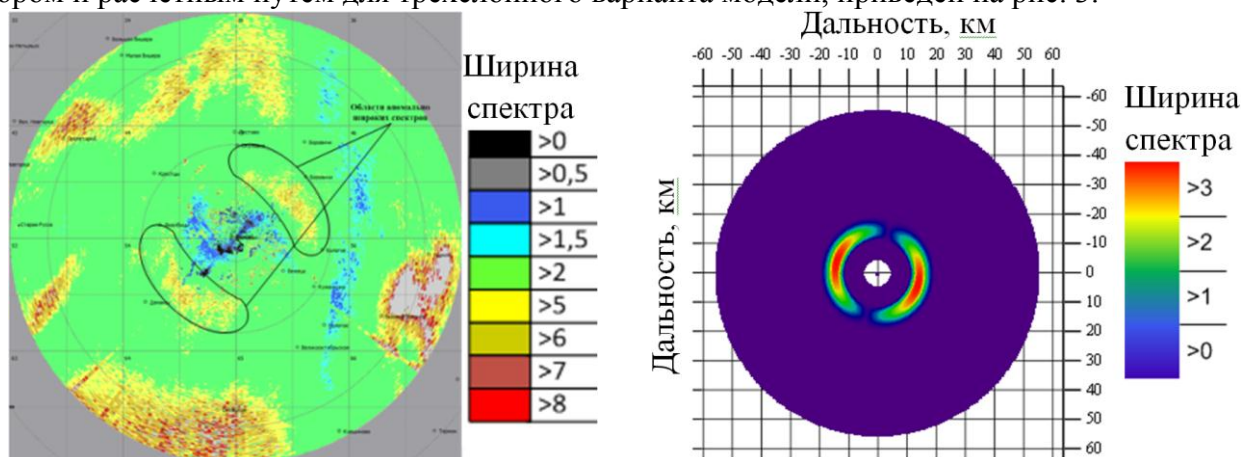


Рис. 3. Карты ширины спектра радиальных скоростей частиц, полученные радиолокатором (слева) и в результате численного решения трехслойного варианта модели

Для модели микропорыва были исследованы соотношения оценок ширины спектра отражений, получаемых для различных значений величин  $\varepsilon$  и  $\nu$  на выходе амплитудного и фазового детекторов [5]. Показано, что с большой вероятностью во время наблюдения данного явления возникают ситуации, когда ширина спектра на выходе первого из них более чем в полтора раза превышает значение этого параметра на выходе второго.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Построенная модель карты ширины спектра при наблюдении сдвига ветра позволяет установить зависимость параметров образующихся на ней характерных распределений (максимальное значение ширины спектра сигнала, направление, в котором образуется разрыв между полукольцами и т. д.) с параметрами сдвига ветра (величиной сдвига по величине и/или направлению) [6, 8]. Появляется также возможность восстановления вертикального профиля ветра на основе анализа характерных распределений, возникающих при двух- и однослойных вариантах модели [10].

Модель карты, возникающей при наблюдении радиолокатором восходящего потока, показывает, что появление описанных выше явлений расширения спектра сигнала на выходе амплитудного детектора с неизменным его значением на выходе фазового детектора при проведении радиолокационного обзора может служить предиктором существования в просматриваемом участке пространства вертикального потока воздуха [11].

### Список используемых источников

1. Восстановление поля скорости воздушных потоков в метеорологической доплеровской радиолокации / А.М. Девяткин и др. // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 1. – С. 107–115.
2. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора. / Д.А. Денисенков и др. // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2016. – № 3 (23). – С. 68–73.
3. *Алехин С.Г., Суворов С.С., Шемелев В.А.* Двумерная модель аппроксиманта корреляционных функций анизотропных полей параметров атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, №6. – С. 1–7.
4. Радиолокационные исследования поля ветра в атмосфере / Д.А. Денисенков и др. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – № 12/2. – С. 15–19.
5. *Бычков А.А., Жуков В.Ю., Щукин Г.Г.* Дополнительные информативные возможности малогабаритного метеорологического радиолокатора «Контур МЕТЕО-01» // Материалы V Всероссийских Армандовских чтений «Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике». – Муром: ВлГМУ, 2015. – С. 134–139.
6. Экспериментальная проверка метода определения сдвига ветра по ширине спектра радиолокационного сигнала. / Д.А. Денисенков и др. // Ученые записки РГГМУ. – СПб.: РГГМУ, 2016. – № 45. – С. 113–118.
7. *Денисенков Д.А., Жуков В.Ю.* Определение величины сдвига ветра по направлению с помощью карт ширины спектра радиолокационного сигнала // Сборник трудов VII Всероссийских Армандовских чтений «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн». – Муром: ВлГМУ, 2017. – С. 402–406.
8. Верификация метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков и др. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 653. – С. 159–163.
9. Руководство по сдвигам ветра на малых высотах: руководящий документ. – Монреаль: Международная организация гражданской авиации, 2008. – 258 с.
10. Исследование эффективности метода обнаружения сдвига ветра по оценкам ширины спектра радиолокационного сигнала / Д.А. Денисенков и др. // Ученые записки РГГМУ. – СПб.: РГГМУ, 2016. – № 42. – С. 109–116.
11. Доплеровский радиолокационный метод определения характеристик поля ветра и некоторые результаты / И.А. Готюр и др. // Ученые записки РГГМУ. – СПб.: РГГМУ, 2011. – № 21. – С. 66–75.

Н.А. Дятко\*,  
*кандидат физико-математических наук;*  
А.А. Каптюг\*;  
И.В. Кочетов\*,  
*кандидат физико-математических наук;*  
В.А. Телегин\*,  
*кандидат физико-математических наук*

\* Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК F-РАССЕЯНИЯ В ЛЕТНИЙ ПЕРИОД ПО ДАННЫМ СПУТНИКА ИК-19

В настоящей работе выполнена оценка частоты появления разных типов F-рассеяния в различных интервалах инвариантных широт в зависимости от локального времени. Исследования проведены для летнего периода на основе данных, полученных с использованием ионозонда ИС-338, установленного на борту спутника ИК-19.

Ключевые слова: ионосфера, внешнее зондирование, F-рассеяние, вероятность.

### ВВЕДЕНИЕ

При анализе ионограмм, получаемых при внешнем зондировании ионосферы, можно выделить три характерных типа рассеяния сигнала на неоднородностях ионосферы (F-рассеяние). Первый тип (тип F1) наблюдается на высоте спутника, с которого производится зондирование. Третий тип (тип F3) наблюдается в максимуме слоя F2, а второй тип (тип F2) определяется по центральной части ионограммы. Данная классификация была впервые предложена в работе [1]. Целью настоящей работы является выяснение закономерностей появления разных типов рассеяния в различных интервалах инвариантных широт (ILAT) в зависимости от локального времени (LT). Исследования выполнены для летнего периода. Следует отметить, что анализ закономерностей появления различных типов F-рассеяния на основе результатов, полученных при внешнем зондировании ионосферы, ранее был проведен только для периода равноденствия [2].

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И МЕТОД ИХ ОБРАБОТКИ

Исследования проводились на основе анализа ионограмм, полученных с использованием ионозонда ИС-338, установленного на борту спутника ИК-19. Спутник летал в период высокой солнечной активности 1979–1981 годов. Всего было проанализировано около 60 000 ионограмм, полученных в летний период. Для каждой ионограммы известны время и дата зондирования и координаты спутника в момент зондирования. Предварительный анализ показал, что координаты точек зондирования достаточно равномерно распределены по поверхности Земли в интервале инвариантных широт от  $-70$  градусов до  $+70$  градусов, а времена зондирования достаточно равномерно распределены в течение суток.

Анализ проводился на основе ионограмм, обработанных вручную. Для каждой ионограммы определялось наличие или отсутствие типов рассеяния F1, F2 и F3. Наличие соответствующего типа рассеяния обозначалось цифрой 1, а его отсутствие – цифрой 0. Результат анализа каждой ионограммы записывался в виде последовательности трех цифр, которые указывают на наличие или отсутствие типов рассеяния F1, F2 и F3 соответственно. Например, последовательность 101 означает, что имеют место рассеяния типа F1 и F3, а рассеяние



типа F2 отсутствует. Комбинация 000 означает отсутствие возмущений (неоднородностей) в ионосфере. Возможно всего 8 различных комбинаций трех типов F-рассеяния: 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 и 111. Статистическая обработка полученных результатов состояла в расчете частот появления каждой из указанных комбинаций в заданном интервале инвариантных широт в определенном интервале времени. Для этого рассчитывалось общее число событий (ионограмм), удовлетворяющих заданным условиям по широте и времени ( $N_{tot}$ ), и количество каждой из указанных выше комбинаций ( $N_i$ ,  $i = 1, \dots, 8$ ). Частота появления данной комбинации рассчитывалась как отношение  $\xi_i = N_i / N_{tot}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА

Расчеты были выполнены для высоких ( $[-70, -60]$ ;  $[60, 70]$ ), средних ( $[-50, -40]$ ;  $[40, 50]$ ) и экваториальных ( $[-30, -20]$ ;  $[-5, 5]$ ;  $[20, 30]$ ) (инвариантных) широт Южного и Северного полушарий (числа в скобках – градусы). Наглядное представление частот появления всех восьми типов рассеяния в зависимости от инвариантной широты и времени суток возможно либо в виде громоздких таблиц либо в виде большого числа графиков. В рамках короткой статьи это сделать невозможно. Поэтому мы ограничились анализом типов F-рассеяния, частота появления которых  $\geq 30\%$ . Как оказалось, в основном это типы 000, 111, 010 и (в меньшей степени) типы 011 и 110 (табл. 1).

Таблица 1

### Наиболее часто встречающиеся типы F-рассеяния (вероятность $\geq 30\%$ ) и временные интервалы их наблюдения в различных диапазонах инвариантных широт

ИЛАТ, град.	Наиболее вероятные ( $\geq 30\%$ ) типы рассеяния и временные интервалы их наблюдения (в скобках, LT)
$[60, 70]$	000 (12–17); 010 (9–15), 111 (0–5; 20–24)
$[40, 50]$	000 (0–24), 010 (8; 10–21)
$[20, 30]$	000 (0–24), 010 (9; 11–15; 18–20)
$[-5, 5]$	000 (0–24), 010 (8–9; 11–12), 111 (0–4)
$[-30, -20]$	000 (2–11; 14–18; 21–24), 001 (1), 010 (8–20); 011 (1)
$[-50, -40]$	000 (8–12; 15–22), 010 (8–19), 111 (4; 23)
$[-70, -60]$	000 (12–14), 111 (0–9; 15–24)

Как следует из расчетов, результаты которых качественно отражены в табл. 1, в высоких широтах Северного полушария в ночное время (с 20 до 5 часов) преобладает рассеяние типа 111, а в дневное время (с 9 до 15 часов) – рассеяние типа 010. Отсутствия рассеяния (тип 000) имеет место в дневное время (с 12 до 7 часов), причем его вероятность не превышает 0,4. В области средних широт Северного полушария наблюдается в основном рассеяние типа 010 (с 10 до 21 часа), а максимальная вероятность его появления  $\approx 0,6$ . Вероятность отсутствия рассеяния (тип 000) велика ( $> 0,3$ ) в течение всех суток, а максимальная вероятность ( $\sim 0,7–0,8$ ) имеет место утром (5–9 часов). В области экваториальных широт  $[20, 30]$  градусов ситуация аналогична ситуации в средних широтах: вероятность отсутствия рассеяния велика ( $> 0,3$ ) в течение суток, а наиболее вероятным типом рассеяния является тип 010. Максимальная вероятность наблюдения типа рассеяния 010 ( $\sim 0,7$ ) приходится на дневное время (12 часов). В области экватора на широтах  $[-5, 5]$  градусов вероятность отсутствия рассеяния также высока в течение суток. Наиболее вероятными типами рассеяния являются типы (010) и (111), при этом вероятность их появления не превышает 0,4.

В области экваториальных широт  $[-30, -20]$  градусов Южного полушария в дневное время (с 8 до 20 часов) высока вероятность появления рассеяния типа (010), максимальное значение вероятности ( $\sim 0,9$ ) приходится на 12 часов. Высокая вероятность появления рассеяния типа

(010) в дневное время (с 8 до 19 часов, в районе 13 часов вероятность имеет максимум  $\sim 0,7$ ) сохраняется и в области средних широт Южного полушария.

Кроме того, в утренние и вечерние часы наблюдается рассеяние типа (111). В области высоких широт Южного полушария превалирует рассеяние типа (111). Вероятность этого типа рассеяния мала только с 9 часов утра до 15 часов дня.

Проведенный анализ показывает, что высокую вероятность появления имеют в основном два типа F-рассеяния: (010) и (111). При этом первый тип чаще наблюдается в дневное время, а второй – в ночное. В связи с этим целесообразно проанализировать частоту появления различных типов рассеяния отдельно в дневное (с 8 до 20 часов, LT) и ночное (с 20 до 8 часов, LT) время на разных широтах. Результаты такого анализа представлены на рис. 1.

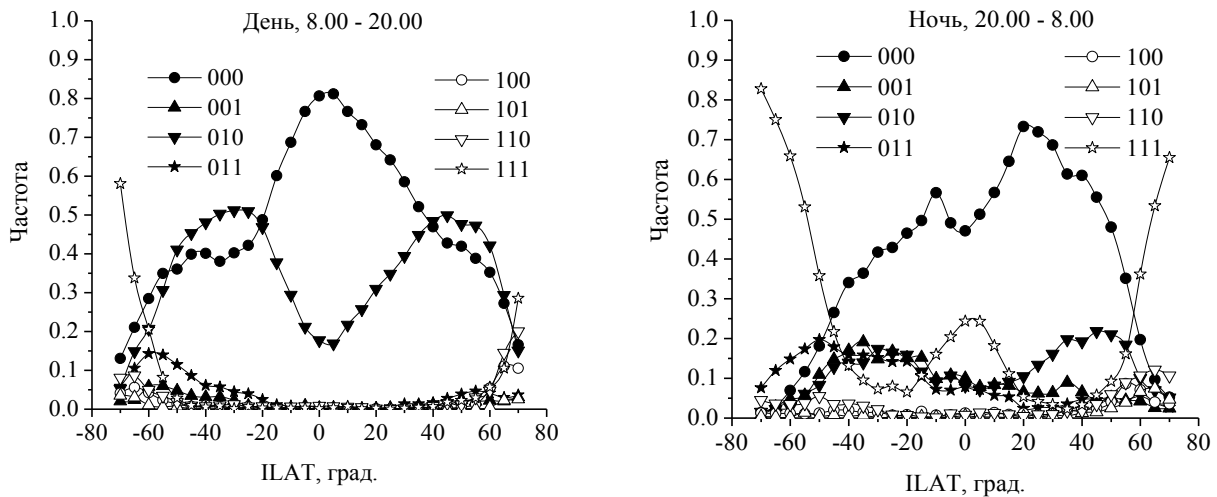


Рис. 1. Зависимость частоты появления различных типов F-рассеяния в дневное и ночное время от инвариантной широты

Как видно из рис. 1, в дневное время в диапазоне широт  $[-50, 60]$  градусов основным типом F-рассеяния является тип (010). Вероятность появления этого типа рассеяния имеет два максимума: в области широт  $[-40, -20]$  градусов и  $[40, 50]$  градусов. Значение вероятности в максимумах приблизительно равно 0,5. В области экватора вероятность появления рассеяния типа (010) минимальна ( $\sim 0,17$ ), а другие типы рассеяния практически отсутствуют. В области высоких широт как в Северном, так и в Южном полушарии суммарная частота появления F-рассеяния резко возрастает. В Северном полушарии на широтах  $\sim 70$  градусов она составляет около 0,84. При этом основными типами рассеяния являются (111), (110), (100) и (101). В Южном полушарии на широте  $-70$  градусов суммарная вероятность появления F-рассеяния приблизительно равна 0,87, а основным типом рассеяния является тип (111).

В ночное время распределение вероятности появления различных типов F-рассеяния несколько меняется. Минимум суммарной вероятности появления F-рассеяния (или, что то же самое, максимум вероятности отсутствия рассеяния, тип (000)) сдвигается в область 20 градусов северной широты. В отличие от дневного времени, в диапазоне широт  $[-40, 50]$  градусов нет одного превалирующего типа рассеяния. В диапазоне широт  $[-40, -10]$  градусов наблюдаются (с близкими вероятностями) рассеяния типов (011), (010) и (001). В области экватора ( $[-10, 10]$  градусов) превалирует рассеяние типа (111), а в средних широтах Северного полушария – рассеяние типа (010). При переходе в область высоких широт как в Северном, так и в Южном полушарии суммарная вероятность F-рассеяния стремится к 1. При этом основным типом рассеяния является тип (111).

Заметим, что явление F-рассеяния впервые наблюдалось при вертикальном зондировании ионосферы с поверхности Земли. При таком зондировании рассеяние наблюдается в основном в области F, что и определило название данного явления. В результате анализа данных большого числа ионосферных станций была получена основная информация о закономерности

стях этого явления. В частности, было установлено, что F-рассеяние наблюдается в основном ночью [3]. Наблюдаемое с поверхности Земли F-рассеяние соответствует типу F3, наблюдаемому со спутника. Поэтому для корректного сравнения результатов внешнего зондирования с результатами вертикального зондирования необходимо объединить все варианты, в которых наблюдается тип рассеяния F3: 001, 011, 101 и 111. Обозначим такой суммарный тип как XX1. В работах [1, 4] было проведено сравнение результатов внешнего зондирования (данные спутника ИК-19) с результатами вертикального зондирования по станции Москва для зимнего периода в условиях высокой солнечной активности. Показано, что имеет место хорошее согласие временных зависимостей частоты появления F-рассеяния в течение суток.

В настоящей работе сравнения с данными вертикального зондирования не проводилось, но по данным внешнего зондирования мы рассчитали частоты появления рассеяния типа XX1 в зависимости от локального времени и инвариантной широты. Полученные данные могут быть использованы для сравнения с данными наземных станций вертикального зондирования, расположенных на различных широтах. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Как видно из рис. 2, во всем рассмотренном диапазоне широт частота появления F-рассеяния (XX1) увеличивается в ночное время. Этот факт согласуется с результатами, полученными при зондировании ионосферы с поверхности Земли [3]. Кроме того, частота появления рассеяния увеличивается при переходе от низких к высоким широтам. Отметим также, что в одинаковых интервалах широт частота появления F-рассеяния в Южном полушарии выше, чем в Северном.

### Список используемых источников

1. Беккер С.З., Карпачев А.Т., Телегин В.А. Исследование F-рассеяния по данным внешнего зондирования ионосферы на спутнике Интеркосмос-19 // Энциклопедия низкотемпературной плазмы / под ред. В.Е. Фортова. – М.: Янус-К, 2008. – Т. I, кн. 3: Ионосферная плазма, ч. 1. – С. 447–455. – Сер. Б. Справочные приложения, базы и банки данных.
2. Телегин В.А., Дятко Н.А., Каптюг А.А. Исследование явления F-рассеяния по данным спутника ИК-19 в период равноденствия // Сборник докладов 41-го семинара «Физика авроральных явлений». – Апатиты: Полярный государственный институт, 2018. – С. 154–156.
3. Явление F-рассеяния в ионосфере / Б.Н. Гершман, Э.С. Казимировский, В.Д. Кокуров, Н.А. Чернобровкина. – М.: Наука, 1984. – 141 с.
4. Панченко В.А., Рождественская В.И., Телегин В.А. Цифровой ионозонд DPS-4 в ионосферных исследованиях ИЗМИРАН // Юбилейный сборник ИЗМИРАН-75: Электромагнитные плазменные процессы от недр Солнца до недр Земли. – М.: ИЗМИРАН, 2015. – С. 160–169.

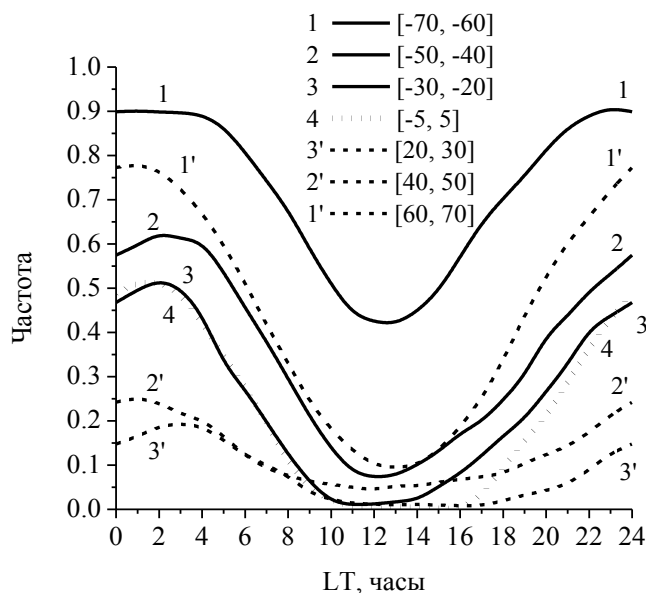


Рис. 2. Суточный ход частоты появления рассеяния типа XX1 в летнее время

М.Г. Калацкий\*;  
Г.М. Крученицкий\*\*,  
*доктор физико-математических наук;*  
В.А. Чурилова\*

\* Московский физико-технический институт, г. Москва

\*\*Центральная аэрологическая обсерватория, г. Москва

## СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЗОНАЛЬНО ОСРЕДНЕННЫХ ПОЛЕЙ ВЕРТИКАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОЗОНА ВО ВНЕПОЛЯРНЫХ РЕГИОНАХ ЗЕМЛИ

Построены регрессионные модели сезонной изменчивости полей вертикального распределения температуры и озона в широтном диапазоне  $60^{\circ}\text{S}$ – $60^{\circ}\text{N}$  с шагом  $5^{\circ}$  и диапазоне высот 10–50 км с шагом 0,5 км. Разработано программное обеспечение для анимации внутригодовой эволюции, как профилей вертикального распределения озона и температуры, так и их широтно-высотных сечений. Исследованы широтная и высотная зависимости спектрального состава температурных и озонных полей и их корреляционных свойств. Обоснованы подходы к практическому применению полученных результатов к задачам оперативного мониторинга ВРО без применения дорогостоящих датчиков баллонного зондирования концентрации озона.

Ключевые слова: озоносфера, статистическое моделирование, вертикальное распределение температуры, корреляция профилей концентрации озона и температуры.

### ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является изучение сезонной изменчивости глобальных полей вертикального распределения озона и температуры (ВРО и ВРТ) и исследование их корреляционных свойств, а также изучение возможности организации оперативного мониторинга ВРО по данным стандартного аэрологического зондирования атмосферы и спутниковых измерений общего содержания озона (ОСО). В качестве исходных данных для выполнения задач работы выбраны данные о ВРО и ВРТ, полученные с КА SAGE-II в период 1989–1999 годов. Ввиду особенностей орбиты указанного КА и лимбового режима его измерений темп обновления информации с него невелик и полярные регионы практически не освещены (рис. 1).

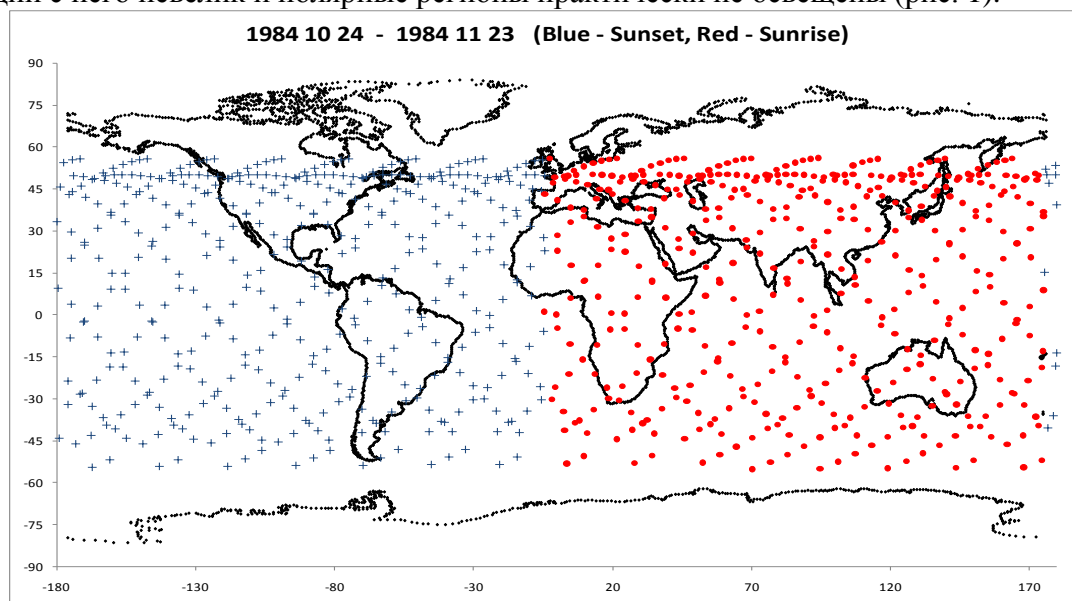


Рис. 1. Карта точек охвата данными SAGE-II в течение месяца  
(красные – восход, синие – закат)

Ввиду отмеченных ограничений в качестве исходных данных использовались результаты зонального осреднения в широтном диапазоне  $60^{\circ}\text{S}$ – $60^{\circ}\text{N}$  с шагом  $5^{\circ}$  с временным разрешением 1 месяц.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование сезонного хода для температуры и концентрации озона осуществлялось регрессионным методом [1]. Пример сезонных профилей обоих параметров для широтного пояса  $45^{\circ}$ – $50^{\circ}$  с. ш. за 29 августа приведен на рис. 2, а широтно-высотный разрез температуры за 16 февраля – на рис. 3.

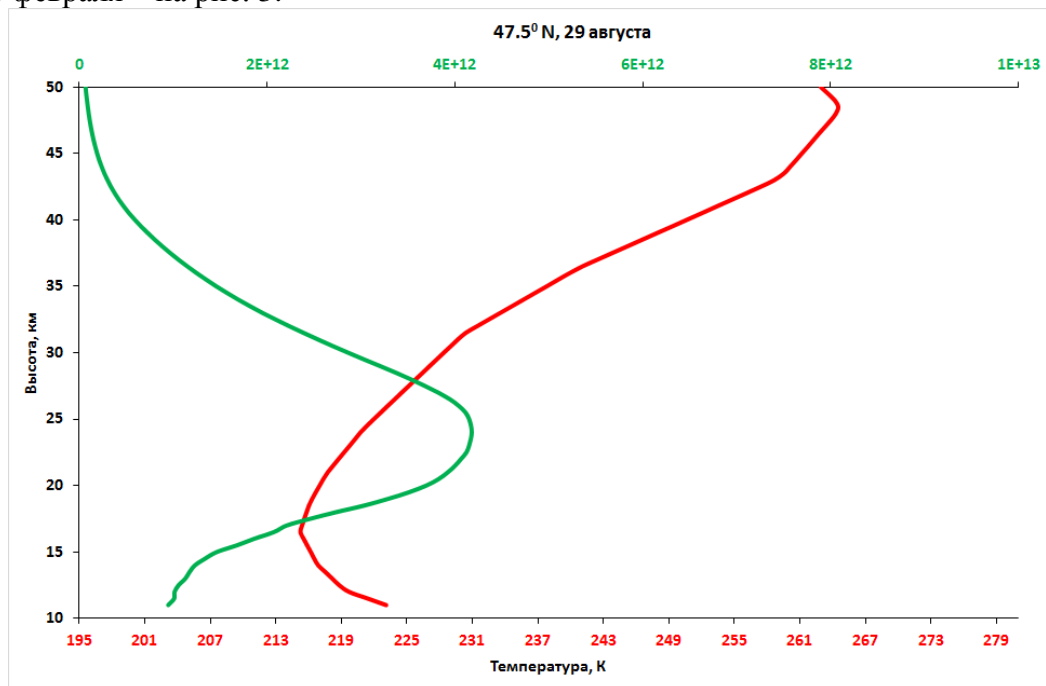


Рис. 2. Высотное распределение озона (зеленый) и температуры (красный)

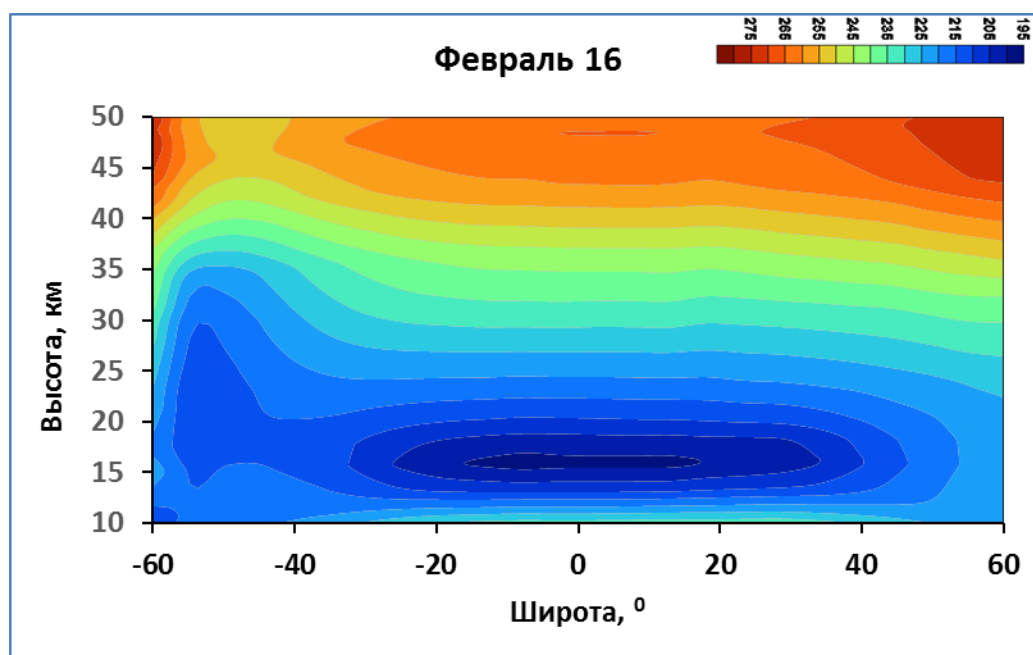


Рис. 3. Пример широтно-высотного сечения абсолютной температуры

Отметим, что разработанное в ходе моделирования программное обеспечение позволяет анимировать как профили, так и широтно-высотные сечения, как температуры, так и концентрации озона. Это, в свою очередь, позволяет наблюдать за сезонным ходом переносных процессов, например, визуализировать неочевидный на первый взгляд процесс весеннего переноса тепла из приполярных областей в среднеширотные.

Взаимообусловленность в полях сезонной изменчивости температуры и концентрации озона иллюстрирует рис. 4. Эти данные могут быть, в частности, использованы для уточнения основных озонных констант в средней атмосфере.

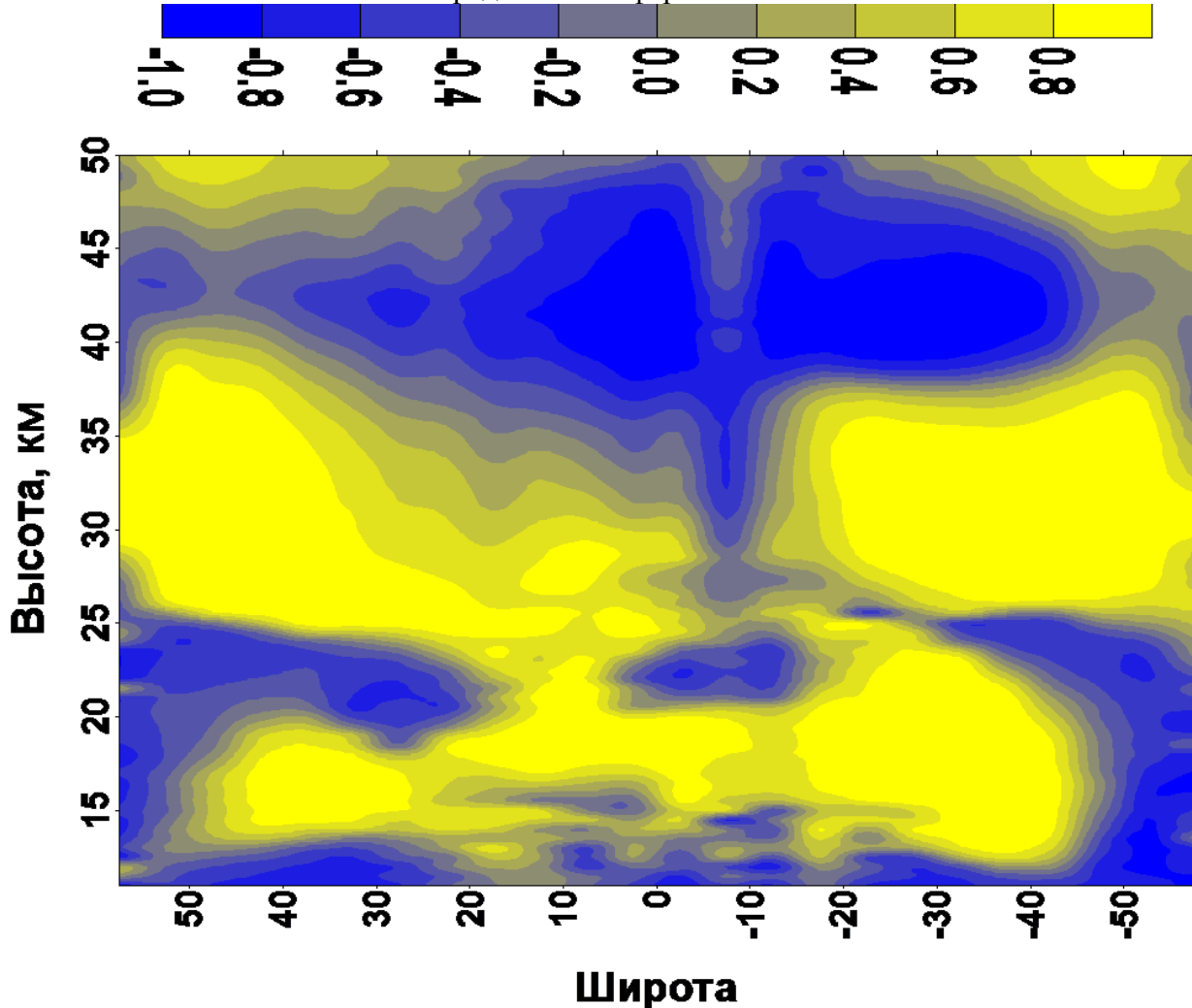


Рис. 4. Широтно-высотное сечение поля коэффициента взаимной корреляции абсолютной температуры и концентрации озона

Пример широтно-высотного разреза параметров моделирования приведен на рис. 5. На рисунке видно, как возрастает амплитуда первой гармоники сезонной изменчивости температуры с ростом широты и высоты. Менее интенсивный, но также совершенно очевидный рост наблюдается и на высотах тропопаузы практически во всем широтном диапазоне, и с этой точки зрения хорошо видна область разрыва тропопаузы в Северном полушарии, особенно по сравнению с Южным.

Отдельный интерес представляют остатки регрессионного моделирования, т. е. массив данных о разнице между реально наблюдавшимися значениями температуры и концентрации озона и значениями их сезонного хода. Учет широтной изменчивости их функций взаимной корреляции открывает возможности принципиально нового подхода к задачам оперативного мониторинга ВРО, в частности, получения информации о профилях ВРО на основе данных стандартного аэрологического зондирования и спутниковых измерений ОСО.

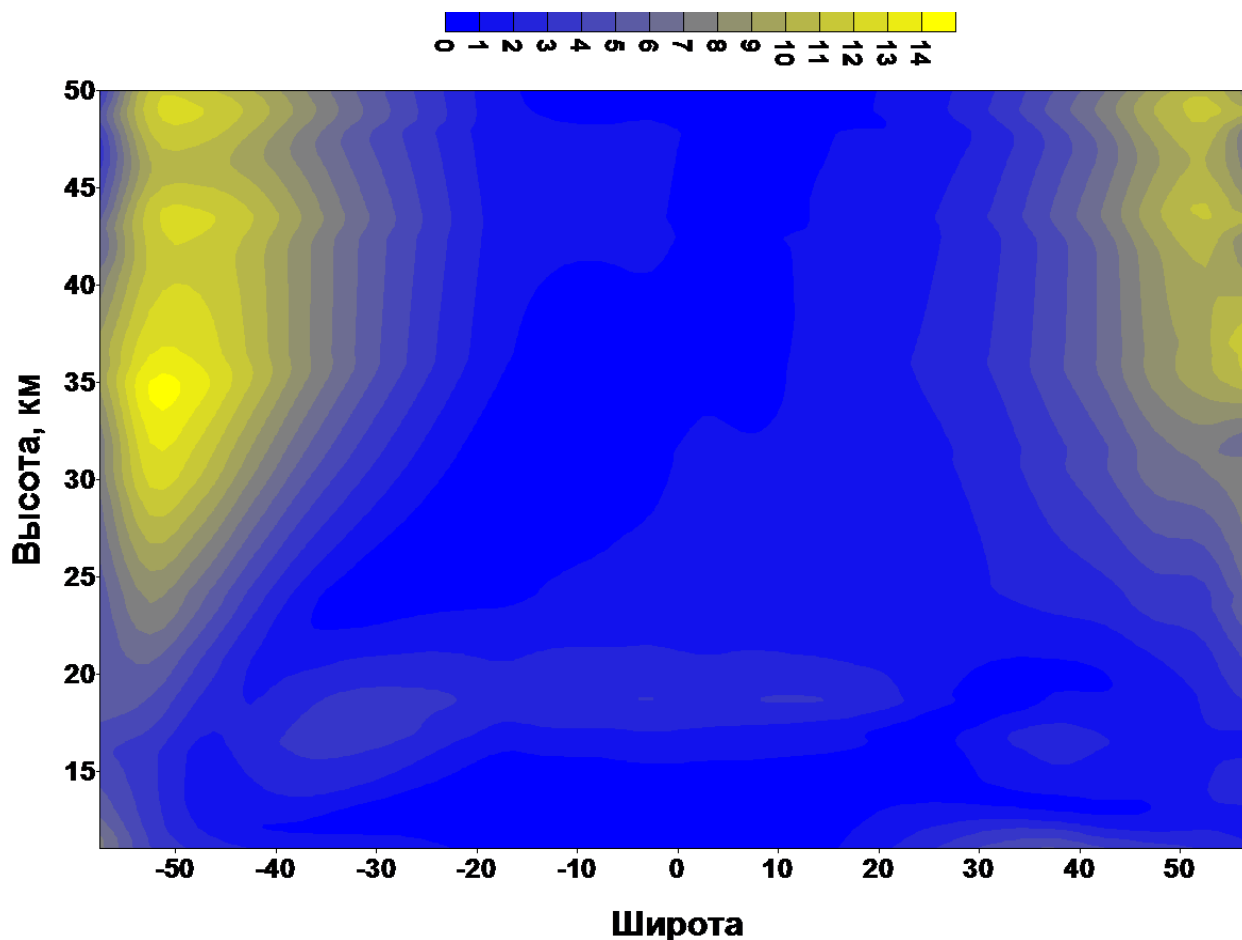


Рис. 5. Широтно-высотный разрез амплитуды первой гармоники сезонной изменчивости температуры

Это позволит существенно расширить информационные возможности действующей национальной системы озонного и УФ мониторинга [2] без применения дорогостоящих датчиков баллонного зондирования концентрации озона, причем получение дополнительной информации возможно с высоким пространственным разрешением по горизонтали как в регионах, охваченных стандартным аэрологическим зондированием, так и при разовых выпусках аэрологических зондов, например, с исследовательских судов.

#### Список используемых источников

1. Крученицкий Г.М., Статников К.А. Эволюция вертикального распределения озона и температуры над Южным полюсом // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 662. – С. 157–161.

2. Черников А.А., Иванова Н.С., Крученицкий Г.М. Создание первой очереди системы мониторинга УФ радиации в России // Оптика атмосферы и океана. – 1999. – Т. 12, № 1. – С. 5.

А.Л. Камышев,  
кандидат технических наук, доцент;  
А.А. Матюшенко,  
кандидат военных наук, доцент;  
Е.А. Федяй,  
кандидат технических наук

## О ПОВЫШЕНИИ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ КООРДИНАТ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ ИЗМЕРИТЕЛЕМ, РАСПОЛОЖЕННОМ НА ПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

В статье предлагается метод и алгоритм измерения координат объекта повышенной точности измерителем, расположенном на подвижном основании, позволяющий определять координаты с исключением движения основания на интервале измерения.

Ключевые слова: подвижный объект, точность измерения, оптико-электронное средство, волоконно-оптический гироскоп, датчик угловой скорости.

Существует класс задач, когда измеритель координат движения цели находится на подвижном основании. В этом случае движение цели в поле зрения оптико-электронной системы (ОЭС) или в зоне обзора радиолокационной станции (РЛС) складывается из двух движений:

- собственного движения цели в пространстве;
- движения цели, обусловленного движением подвижного основания из-за действия возмущающих воздействий.

Первый вид движения отражает истинное движение цели в наблюдаемом пространстве, второй вид движения – паразитное движение, не соответствующее истинному движению цели.

Для исключения (или максимального подавления) второго вида движения из определения координат движения цели обычно применяют стабилизацию подвижного основания от действия возмущающих воздействий.

В этом случае организуют два контура:

- следящий контур, удерживающий цель в поле зрения ОЭС или в зоне обзора РЛС;
- контур стабилизации, максимально подавляющий возмущающие воздействия.

Не останавливаясь на проблемах точностных характеристик следящего контура, рассмотрим влияние контура стабилизации на точность измерения координат.

Отметим, что даже при высокой степени подавления возмущающих воздействий, достигающих 40 и более децибел (коэффициент подавления  $k \geq 100$ ), остаточные паразитные движения подвижного основания могут быть значительными. Особенно это проявляется в ОЭС, где точность измерения координат измеряется единицами угловых секунд.

Допустим, что подвижное основание подвергается возмущающим воздействиям вида

$$X(t) = X_m \sin \omega t,$$

где  $X_m$  – амплитуда колебаний,

$\omega$  – частота колебаний.

При ослаблении возмущающего воздействия системой стабилизации в  $k$  раз возмущающее воздействие

$$X_{\text{п}}(t) = X_{\text{пм}} \sin \omega t = X_{\text{пм}} \sin 2\pi f t$$

где  $X_{\text{пм}}$  – амплитуда колебаний подвижного основания после подавления возмущающего воздействия системой стабилизации,  $X_{\text{пм}} = X_m / k$ .



Угловая скорость подвижного основания  $\Omega_{\Pi}$  рассчитывается следующим образом:

$$\Omega_{\Pi}(t) = d/dt(X_{\Pi}(t)) = 2\pi f X_{\text{им}} \cos 2\pi f t .$$

Сдвиг подвижного основания за время  $T$ , равное времени наблюдения в ОЭС или интервалу между импульсами облучения цели в РЛС, может быть определен из выражения

$$\varphi = \int_0^T 2\pi f t \cos 2\pi f t X_{\text{им}} dt .$$

Максимальный сдвиг подвижного основания  $\varphi_{\text{max}}$  за время  $T$

$$\varphi_{\text{max}} = 2\pi f t X_{\text{им}} .$$

Указанную величину ошибки можно снизить, если в систему определения координат цели ввести дополнительную информацию о движении подвижного основания на интервале  $T$ . Эту информацию можно получить, установив на подвижном основании датчики угловой скорости (ДУС) на основе волоконно-оптических гироскопов (ВОГ). Такие ДУС отличаются от других типов ДУС повышенными механическими характеристиками, малыми габаритами, достаточно высокой точностью в большом температурном диапазоне и поэтому могут устанавливаться на подвижные основания, испытывающие высокие перегрузки и большие перепады температур. Разработка и внедрение ВОГ начались в 70-х годах XX века как в нашей стране, так и за рубежом, и перспективы их использования отмечались в ряде источников, например в работе [1].

Структурная схема системы, обеспечивающей определение координаты цели в одной плоскости с использованием ДУС на основе ВОГ, изображена на рис. 1.

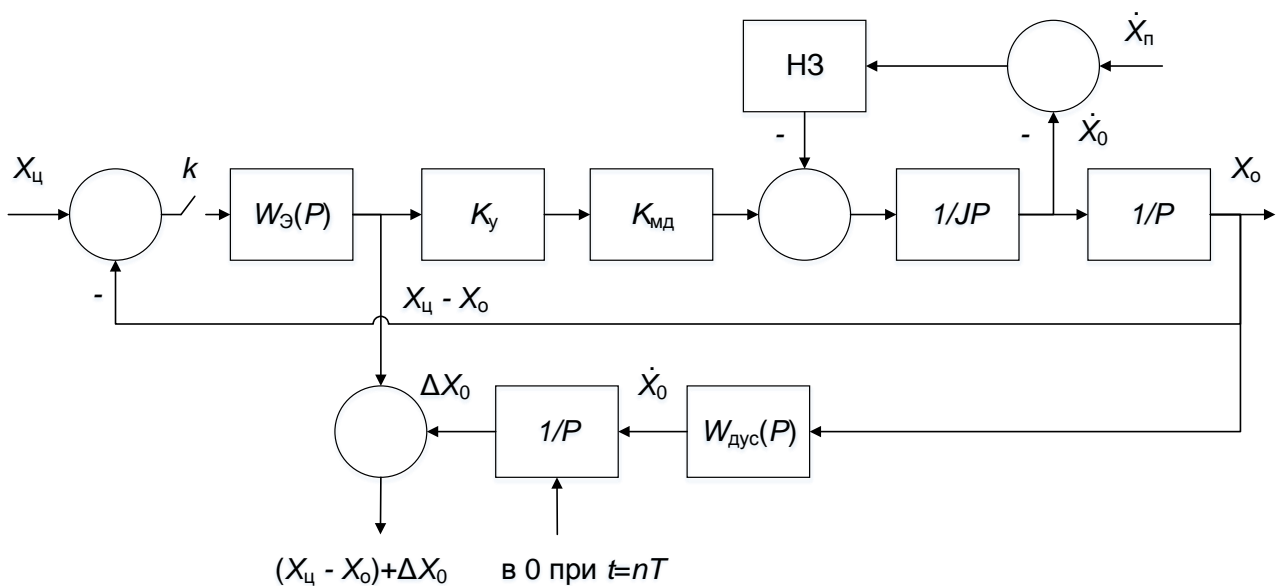


Рис. 1. Структурная схема системы, обеспечивающая определение координаты цели в одной плоскости с использованием датчиков угловой скорости на основе волоконно-оптических гироскопов

На рис. 1 обозначено:  $k$  – ключ, отражающий импульсный характер работы системы управления и замыкаемый с интервалом  $T$ ;  $X_{\text{ц}}$ ,  $X_{\text{о}}$  – координаты цели и подвижного основания соответственно;  $\dot{X}_{\text{о}}$  – угловая скорость движения оси измерителя координаты;  $\dot{X}_{\text{п}}$  – угловая скорость движения подвижного основания;  $\Delta X_{\text{о}}$  – приращение координаты движения оси подвижного основания за время наблюдения  $T$ ;  $W_{\text{э}}(P)$  – передаточная функция экстра-

полютора;  $K_y, K_{мд}$  – коэффициенты передачи усилителя и моментного датчика соответственно;  $J$  – момент инерции подвижного основания, вращающегося вокруг измерительной оси;  $HЗ$  – нелинейное звено со статической характеристикой в виде сухого трения, отражающее движение подвижного основания от действия возмущающего воздействия и описываемое уравнением вида

$$M_c = c \operatorname{sign}(\dot{X}_0 - \dot{X}_п),$$

где  $M_c$  – момент сухого трения;

$c$  – заданное (известное) значение момента сухого трения.

После ДУС с передаточной функцией  $W(P)$  в структурной схеме помещен интегратор, обнуляемый в моменты времени  $t = nT$ , кратные периоду обновления информации, получаемой от измерителя.

Координата цели  $X$ , в связанной с измерителем системе координат, вычисляется по формуле

$$X = (X_ц - X_о) + \Delta X_о.$$

Такой вариант вычисления координаты цели позволяет минимизировать ошибку ее определения, так как поправка  $\Delta X_о$  к разностной координате  $X_ц - X_о$ , вычисляемой как интеграл от оценки скорости движения оси подвижного основания в пределах периода обновления информации  $T$ , получаемой от измерителя координаты, позволяет учитывать движение оси, обусловленное как экстраполированным движением цели, так и возмущающим воздействием на подвижное основание.

Для иллюстрации предложенного варианта вычисления координаты цели определим ошибку, возникающую при определении координаты из-за конечной точности системы стабилизации при  $X_m = 20^\circ$ ,  $f = 1$  Гц,  $k = 100$ ,  $T = 1$  с

$$X_{um} = X_m / k = 20 \cdot 60 / 100 = 12 \text{ угл. мин.}$$

Максимальная угловая скорость движения подвижного основания

$$\Omega_{um} = X_{um} 2\pi f = 12 \cdot 3,14 \cdot 1 = 37,7 \text{ угл. мин/с.}$$

Максимальный угол отклонения подвижного основания

$$\varphi_{max} = 2\pi f T X_{um} = 12 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 1 = 75,4 \text{ угл. мин.}$$

Ошибка  $\varphi_{max}$ , вычисленная без учета поправки  $\Delta X_о$ , оказалась значительной особенно для ОЭС с полями зрения в единицы угловых градусов.

Введение поправки к координате цели, вычисленной с помощью ДУС на интервале дискретизации как уход оси подвижного основания, позволяет определить координату цели с ошибкой, обусловленной ошибками ДУС. При ошибках ДУС порядка 10 угл. с/с ошибка в вычислении поправки на интервале дискретизации  $T = 1$  с составит 10 угл. с.

Для разработки алгоритма вычисления уточненной координаты цели рассмотрим временные диаграммы для варианта измерителя координаты на основе ОЭС с матричным ПЗС-приемником [2].

На рис. 2 представлены временные диаграммы работы ОЭС с матричным ПЗС приемником, расположенном на подвижном основании.

Верхняя диаграмма показывает время работы двигателей системы слежения (коррекции)  $T_k$  и двигателей системы стабилизации  $T_c$  для двух случаев их включения. Во время работы этих систем сигналы с интегратора ДУС не должны использоваться в вычислении координат цели (интегратор ДУС на это время обнуляется).

На интервале между включениями систем слежения и стабилизации производится измерение координат цели. Временные диаграммы, поясняющие этот процесс, приведены на нижних диаграммах. Количество измерений координат цели будет зависеть от интервала времени между соседними включениями систем слежения и стабилизации.

На третьей сверху диаграмме показано, как может меняться время накопления сигнала в ФПУ по мере сближения с целью ( $T_{н1} > T_{н2}$ ).

Последняя диаграмма показывает, что интервал между считываемыми сигналами с ФПУ меняется ( $T_1 > T_2$ ). Это приводит к тому, что интервал  $T$  замыкания ключа  $k$  на структурной схеме, приведенной на рис. 1, будет уменьшаться по мере сближения с целью, что следует учитывать при анализе и синтезе системы слежения.

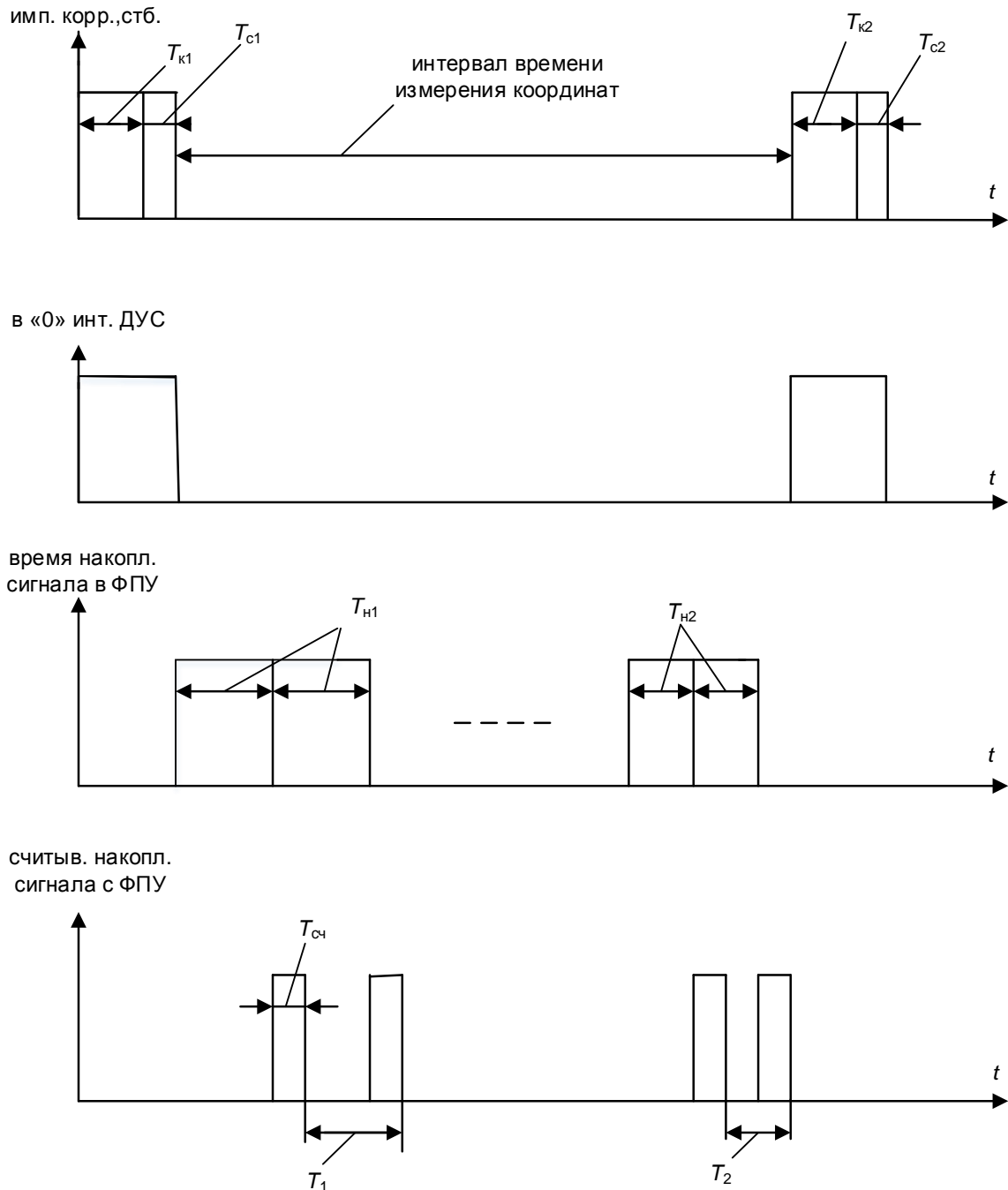


Рис. 2. Временные диаграммы работы оптико-электронного средства с матричным ПЗС приемником, расположенным на подвижном основании

На основании структурной схемы и временных диаграмм разработана блок-схема алгоритма вычисления уточненной координаты цели, приведенная на рис. 3. В блоке 1 задается

суммарное время работы систем слежения и стабилизации, значение которого определяет нулевое состояние интегратора ДУС (блоки 2, 3, 4).

В блоке 5 задается время наблюдения ФПУ цели (время накопления сигнала). После выполнения условия заданного времени наблюдения (блоки 6, 7) координата цели считывается с ФПУ (блок 8).

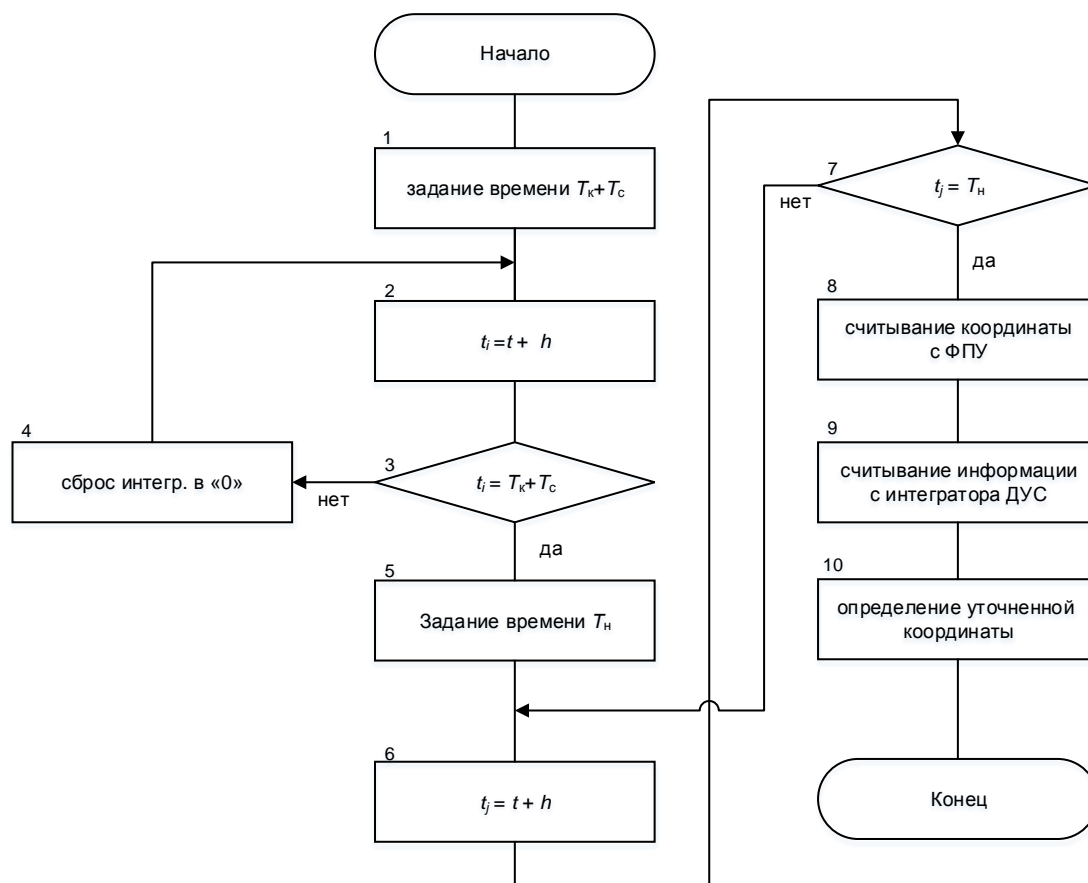


Рис. 3. Блок-схема алгоритма вычисления уточненной координаты цели

Поправка к определенной ФПУ координате цели берется с интегратора ДУС (блок 9), которая затем используется для определения уточненной координаты. Значение поправки будет определяться уходом измерительной оси из-за движения подвижного основания под действием не до конца подавленных возмущающих воздействий за время накопления и считывания сигнала от цели с ФПУ.

В блоке 10 определяется уточненная координата цели.

Таким образом, предложенный метод определения уточненной координаты и алгоритм его реализации позволяют измерять координату объекта с точностью, определяемой точностными характеристиками ДУС, и в варианте использования ДУС на основе ВОГ, координата может быть измерена с точностью не ниже единиц десятков угловых секунд.

### Список используемых источников

1. Волоконная оптика и приборостроение / М.М. Бутусов, С.Л. Галкин, С.П. Оробинский, Б.П. Пал. – Л.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
2. Быков Р.Е. Основы телевидения и видеотехники. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 399 с.

Л.М. Митник\*,

*доктор физико-математических наук, профессор;*

М.Л. Митник\*,

*кандидат технических наук;*

Е.С. Хазанова\*

\* Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва  
Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток

## **ОКЕАНИЧЕСКИЕ И АТМОСФЕРНЫЕ ФРОНТЫ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ТИХОГО ОКЕАНА НА СПУТНИКОВЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ**

Протяженные контрастные особенности на спутниковых изображениях океана, полученных радаром с синтезированной апертурой (РСА) и радаром с реальной апертурой (РРА), анализируются совместно с дополнительными спутниковыми и наземными данными. Данные были получены РСА со спутников Sentinel-1A/Sentinel-1B (С-диапазон), ALOS-1/ALOS-2 (L-диапазон) и РРА (Х-диапазон) со спутников Космос-1500/Космос-1766, а также спутниковыми скаттерометрами ASCAT и OSCAT и микроволновыми радиометрами AMSR2 и GMI. Океанические и атмосферные фронты проявляются на окружающем фоне в виде узких контрастных зон (границ). Амплитуда и знак контраста в каждом спектральном интервале зависят от комбинации параметров с каждой стороны рассматриваемого фронта. Вариации радиолокационного рассеяния, скорости ветра у поверхности и параметров атмосферы при пересечении фронтов в переходной зоне Куроиси–Оясио и во внетропических циклонах в северной части Тихого океана ясно показывают преимущества совместного анализа мультисенсорных данных.

Ключевые слова: РСА, ASAR, С-диапазон, Sentinel-1A/Sentinel-1B, PALSAR, L-диапазон, ALOS-1/ALOS-2, сигнатуры РСА, океанические фронты, переходная зона Куроиси–Оясио, атмосферные фронты.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Цель настоящей работы состоит в оценке контрастов УЭПР в зонах океанических и атмосферных фронтов на изображениях морской поверхности, полученных спутниковыми радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА), работающими в сантиметровом (С-band) и дециметровом (L-band) диапазонах длин волн. Фронты в океане и атмосфере разделяют водные/воздушные массы с различными физическими свойствами. Для океана это прежде всего различия в температуре и солености поверхности воды. С термическими фронтами могут быть связаны фронты биопродуктивности (концентрации хлорофилла и других параметров), поверхностных течений и волнения, которые регистрируются по изменению мощности рассеянных радиолокационных (РЛ) сигналов. При отсутствии облачности индикатором фронтов из космоса могут быть наблюдения в тепловом инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах длин волн.

Атмосферные фронты разделяют воздушные массы с разной температурой и часто сопровождаются резким изменением скорости и направления ветра у поверхности (характеристик поверхностного волнения). Мощная облачность и осадки в зоне фронта приводят к ослаблению РЛ сигналов при двукратном распространении через атмосферу, которое зависит от частоты, и к изменению шероховатости поверхности океана из-за вариаций характеристик ветра в области дождевых ячеек и шероховатости поверхности при падении капель дождя, влияющих на уровень принимаемых на спутнике сигналов. Интерпретацию вариаций яркости на радиолокационных изображениях (РЛИ) затрудняет многообразие природных факторов, определяющих рассеяние сигналов морской поверхностью. Для повышения правильности интерпретации привлекаются близкие по времени спутниковые ИК и видимые изображения, поля приводного ветра, облачности и осадков, восстановленные по данным скаттерометров и микроволновых радиометров, карты приземного анализа и другая сопутствующая информация.

## ОСОБЕННОСТИ РАЙОНА И СПУТНИКОВЫЕ ДАННЫЕ

Проявления океанических и атмосферных фронтов изучались по РЛИ окраинных морей и северной части Тихого океана, полученным РСА С-диапазона ASAR со спутников Envisat, Sentinel-1A/Sentinel-1B и РСА L-диапазона PALSAR со спутников ALOS-1/ALOS-2 [1, 2]. Выбранные районы характеризуется муссонным климатом и выраженными сезонными колебаниями параметров океана и атмосферы. Изрезанная береговая линия, граничащая с глубокой впадиной Тихого океана, проливы, соединяющие эти моря с океанами, резкие изменения подводной топографии в сочетании с течениями и переменными ветрами являются причиной сложной динамики воды. Взаимодействие теплого течения Куроисио и его ветвей с холодным течением Оясио, а также сильных приливных течений с островами и подводным рельефом также создает фронты, вихри и вихревые цепочки. Прохождение тропических и глубоких внетропических циклонов и сток рек заметно влияют на структуру и динамику вод. Резкие контрасты температуры и цвета океана обычно связаны с теплыми и холодными течениями, а также с воздействием ветра. Разница между температурами воды и воздуха, достигающая зимой 10–15°C, и сильный ветер приводят к усилению взаимодействия атмосферы и океана, формированию морского льда. Во время вторжений холодного воздуха в пограничном слое атмосферы наблюдаются конвективные гряды и ячейки и организованные вариации характеристик ветра. В Беринговом, Охотском и Японском морях наблюдаются интенсивные мезомасштабные циклоны (полярные ураганы) со скоростью ветра до 25–35 м/с [2, 3]. Детальное изучение динамических явлений в системе океан–атмосфера выполнялось по РЛИ с различной поляризацией излучаемых и принимаемых сигналов, при разных величинах пространственного разрешения, ширины полосы обзора и других параметров. При выборе РЛИ учитывалась доступность дополнительных данных: карт ТПО, подводного рельефа, полей приводного ветра и осадков, используемых при интерпретации РЛ сигнатур.

При предварительном анализе были определены океанические (течения, вихри, апвеллинги, внутренние волны, природные и антропогенные пленки, разливы нефти, морской лед и т. д.) и атмосферные (тропические, внетропические и полярные циклоны, фронты, дождевые ячейки, мезомасштабные конвективные гряды и ячейки и др.) явления, которые отображаются в поле шероховатости морской поверхности. Для повышения правильности классификации и получения количественных оценок к анализу привлекались видимые и инфракрасные (ИК) изображения со спутников Landsat-7/Landsat-8, Terra, Aqua, SNPP, яркостные температуры по измерениям микроволновых (МВ) радиометров AMSR-E, AMSR2 и GMI, поля ТПО и ветра, восстановленные по спутниковым данным, карты синоптического анализа, наблюдения метеорологических станций, что позволили проследить эволюцию явлений различных масштабов [2–8]. На рис. 1 и 2 приведены спутниковые РЛ и ИК изображения переходной зоны Куроисио–Оясио во время весеннего вторжения теплых вод Куроисио на север (пунктирные линии на рис. 1, а отмечают границы полосы обзора РЛС БО [6]). Пространственное разрешение данных РЛСБО (PPA) со спутников Космос-1500/Космос-1766 составляет 1–2 км при ширине полосы обзора 450 км [3], а радиометра AVHRR – примерно 1 км. Температурный контраст на границе теплого вихря 3 и холодных вод Оясио достигает ≈ 10–12°C [7]. Хорошо видна корреляция полей ТПО и РЛ рассеяния, визуализирующих сложную структуру взаимодействующих теплых и холодных вод.

Пространственное разрешение изображений, полученных РСА со спутника ALOS-2 и ИК радиометром со спутника Landsat 8 (рис. 2), намного выше, чем на рис. 1, что позволяет регистрировать тонкие особенности циркуляции. Они проявляются в неоднородностях течений размером ≈ 0,1–1 км, в воздействии рельефа дна в мелководных районах, в форме зон конвергенции, во внутренних волнах и др. При слабом ветре доминирующим механизмом, ответственным за РЛ контрасты, может быть подавление мелкомасштабного волнения пленками поверхностно-активных веществ. В северных акваториях подавление волн отмечается и ледяным салом, причем не только при слабом ветре [2, 4, 6].

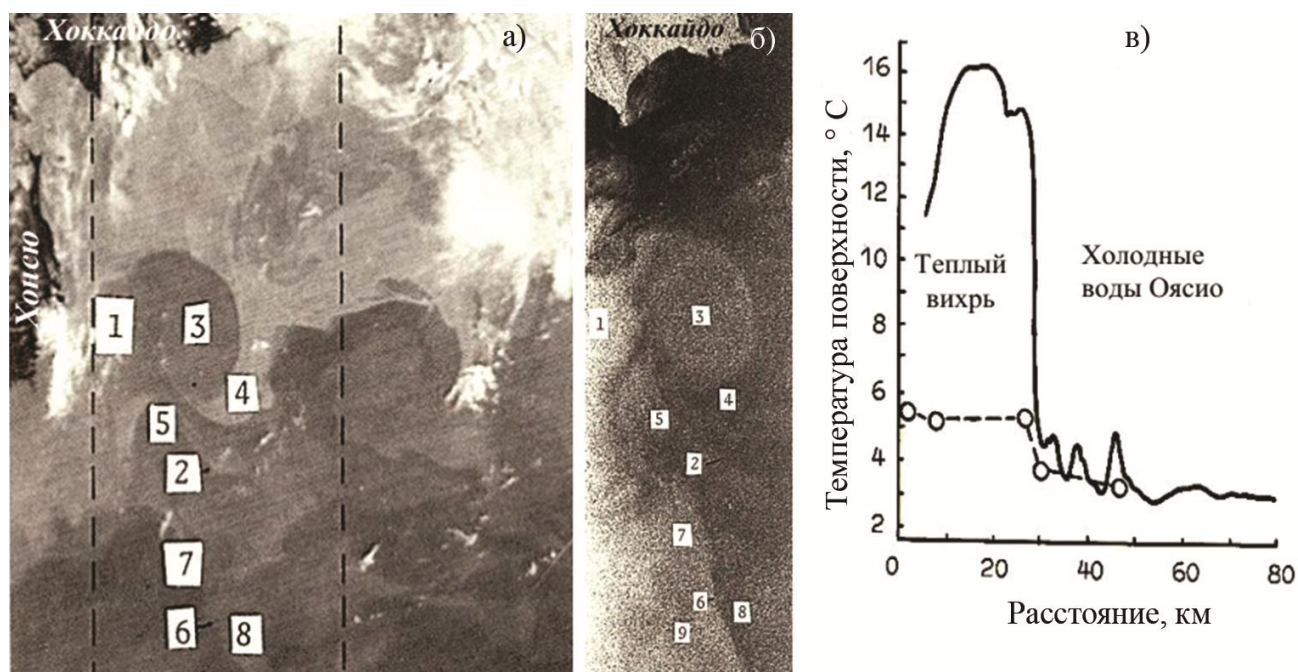


Рис. 1. Переходная зона Курошио–Оясио 30.09.1987:

а – ИК-изображение, полученное радиометром AVHRR со спутника NOAA-10, температура воды увеличивается с понижением яркости;

б – изображение РЛС БО со спутника Космос-1500; в – изменение температуры поверхности воды при пересечении теплого вихря 3 и холодных вод Оясио

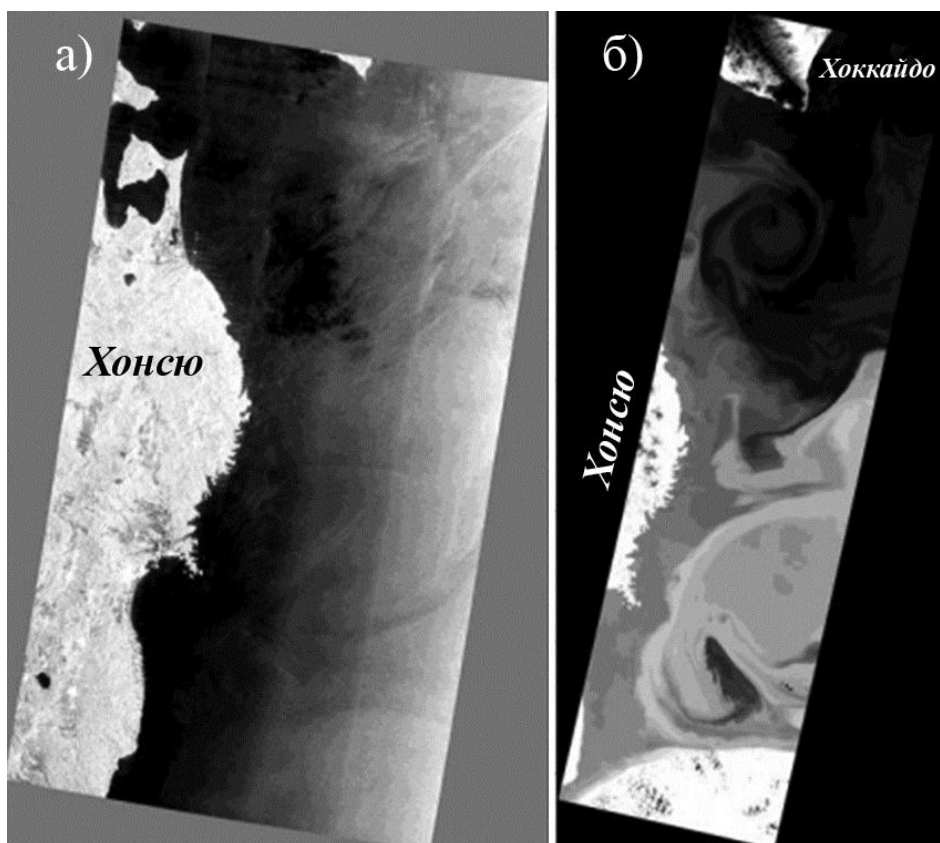


Рис. 2. Фронтальная зона Курошио–Оясио на изображениях:

а – PCA PALSAR-2 со спутника ALOS-2 14.04.2017 в 02:35 Гр.;

б – ИК-сенсора TIRS со спутника Landsat-8 15.04.2017 в 01:07 Гр.



## АТМОСФЕРНЫЕ ФРОНТЫ

Характерной особенностью атмосферных фронтов синоптического масштаба на РЛИ является протяженная область высоких градиентов рассеяния, что обусловлено резким изменением скорости и направления ветра при пересечении фронта (рис. 3, 4 и [2, 3, 6, 8]). Эти изменения хорошо выражены и в полях ветра, восстановленных по данным спутниковых скаттерометров ASCAT (рис. 3, в) и OSCAT с разрешением 12,5–25 км. Направление ветра указывает ориентация слабо контрастных полос на РЛИ по обе стороны фронта, а скорость ветра может быть найдена по геофизической модельной функции, поскольку для каждого пикселя известны угол между направлениями зондирования и ветра и угол падения [3, 9].

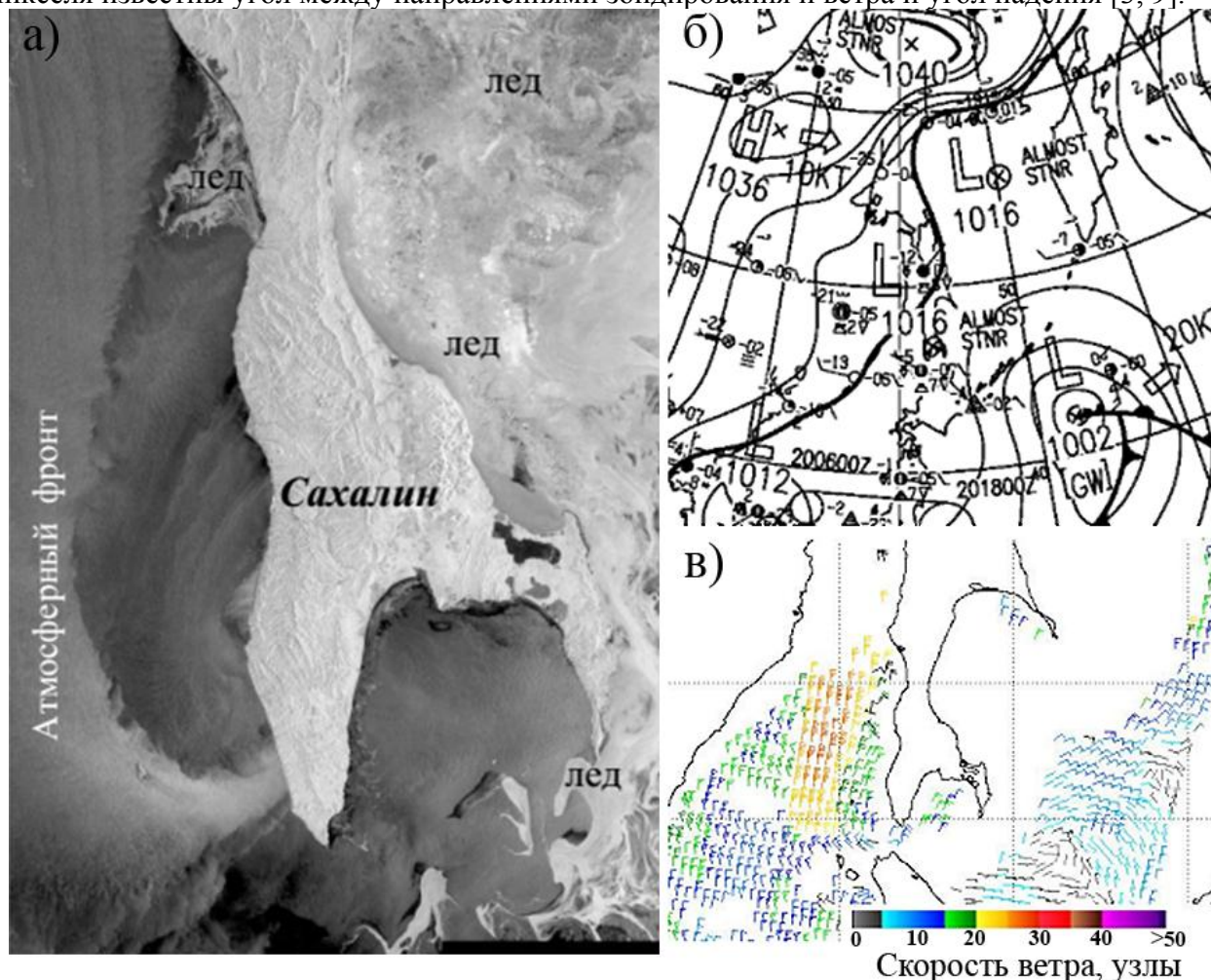


Рис. 3. Полярный циклон над северной частью Японского моря 19.01.2017:

- а – изображение PCA ASAR на ВВ поляризации со спутника Sentinel-1A в 20:39 Гр.;
- б – карта приземного анализа Японского метеорологического агентства за 18:00 Гр.;
- в – поле ветра по данным скаттерометра ASCAT со спутника MetOp-A в 23:59 Гр.

На линии фронта отмечаются неоднородности в виде лепестков, вихрей и других особенностей, характерных для зоны взаимодействия различных воздушных масс [6, 10]. Осадки, выпадающие из дождевых ячеек в зоне фронта, могут вызвать как рост, так и уменьшение яркости РЛИ в С- и L-диапазонах, что зависит от соотношения величины рассеяния РЛ сигналов морской поверхностью и рассеяния на каплях дождя [3, 11]. Фронты надежно регистрируются в полях яркостных температур  $T_{\nu}$  на частотах  $\nu$  по измерениям спутниковых МВ радиометров AMSR2, GMI и других при разрешении  $\approx 5\text{--}30$  км. Вариации  $T_{\nu}(\nu)$  определяются изменчивостью скорости ветра, интенсивности осадков, водозаписа облаков и паросодержания атмосферы [2, 6, 8, 11].



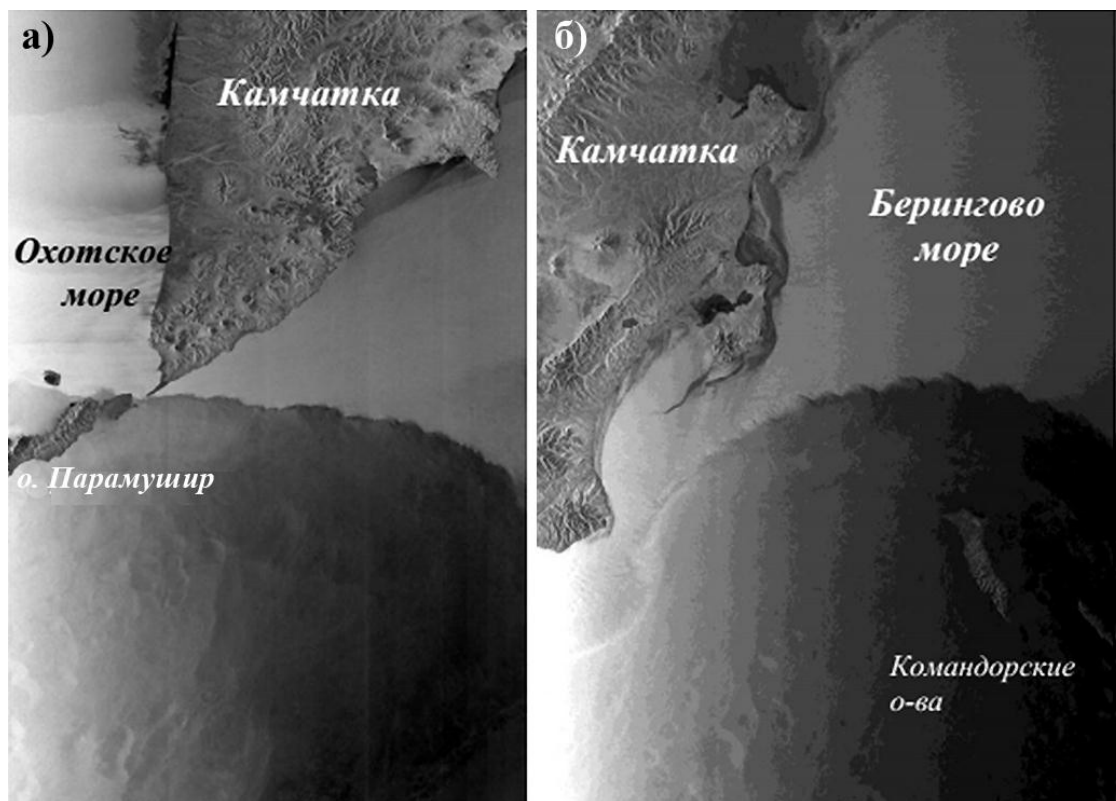


Рис. 4. Атмосферные фронты у побережья Камчатки на изображениях РСА ASAR со спутника Envisat: а – 16.02.2009 в 11:08 Гр.; б – 17.02.2009 в 10:38 Гр.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поле приводного ветра является важнейшим параметром, определяющим проявление на изображениях РСА разномасштабных океанических и атмосферных процессов, включая фронты. РЛИ служат надежным источником информации о динамических образованиях, что следует из сопоставления полей РЛ рассеяния, ТПО и данных моделирования. Многообразие факторов, влияющих на РЛ контрасты, затрудняет разработку моделей для решения прикладных задач по идентификации явлений по их отпечаткам на РЛИ, полученных на разных частотах и поляризациях. Для решения этой задачи необходимо продолжить эксперименты при различном состоянии океана и атмосферы, включая совместные активные (радиолокационные) и пассивные (радиометрические) измерения.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Дальний Восток ДВО РАН. Изображения РСА L-диапазона со спутников ALOS-1/ALOS-2 предоставлены Японским аэрокосмическим исследовательским агентством JAXA для выполнения проектов с ТОИ ДВО РАН.

## Список используемых источников

1. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 610 с.
2. Митник Л.М., Митник М.Л., Дубина В.А. Дистанционное радиофизическое зондирование системы океан-атмосфера // Дальневосточные моря России: в 4 кн. / под ред. В.А. Акуличева. – М.: Наука, 2007. – Кн. 4: Физические методы исследования. – С. 449–537.
3. Митник Л.М., Викторов С.В. Радиолокация поверхности Земли из космоса. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 200 с.

4. Митник Л.М., Хазанова Е.С. Зондирование морского льда в Татарском проливе спутниковыми РСА сантиметрового и дециметрового диапазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, №1. – С. 294–302.
5. Mitnik L., Dubina V. Satellite SAR sensing of oceanic dynamics in the Kuril Straits area // Proceedings of International Geoscience & Remote Sensing Symposium. July 22–27, 2012. Munich, Germany. – Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. – P. 7632–7635.
6. Митник Л.М., Митник М.Л. Спутниковое микроволновое зондирование Камчатки и окружающих море // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2015. – № 1. – С. 231–238.
7. Mitnik L.M., Lobanov V.B. Investigation of Oyashio-Kuroshio frontal zone using ALOS PALSAR images and ancillary information // Proceedings of International Geoscience & Remote Sensing Symposium. July 24–29, 2011. Vancouver, British Columbia, Canada. – Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011. – P. 1588–1592.
8. Митник Л.М., Митник М.Л. Мультисенсорный спутниковый мониторинг явлений и процессов в океане и атмосфере // Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана: в 2 кн. / под ред. В.А. Акуличева. – Владивосток: Дальнаука, 2013. – Кн. 1. – С. 208–230.
9. CMOD5.H—A high wind Geophysical Model Function for C-band vertically polarized satellite scatterometer measurements / S. Soisuvann, Z. Jelenak, P.S. Chang, S.O. Alsweiss, Q. Zhu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – Vol. 51, No. 6. – P. 3744–3760.
10. Young G.S., Sikora T.D., Winstead N.S. Use of synthetic aperture radar in fine-scale surface analysis of synoptic-scale fronts at sea // Weather Forecast. – 2005. – Vol. 20. – P. 311–327.
11. Katsaros K.B., Mitnik L.M., Black P.G. Microwave instruments for observing tropical cyclones // Typhoon Impact and Crisis Management / eds: D.L. Tang, G.J. Sui. – Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. – P. 5–61.

Л.М. Митник\*,

*доктор физико-математических наук, профессор;*

Е.С. Хазанова\*

\* Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичёва  
Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток

## **ФИНСКИЙ ЗАЛИВ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ И ЗЕМНЫЕ ПОКРОВЫ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ СПУТНИКОВЫХ РАДАРОВ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ САНТИМЕТРОВОГО И ДЕЦИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ ДЛИН ВОЛН**

Финский залив Балтийского моря, озера (Ладожское, Чудское, Псковское и др.), реки (Нева, Великая, Нарва и др.) обладают на радиолокационных изображениях (РЛИ) значительным контрастом на фоне окружающей территории Восточно-Европейской равнины и Карельского перешейка. Величина и знак радиолокационных (РЛ) контрастов определяются состоянием как водной поверхности (ветер, ледяной покров), так и земных покровов (тип и влажность почвы, характер растительности и пр.) и меняются с длиной волны и поляризацией зондирующих РЛ импульсов. Отчетливо выражена сезонная и синоптическая изменчивость РЛ контрастов, обусловленная изменением температуры поверхности, появлением и эволюцией снежного/ ледяного покровов и растительности и др. процессами, влияющими на величину удельной эффективной площади рассеяния (УЭПР)  $\sigma^0$ . В статье рассмотрены РЛИ района, полученные со спутников Envisat и Sentinel-1B в С-диапазоне и со спутников ALOS-1/-2 в L-диапазоне. Проанализирована изменчивость УЭПР и РЛ контрастов вдоль сечений, пересекающих различные типы покровов.

Ключевые слова: PCA, Финский залив, Балтийское море, С-диапазон, Sentinel-1B, Envisat ASAR, L-диапазон, ALOS-1/ALOS-2 PALSAR, морской лед, сигнатуры земных покровов, атмосферные явления.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Основные сведения о Балтийском море приведены в [1]. Для мониторинга и изучения параметров моря и окружающей территории и для оценки климатических трендов используются данные гидрометеорологических станций, а при отсутствии облачности – и спутниковые видимые и инфракрасные (ИК) изображения. В данной работе количественная информация о поверхности извлекалась при обработке радиолокационных изображений (РЛИ). РЛИ изображения района были получены радаром с синтезированной апертурой (РСА) со спутников ALOS-1 и ALOS-2 Японского аэрокосмического исследовательского агентства JAXA и Envisat и Sentinel-1B Европейского космического агентства (ЕКА). Спутники JAXA зондируют Землю на частоте  $\nu = 1,27$  ГГц (L-диапазон,  $\lambda = 23,62$  см), а спутники ЕКА – на  $\nu = 5,3$  ГГц (С-диапазон, длина волны  $\lambda = 5,66$  см). Характеристики и режимы работы космических радаров приведены на сайтах <http://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/envisat>, <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar> и <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/a/alos-2>, а также в [2, 3].

### **ФИНСКИЙ ЗАЛИВ И ОКРУЖАЮЩИЕ ТЕРРИТОРИИ**

На рис. 1 показано РЛИ, полученное 31.12.2018 PCA SAR-C со спутника Sentinel-1B. Отчетливо выделяется Финский залив и многочисленные озера на Карельском перешейке. Темный тон изображения означает, что ветер слабый и удельная эффективная площадь рассеяния (УЭПР)  $\sigma^0$  мала, в отличие от яркой южной части Ладожского озера, где дует сильный ветер. На юге озера узкая темная полоса ледяного сала разделяет зону сильного волнения от основного массива льда [4, 5]. Лед образовался у северного берега озера, к востоку и к западу от дамбы в Финском заливе и на Чудском озере. Санкт-Петербург, отходящие от него линии (дороги и зоны вокруг), Хельсинки, небольшие города и поселки выделяются по яркому тону.

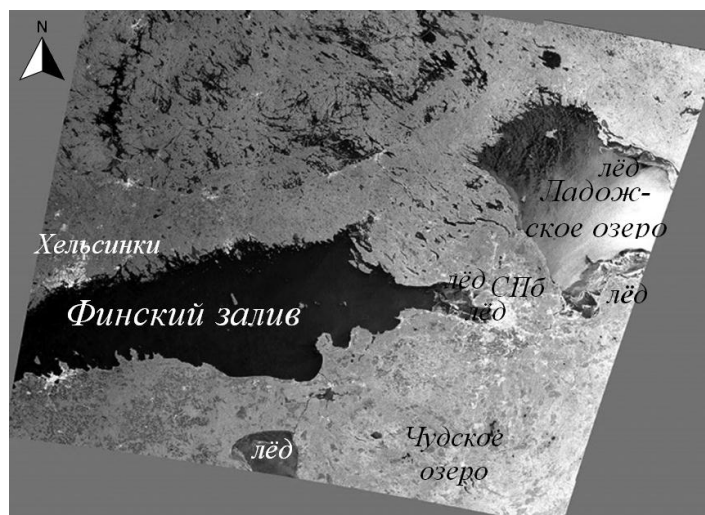


Рис. 1. Изображение Финского залива и окружающих территорий, полученное PCA SAR-C на ГТ поляризации со спутника Sentinel-1B 31.12.2018 в 04:32 Гр.

На территории водосборного бассейна Финского залива проживают более 13 млн. человек из трех стран. По напряженности судоходства, строительства портов и антропогенного прессы Финский залив занимает особое место среди регионов Балтийского моря, что требует проведения регулярного мониторинга гидрометеорологических процессов в заливе и на окружающей территории независимо от облачности.

На рис. 2, а представлено PCA изображение восточной части Финского залива и окружающих его территорий, полученное со спутника ALOS-1 19.01.2011. На увеличенных фрагментах северной части РЛИ (рис. 2, б, в) различается больше деталей. Залив и река Нева покрыты гладким (на дециметровых волнах) льдом и отображаются темным тоном. Светлые и яркие полосы, пересекающие ледяной покров в заливе и на Неве, – торосы, образуемые судами [5].

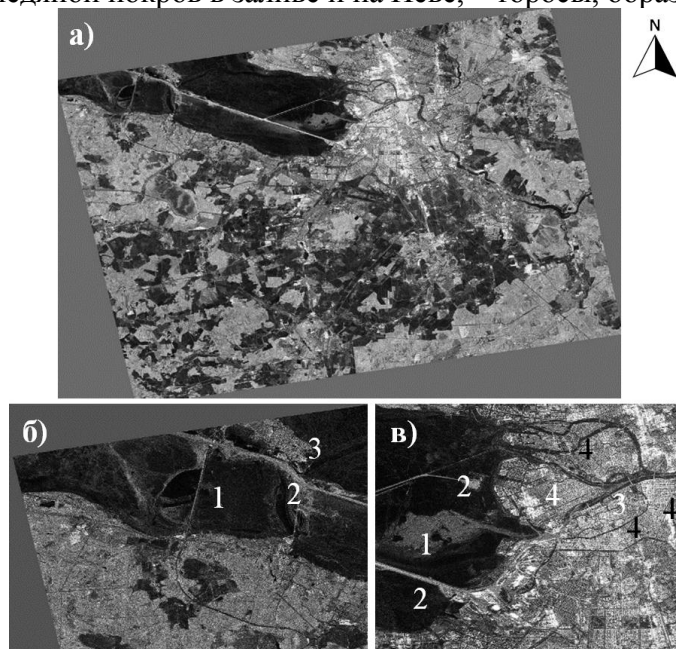


Рис. 2. Финский залив и окружающие территории:

а – изображение PCA PALSAR на ГТ поляризации со спутника ALOS-1 19.01.2011 в 20:05 Гр.;

б – фрагмент рис. 2, а: 1 – южный участок дамбы, 2 – трасса прохода судов во льдах, 3 – восточная часть Кронштадта;

в – фрагмент рис. 2, а: 1 – пятно открытой воды, 2 – трассы прохода судов во льдах, 3 – дельта Невы и 4 – историческая часть Санкт-Петербурга

Высокой яркостью характеризуется Санкт-Петербург. Проспекты, улицы и взлетно-посадочные полосы аэропорта Пулково выделяются по темному тону – рассеяние асфальтовых и бетонных покрытий мало. Яркость покровов к югу и востоку от залива меняется в широких пределах. Четко очерчены границы сельскохозяйственных угодий. Шероховатость полей зимой определяется степенью их обработки осенью после уборки урожая (черный пар, озимые культуры и пр.). Серым тоном отображаются лесные массивы, дачные поселки, где на участках, как правило, растут деревья [4].

### ВАРИАЦИИ УЭПР В САНТИМЕТРОВОМ И ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНАХ

Для классификации типов поверхностей могут быть использованы статистики УЭПР на различных длинах волн и поляризациях. На рис. 3 показан профиль УЭПР через ледяной покров к востоку от дамбы (1 пиксель равен 25 м). РЛИ получено PALSAR-2 на ГГ поляризации 14 декабря 2016 г. Значения  $\sigma^0$  на ГГ поляризации для гладкого льда находятся в пределах  $\approx -(20-25)$  дБ. Торосистый лед рассеивает намного интенсивнее  $\sigma^0 \approx -(7-14)$  дБ.

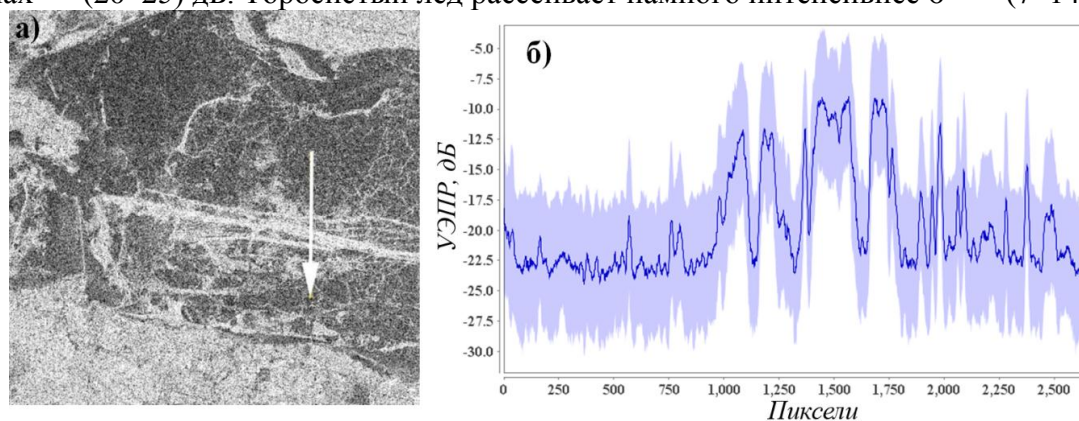


Рис. 3. Вариации УЭПР:

*a* – фрагмент изображения PCA PALSAR со спутника ALOS-2 на ГГ поляризации за 14.12.2016 в 10:22 Гр.; *б* – профиль УЭПР вдоль сечения, показанного стрелкой на рис. 3, *a*

Профили на рис. 4 дают представление о вариациях УЭПР Финского залива, земных покровов и формирующегося ледяного покрова Чудского озера (стрелки на рис. 4, *a* и *г* показывают направления сечений). Высокий уровень рассеяния для Финского залива (рис. 4, *д*, Envisat) обусловлены тем, что профиль проходил у края полосы обзора PCA (при минимальных значениях угла падения). Изменчивость  $\sigma^0$  морской поверхности и ледяного покрова в С- и L-диапазонах заметно больше, чем у земных покровов. Минимальные значения  $\sigma^0$  отмечаются при штиле и от ледяного сала, максимальные – при сильном ветре, от торосистого льда [5] и от городских агломераций.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

РЛИ служат надежным источником информации о динамических образованиях, что следует из сопоставления полей УЭПР, приводного ветра и данных моделирования. Для получения достоверных статистических данных, требуемых для классификации типов подстилающей поверхности, могут быть использованы измерения на суше и с попутных судов, близкие по времени к спутниковым. Даты и время зондирования известны заранее, что позволяет подобрать измерения в С- и в L-диапазонах в заданном интервале.



Работа выполнена при частичной поддержке целевой субсидии № 18-И-010. Изображения со спутников ALOS-1/ALOS-2 предоставлены Японским аэрокосмическим исследовательским агентством JAXA для выполнения проектов с ТОИ ДВО РАН. Авторы благодарят Европейское космическое агентство за изображения РСА со спутников Envisat и Sentinel-1В.

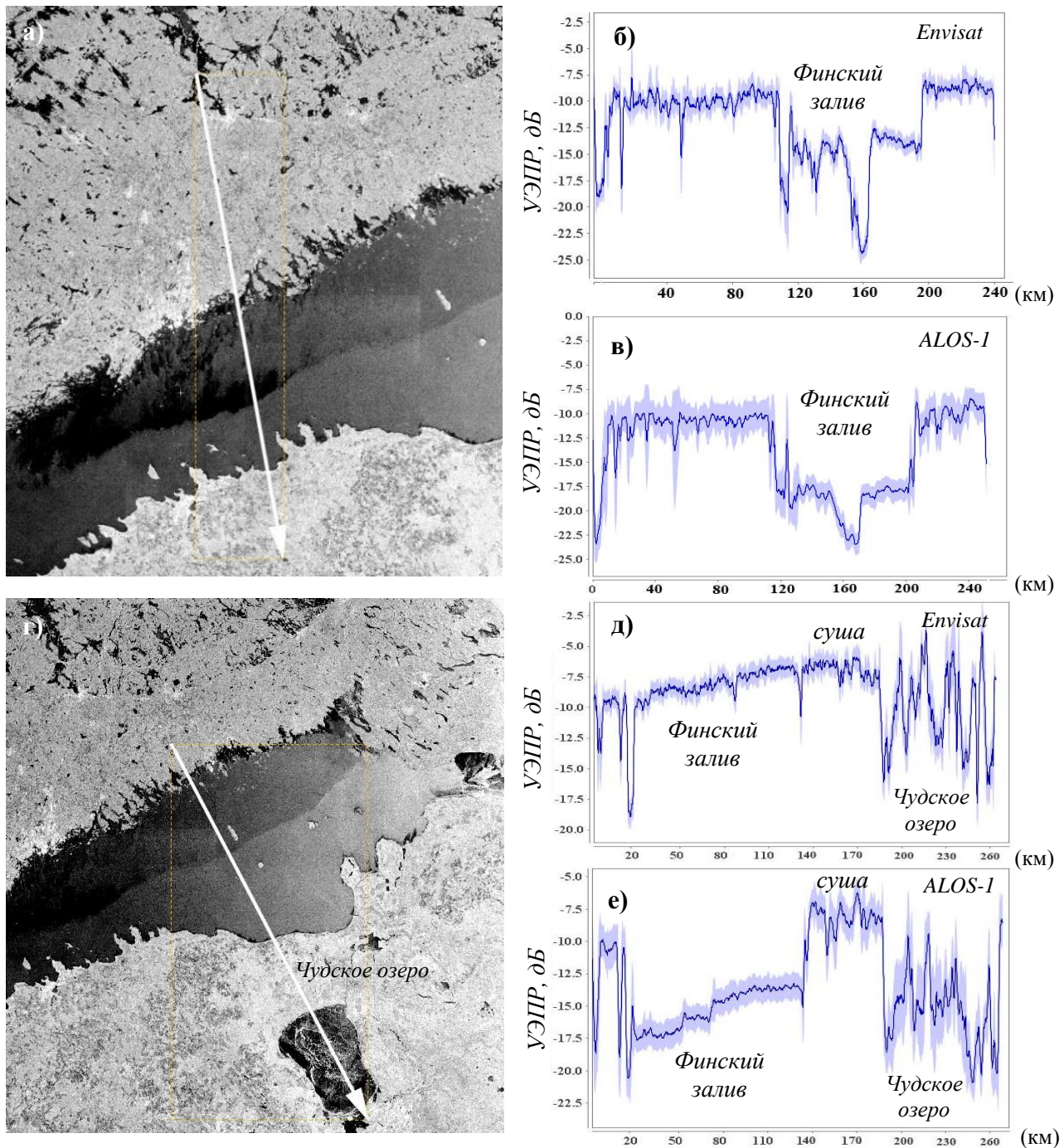


Рис. 4. Вариации УЭПР при пересечении Финского залива и окружающих территорий на РЛИ за 02.12.2010:  
 а, з – изображения PALSAR со спутника ALOS-1 в 09:09 Гр.;  
 б, д – УЭПР по данным ASAR на ВВ поляризации в 8:48 Гр. (спутник Envisat, РЛИ не показано; в, е – УЭПР по данным ALOS-1 на ГГ поляризации

### Список используемых источников

1. Моря России – Балтийское море. – URL: <https://geographyofrussia.com/morya-rossii-baltijskoe-more/> (дата обращения: 12.12.2019).
2. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук. – М.: Радиотехника, 2010. – 610 с.
3. *Shimada M.* ALOS-2 Science Program // Proceedings of International Geoscience & Remote Sensing Symposium. July 21–26, 2013. Melbourne, Australia. – Piscataway, N.J.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013. – P. 2400–2403.
4. Land cover mapping using Sentinel-1 SAR data / Abdikan S., et al. // XXIII International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress. 12–19 July, 2016. Prague, Czech Republic. – International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2016. – The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. XLI-B7. – P. 757–761.
5. *Митник Л.М., Хазанова Е.С.* Зондирование морского льда в Татарском проливе спутниковыми РСА сантиметрового и дециметрового диапазонов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 294–302.

И.Н. Ростокин\*,  
*доктор технических наук, доцент;*  
Е.А. Ростокينا\*,  
*кандидат технических наук, доцент;*  
Е.В. Федосеева\*,  
*доктор технических наук, доцент;*  
Г.Г. Щукин\*\*  
*доктор физико-математических наук, профессор*

\* Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Муром

\*\* Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

## **МНОГОЧАСТОТНЫЕ МИКРОВОЛНОВЫЕ РАДИОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАДИОТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КОНВЕКТИВНОЙ ОБЛАЧНОСТИ В УСЛОВИЯХ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОПАСНЫХ АТМОСФЕРНЫХ МЕТЕОЯВЛЕНИЙ**

В статье приведены результаты многочастотных микроволновых исследований атмосферы в период формирования опасных погодных явлений (сильного дождя) с помощью трехдиапазонной радиометрической системы с компенсацией фоновых шумов. Выполнена корреляционная обработка результатов измерений радиотеплового излучения облачной атмосферы, оценена их корреляция с измеренной в приземном слое атмосферы интенсивностью дождя, показана перспективность такого метода для формирования прогнозов опасных погодных явлений.

Ключевые слова: микроволновое радиометрическое исследование облачной атмосферы; компенсация фоновых шумов; опасные погодные явления, коэффициент корреляции.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Микроволновые радиометрические измерения собственного радиотеплового излучения атмосферы позволяют дистанционно оценивать ее метеорологические параметры. Интенсивность такого излучения зависит от содержания кислорода, водяного пара, жидкокапельных облаков и осадков. Решение обратных задач радиометеорологии позволяет восстанавливать по результатам микроволновых радиометрических измерений высотный профиль температуры и влажности, а также определять влагозапас атмосферы, водозапас облаков и интенсивность осадков [1, 2].

Дистанционные радиометрические исследования атмосферы являются перспективным направлением оперативного контроля пространственно-временных изменений ее параметров, поэтому точность микроволновых радиометрических измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы напрямую связана с достоверностью прогнозов, что имеет большое значение при формировании сверхкраткосрочных прогнозов (в пределах от 0 до 6 ч от срока наблюдения) развития опасных погодных явлений.

### **ОПАСНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ, СВЯЗАННЫЕ С ЭВОЛЮЦИЕЙ КОНВЕКТИВНОЙ ОБЛАЧНОСТИ**

Непрерывные микроволновые измерения радиотеплового излучения конвективных облаков в процессе их эволюции в сочетании с радиолокационными измерениями позволяют ре-



шать задачи оперативного обнаружения таких опасных метеорологических явлений, как гроза, смерч, шквал, ливневые осадки, град, ледяной дождь, метель.

Кучево-дождевые облака Сб являются пространственно ограниченными метеообразованиями, прохождение которых может сопровождаться ливневыми дождями, градом, грозами, т. е. формированием опасных погодных явлений. При зондировании облаков с поверхности Земли выходной сигнал СВЧ радиометрической системы содержит составляющие обусловленные приемом радиотеплового излучения из всего окружающего антенну пространства: из области главного лепестка диаграммы направленности (ДН) – излучения облака, из области рассеяния ДН – фонового шума, создаваемого окружающим систему пространством.

С целью уменьшения влияния фонового шума на результаты измерений был реализован предложенный многочастотный микроволновый радиометрический метод зондирования с пространственным и поляризационным разрешением радиотеплового излучения облака при выполнении компенсации вклада фонового шума путем формирования дополнительного входного сигнала компенсации в системе и реализацией разностного приема в радиометре [3, 6].

## АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для микроволновых измерений радиотеплового излучения облачной атмосферы использовалась трехдиапазонная микроволновая радиометрическая система с компенсацией фоновых шумов при организации дополнительного антенного канала со специальной формой ДН и формированием разностного выходного сигнала в радиометре. Были получены данные измерений радиотеплового излучения в теплое время года в условиях выпадения осадков при фиксированном направлении зондирования, соответствующего зенитному углу  $5^\circ$ .

Внешний вид трехдиапазонной СВЧ радиометрической системы, установленной на крыше здания Муромского института, представлен на рис. 1 и 2. Для комплексной оценки метеоусловий и характеристики облачности атмосферы учитывались данные Муромской межрайонной метеостанции, расположенной на расстоянии 15 км от места базирования микроволнового радиометрического комплекса.

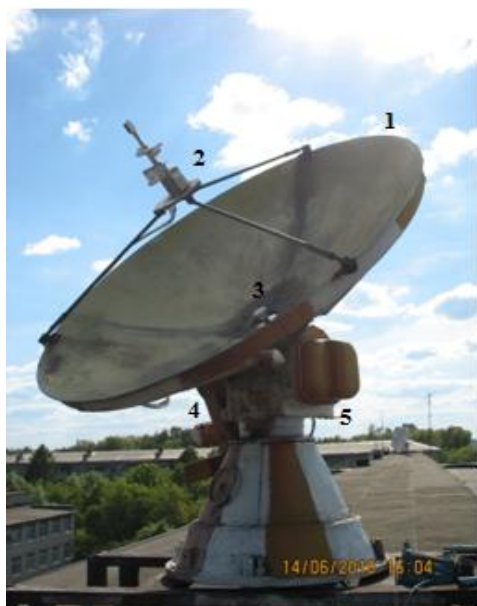


Рис. 1. Многочастотная микроволновая радиометрическая система

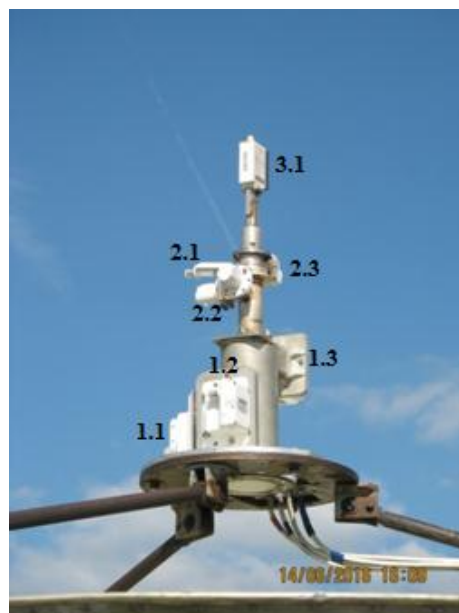


Рис. 2. Многочастотный двухмодовый облучатель

В состав системы, изображенной на рис. 1, входит зеркало диаметром 2400 мм (1), многоканальный облучатель с формированием сигналов компенсации в дополнительных каналах на основе двухмодового режима приема (2), микроволновый калибратор (3); угломестный (4) и азимутальный (5) приводы антенны. На рис. 2 показана конструкция многочастотного двухмодового облучателя со следующими обозначениями: основной канал 7,5 см ВЕРТ поляризации (1.1), основной канал 7,5 см ГОР поляризации (1.2), дополнительный канал 7,5 см компенсации (1.3), основной канал 3,2 см ВЕРТ поляризации (2.1), основной канал 3,2 см ГОР поляризации (2.2), дополнительный канал 3,2 см компенсации (2.3), основной канал 1,35 см ГОР поляризации (3.1). СВЧ приемный блок состоит из трех приемно-усилительных блоков, на выходе которых формируются низкочастотные сигналы, пропорциональные мощности входных сигналов системы, принятых в трех диапазонах (7,5, 3,2, 1,35 см), на двух линейных ортогональных поляризациях по основным измерительным каналам и дополнительному каналу компенсации [4].

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для каждого случая измерения радиотеплового излучения облачной атмосферы с выпадением осадков комплексный набор данных содержал временные зависимости выходных сигналов системы, соответствующих приему по основным и дополнительным антенным каналам, и синхронизированные по времени данные измерений метеопараметров приземного слоя атмосферы (интенсивности осадков, влажности и температуры), полученные с мобильной автоматической метеостанции, расположенной в месте базирования микроволновой радиометрической системы. Пример формирования такого комплекса измерительной информации при зондировании облачной атмосферы 11 июня 2017 года приведен на рис. 3.

Данные измерений многочастотной радиометрической системы синхронизированы по времени с данными измерений метеопараметров автоматической метеостанции, что позволило провести корреляционный анализ результатов зондирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

Результаты корреляционной обработки данных многочастотных измерений радиотеплового излучения атмосферы от 11.06.2017 г. в условиях выпадения осадков представлены в табл. 1, 3 и 5. Расчет коэффициентов корреляции выходных сигналов радиометрической системы с интенсивностью осадков выполнен в двух вариантах: с разделением и без разделения данных измерений по интенсивности дождя. Разделение результатов измерений осуществлялось при разделении по интенсивности осадков меньше и больше 1 мм/ч.

В табл. 2, 4 и 6 приведены значения коэффициента корреляции выходных сигналов и интенсивности дождя при реализации в системе процедуры компенсации влияния фоновых шумов.

Таблица 1

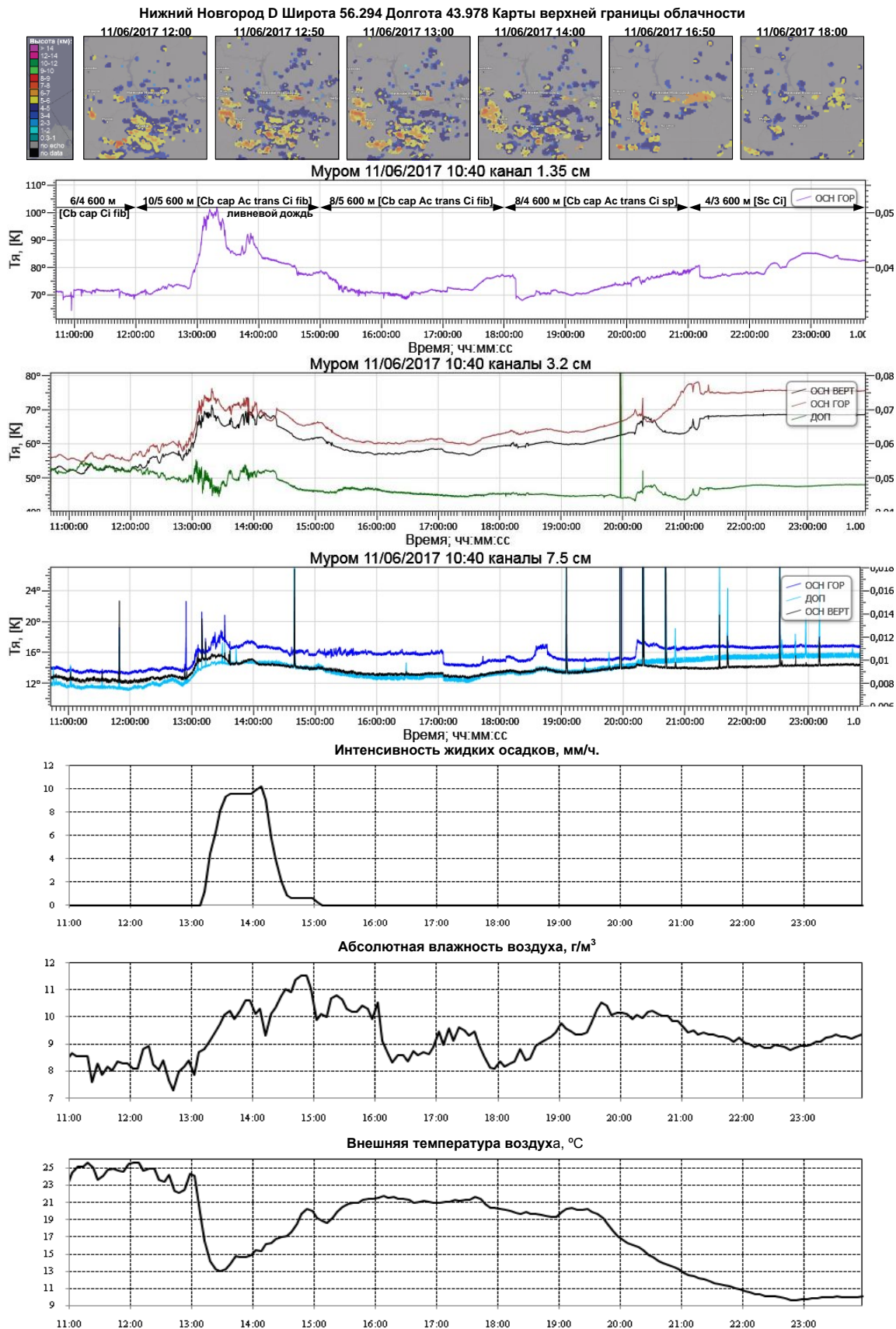
### Коэффициенты корреляции без разделения по интенсивности осадков

3,2 ОСН ГОР	7,5 ДОП	3,2 ОСН ВЕРТ	7,5 ОСН ГОР	3,2 ДОП	7,5 ОСН ВЕРТ	1,35 ОСН ГОР
-0,18	0,27	0,12	0,07	0,25	-0,05	0,34

Таблица 2

### Коэффициенты корреляции при разностных значениях без разделения по интенсивности с компенсацией фоновых шумов

3,2 ОСН ГОР-3,2 ДОП	3,2 ОСН ВЕРТ-3,2 ДОП	7,5 ОСН ГОР-7,5 ДОП
-0,22	0,15	-0,26



*Рис. 3. Результаты измерений радиотеплового излучения атмосферы микроволновой системой и метеопараметры атмосферы при развитии опасного явления в виде сильного ливня от 11.06.2017*

Таблица 3

**Коэффициенты корреляции при интенсивности осадков меньше 1 мм/ч**

3,2 ОСН ГОР	7,5 ДОП	3,2 ОСН ВЕРТ	7,5 ОСН ГОР	3,2 ДОП	7,5 ОСН ВЕРТ	1,35 ОСН ГОР
-0,14	0,15	-0,07	-0,04	0,12	-0,09	0,08

Таблица 4

**Коэффициенты корреляции при разностных значениях при интенсивности осадков меньше 1 мм/ч с компенсацией фоновых шумов**

3,2 ОСН ГОР–3,2 ДОП	3,2 ОСН ВЕРТ–3,2 ДОП	7,5 ОСН ГОР–7,5 ДОП
-0,14	-0,14	-0,15

Таблица 5

**Коэффициенты корреляции при интенсивности осадков больше 1 мм/ч**

3,2 ОСН ГОР	7,5 ДОП	3,2 ОСН ВЕРТ	7,5 ОСН ГОР	3,2 ДОП	7,5 ОСН ВЕРТ	1,35 ОСН ГОР
-0,01	-0,04	0,64	-0,05	0,03	-0,33	0,94

Таблица 6

**Коэффициенты корреляции при разностных значениях при интенсивности осадков больше 1 мм/ч с компенсацией фоновых шумов**

3,2 ОСН ГОР–3,2 ДОП	3,2 ОСН ВЕРТ–3,2 ДОП	7,5 ОСН ГОР–7,5 ДОП
-0,04	0,56	0,04

Полученные данные корреляционной обработки показали наличие сильной корреляционной связи между результатами радиометрических измерений и интенсивностью дождя и влажности приземного слоя атмосферы, а выполнение компенсации влияния фоновых шумов в системе сопровождается усилением корреляции, особенно в диапазоне с центральной длиной волны 7,5 см.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования и выполненная оценка корреляции результатов измерения интенсивности радиотеплового излучения атмосферы с интенсивностью осадков и влажностью приземного слоя атмосферы показали хорошую возможность оперативной оценки состояния атмосферы с усилением корреляции при выполнении компенсации влияния фоновых шумов в радиометрической системе. Была выявлена достаточно сильная корреляция выходного сигнала радиометрической системы в диапазоне 1,35 см с влажностью атмосферы, в диапазоне 3,2 см – с влажностью и интенсивностью дождя, а также с выпадением снега, а на длине волны 7,5 см – с интенсивностью осадков.

Таким образом, многочастотные радиометрические исследования показали наличие многофакторной корреляции результатов радиометрических измерений с метеопараметрами атмосферы, что позволяет выполнять непрерывный контроль процессов эволюции облаков для решения задач прогнозирования опасных метеоявлений.

## Список используемых источников

1. Шукин Г.Г., Степаненко В.Д., Снегуров А.В. Перспективные направления радиолокационных наблюдений за атмосферой // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2010. – № 561. – С. 223–241.

2. Некос А.Н., Некос В.Е., Щукин Г.Г. Дистанционные методы исследований природных объектов: монография. – СПб.: РГГМУ, 2009. – 319 с.

3. Компенсация помех в работе СВЧ радиометрических систем / Е.В. Федосеева, Г.Г. Щукин, И.Н. Ростокин, Е.А. Ростокينا // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – № 1 (13). – С. 50–62.

4. Ростокин И.Н., Федосеева Е.В., Щукин Г.Г. Сверхвысокочастотная радиометрическая система с внешним тестовым шумовым сигналом // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – Вып. 653. – С. 204–209.

5. Федосеева Е.В., Ростокин И.Н., Щукин Г.Г. Оценка условий приема в двухканальной СВЧ радиометрической системе по внешнему тестовому сигналу // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск, 2016. – Т. 59, № 12/3. – С. 116–120.

6. Ростокин И.Н. Многочастотный микроволновый радиометрический метод обнаружения и контроля опасных атмосферных метеоявлений, устойчивый к изменяющимся условиям измерений // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2018. – № 1 (37). – С. 6–21.

7. Ростокин И.Н. Анализ результатов угломестного многочастотного зондирования однородной атмосферы микроволновой радиометрической системой с компенсацией влияния фонового излучения // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – № 8. – С. 49–53.

О.И. Бернгардт\*;  
Г.А. Жеребцов\*;  
В.И. Куркин\*;  
Д.С. Кушнарев\*;  
В.П. Лебедев\*;  
А.С. Логовский\*\*;  
А.В. Медведев\*;  
С.В. Олемской\*;  
А.В. Осипов\*\*;  
К.Г. Ратовский\*;  
А.В. Тимошенко\*\*;  
М.Ю. Филиппов\*\*;  
Ю.В. Ясюкевич\*

\* Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН, г. Иркутск;

\*\* Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца, г. Москва

## **ПЕРСПЕКТИВЫ СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ИСЗФ СО РАН И АО РТИ В ЗАДАЧАХ УЧЕТА ИОНОСФЕРНОЙ ОШИБКИ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ СРЕДСТВ РАДИОЛОКАЦИИ И РАДИОСВЯЗИ**

В публикации представлены направления работ по изучению ионосферы и показано развитие экспериментального комплекса на основе инструментов ИСЗФ СО РАН и АО РТИ. Основное приложение фундаментальных ионосферных исследований – повышение точности радиотехнических коротковолновых средств радиолокации и радиосвязи. В докладе обсуждаются возможности существующих экспериментальных средств и создаваемых в рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» для коррекции ионосферной ошибки.

Ключевые слова: ионосфера, ионосферные возмущения, ионосферная ошибка, радиолокация, радиосвязь.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Существует значительное количество радиотехнических средств, использующих ионосферный радиоканал, включая средства навигации, связи, локации. Качество функционирования таких систем зависит от состояния ионосферы – среды распространения радиоволн. Особенно сильно эта зависимость проявляется в условиях магнитных бурь и иных неблагоприятных гелиогеофизических факторов. Более того, собственные потенциальные возможности современных систем значительно превосходят те ограничения на точность работы, которые накладывает ионосфера [1]. В результате на первый план вышла проблема устранения ошибок ионосферного происхождения [2]. Возможности современных радаров для оценки ионосферной ошибки рассматривались в [3]. Повышение точности при решении такой задачи достигается использованием физических моделей в сочетании с данными сети диагностических средств. Сложность системы делает практически невозможным получение точности при моделировании выше уровня 30%. Особенно проблематично использовать моделирование в условиях ионосферных возмущений и ионосферных неоднородностей. В таких условиях на первый план выходит необходимость текущего мониторинга ионосферной обстановки.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Экспериментальный комплекс ИСЗФ СО РАН в настоящее время включает следующие основные средства для мониторинга ионосферы:

1. Уникальный для РФ Иркутский радар некогерентного рассеяния (ИРНР) [4] прошел глубокую модернизацию в 2003–2016 годах, которая существенно повысила его диагностические характеристики. ИРНР позволяет получать профиль электронной концентрации (ЭК), а также температуры и скорости ионов и электронов как ниже, так и выше F2-максимума. В настоящее время ИРНР решает задачи контроля космических аппаратов и космического мусора, участвует в активных космических экспериментах. Совместно с другими инструментами прибайкальского комплекса позволяет осуществлять валидацию ионосферных моделей [5] и проводить исследования перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) [6]. Накопленный на радаре большой объем экспериментальных данных (~50 дней в год) позволяет проводить комплексный анализ ионосферной обстановки, в том числе и в задачах оценки ионосферных поправок.

2. Комплекс цифровых ионозондов DPS-4, позволяющих получать профиль ЭК до высоты максимума F2-слоя [7]. Комплекс состоит из двух инструментов, расположенных в средних (Иркутск) и высоких (Норильск) широтах, с временным разрешением 15 мин в стандартном режиме и 5 мин – в ускоренном. Накопленный массив экспериментальных данных с декабря 2002 года позволяет изучать как временную, так и пространственную изменчивость ионосферы и оценивать точность ионосферных моделей [5].

3. Быстрый многопозиционный ионозонд с линейной частотной модуляцией излучаемого сигнала (ЛЧМ-ионозонд) является оригинальной разработкой ИСЗФ СО РАН [8] и функционирует с 2011 года. Развернутая ИСЗФ СО РАН сеть на его основе позволяет проводить многоканальную одновременную регистрацию сигналов вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы над азиатской частью РФ на трассах Торы–Торы, Диксон–Торы, Кипр–Торы, Хабаровск–Торы, Усолье–Торы, Магадан–Торы, Норильск–Торы с временным разрешением от 1 до 15 минут (в зависимости от трассы). Для некоторых трасс ведется регулярная автоматическая обработка ионограмм в квазиреальном времени [9], которая может быть успешно использована в задачах расчета ионосферной поправки.

4. Прибайкальская сеть приемников ГЛОНАСС/GPS включает в себя девять измерительных пунктов в Прибайкальском регионе и в Норильске [10]. Приемники сети позволяют получать информацию о вариациях полного электронного содержания ионосферы на основе двухчастотных фазовых и групповых измерений. Использование сети приемников позволяет исследовать вопросы корректировки ионосферной ошибки по данным GPS/ГЛОНАСС [11], а их совместное использование с радаром ИРНР – проводить экспериментальные исследования по оценке точностей таких методов.

5. Когерентные радары системы СЕКИРА (СЕТЬ Когерентных Ионосферных РАдаров) являются отечественными аналогами радаров системы SuperDARN с расширенными диагностическими возможностями [12]. К основным задачам сети радаров СЕКИРА относятся мониторинг и изучение мелкомасштабных плазменных неоднородностей, а также мониторинг и изучение динамики ионосферы, включая изучение крупномасштабных атмосферных неоднородностей и волн. В настоящее время в ИСЗФ СО РАН функционирует один радар в Свердловской области, второй радар в Магаданской области развернут и готовится к запуску.

6. В рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» специалистами АО РТИ разрабатывается новый радар обратного рассеяния для размещения в Прибайкальском регионе, сочетающий в себе возможности радаров некогерентного рассеяния и мезосферно-стратосферно-тропосферных радаров (НР-МСТ), позволяющий проводить детальную пространственно-временную обработку сигнала обратного рассеяния. Радар позволит дополнить потенциал экспериментальных наблюдений в РФ с целью повышения точности оценки ионосферной ошибки, влияющей на точность функционирования радиотехнических систем.

## СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Одной из проблем для анализа возможного влияния ионосферных неоднородностей на радиотехнические системы в квазиреальном времени является сложность оценки полного вектора скорости таких возмущений. В [6] разработана методика пространственно-временной структуры ПИВ на основе профилей ЭК, измеренных двумя лучами ИРНР и ионозондом. Использование радара НР-МСТ вместо ионозонда позволяет проводить интерферометрические наблюдения, в том числе и выше максимума F2-слоя.

Использование сети разнесенных инструментов, таких как ЛЧМ-ионозонды, позволяет получать пространственное распределение ЭК. Выше было отмечено, что существует проблема с прямым использованием ионосферных моделей. При использовании сети инструментов модели могут быть скорректированы, в том числе с учетом градиентов ЭК.

Совмещение информации, получаемой с ЛЧМ-ионозондов и приемников ГЛОНАСС/GPS, позволяет использовать преимущества каждого из них: более высокую точность определения параметров радиоканала в ЛЧМ-ионозондах с более высокой устойчивостью работы приемников ГЛОНАСС/GPS в условиях геомагнитных возмущений и возникновения интенсивного поглощения в D-слое.

Создание разрабатываемого АО РТИ для ИСЗФ СО РАН радара НР-МСТ позволит в будущем не только расширить круг задач, решаемых прибайкальским комплексом инструментов ИСЗФ СО РАН, но и отработать методики учета ионосферных поправок в приложении к другим практическим задачам радиосвязи и радиолокации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в ИСЗФ СО РАН создан уникальный экспериментальный радиофизический комплекс, который может использоваться как для проведения фундаментальных исследований, так и для отработки методов коррекции ионосферной ошибки радиотехнических систем. Использование опыта АО РТИ для создания новых инструментов комплекса в рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» и налаженное сотрудничество позволят существенно расширить круг решаемых комплексом задач и отработать вопросы эффективного практического применения получаемых данных для коррекции ионосферных эффектов в системах радиолокации и связи.

## Список используемых источников

1. *Ткачѳв Г.Н.* Проблема оперативного обеспечения современных средств дальней радиолокации геофизическими данными // Тезисы докладов БШФФ-2017. – С. 7–9.
2. Современное состояние и перспективы развития работ по компенсации атмосферных ошибок измерений в РЛС дальнего обнаружения на основе радиопросвечивания атмосферы двухчастотными сигналами навигационных систем / А.Г. Виноградов, М.Е. Горбунов, А.А. Лучин, А.А. Синчура // Труды РТИ имени академика А.Л. Минца. – М.: РТИ имени академика А.Л. Минца, 2011. – Вып. 3 (47). – С. 106–117.
3. *Логовский А.С., Дмитриевская А.В.* Особенности автоматической обработки радиолокационной информации с целью компенсации негативного влияния ионосферы на работу РЛС дальнего обнаружения // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 46–51.



4. Развитие диагностических возможностей Иркутского радара некогерентного рассеяния / А.П. Потехин, А.В. Медведев, А.В. Заворин, Д.С. Кушнарёв, В.П. Лебедев, Б.Г. Шпынев // *Космические исследования*. – 2008. – Т. 46, №4. – С. 356–362.
5. Diurnal variations of the ionospheric electron density height profiles over Irkutsk: Comparison of the incoherent scatter radar measurements, GSM TIP simulations and IRI predictions / G.A. Zherebtsov, K.G. Ratovsky, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, A.V. Medvedev, S.S. Alsatkin, A.V. Oinats, R.Y. Lukianova // *Advances in Space Research*. – 2017. – Vol. 60, No 2. – P. 444–451.
6. Статистическое исследование характеристик распространения перемещающихся ионосферных возмущений по данным радиофизического комплекса ИСЗФ СО РАН / А.В. Медведев, К.Г. Ратовский, М.В. Толстикова, А.А. Щербаков, С.С. Алсаткин // *Солнечно-земная физика*. – 2012. – Вып. 20. – С. 85–91.
7. Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности / К.Г. Ратовский, А.П. Потехин, А.В. Медведев, В.И. Куркин // *Солнечно-земная физика*. – 2004. – Вып. 5 (118). – С. 102–104.
8. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы / А.В. Подлесный, И.Г. Брынько, В.И. Куркин, В.А. Березовский, А.М. Киселев, Петухов Е.В. // *Гелиогеофизические исследования*. – 2013. – Вып. 4. – С. 24–31.
9. Первые совместные наблюдения радиоавроры на радарах ИСЗФ СО РАН ультракоротковолнового и коротковолнового диапазонов / О.И. Бернгардт, В.П. Лебедев, К.А. Кутелев, Д.С. Кушнарёв, К.В. Гркович // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2017. – Т. 60, № 8. – С. 692–716.
10. Ясюкевич Ю.В., Веснин А.М., Первалова Н.П. Сибирская сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet: текущее состояние // *Солнечно-земная физика*. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 82–94.
11. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС / Ю.В. Ясюкевич, В.Б. Оводенко, А.А. Мыльникова, И.В. Живетьев, А.М. Веснин, И.К. Едемский, Д.С. Котова // *Вестник ПГТУ. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – Йошкар-Ола, ПГТУ, 2017. – № 2 (34). – С. 19–31.
12. Автоматическая система круглосуточного мониторинга характеристик ионосферных слоев над азиатской частью территории России по данным сети станций наклонного зондирования / О.И. Бернгардт, В.И. Куркин, С.Н. Пономарчук, А.В. Подлесный, А.А. Науменко, Б.Г. Салимов, А.И. Поддельский, И.Н. Поддельский, З.Ф. Думбрава // *Труды V Всероссийской научно-технич. конференции РТИ системы ВКО-2017*. – 2018. – С. 854–868.

В.Ю. Быков\*;  
Г.Н. Ильин\*,  
*кандидат физико-математических наук;*  
Д.М. Караваев\*\*,  
*кандидат технических наук;*  
Г.Г. Шукин\*\*,  
*доктор физико-математических наук, профессор*

\* Институт прикладной астрономии РАН, г. Санкт-Петербург;

\*\* Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург

## РЕЗУЛЬТАТЫ МИКРОВОЛНОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТА: ПЕРСПЕКТИВЫ РАДИОМЕТРА ВОДЯНОГО ПАРА

Рассмотрены возможности метода наземной микроволновой радиометрии для определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков, а также обусловленной водяным паром тропосферной задержки. Представлены технические характеристики радиометра водяного пара ИПА РАН, а также некоторые результаты экспериментальных исследований, выполненных в Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. На основании полученных результатов обсуждаются перспективы применения радиометра водяного пара для задач прикладной метеорологии.

Ключевые слова: геофизическая обсерватория, метеорологическое обеспечение, влагозапас атмосферы, водозапас облаков, тропосферная задержка, валидация спутниковой информации.

### ВВЕДЕНИЕ

Метод микроволновой радиометрии атмосферы, основанный на регистрации собственного радиотеплового излучения атмосферы с помощью микроволновых радиометров, находит применение для решения задач радиоастрономии, радионавигации, прикладной метеорологии. Характеристики собственного радиотеплового излучения атмосферы (оптическая толщина, радиояркостная температура) связаны с распределением метеорологических параметров в атмосфере в соответствии с уравнением переноса радиотеплового излучения в атмосфере [1]. Поэтому возникает принципиальная возможность определения метеорологических параметров облачной атмосферы из измерений собственного радиотеплового излучения атмосферы в микроволновом диапазоне вблизи линий поглощения водяного пара, кислорода и в «окнах прозрачности» атмосферы.

Одной из задач микроволновой радиометрии является задача отдельного определения влагозапаса атмосферы (интегрального содержания водяного пара) и водозапаса облаков (интегрального содержания жидкокапельной влаги в облаках). Для определения влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков измерения радиояркостной температуры атмосферы проводятся обычно на двух частотах: вблизи линии поглощения водяного пара 22,235 ГГц (на частоте около 20,6 или 23,9 ГГц) и в окне радиопрозрачности атмосферы 31–38 ГГц. Двухчастотный радиометр позволяет также решать задачу измерения обусловленной водяным паром тропосферной задержки радионавигационных сигналов, которая практически детерминированной связью определяется влагозапасом атмосферы [2, 3, 6].

В рамках научно-технического сотрудничества между Военно-космической академией имени А.Ф. Можайского и Институтом прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) в Геофизической обсерватории ВКА имени А.Ф. Можайского (п. Лехтуси Ленинградской обл.) был проведен микроволновый эксперимент с использованием радиометра водяного пара ИПА РАН. Целью работы является предварительный анализ результатов эксперимента, перспектив радиометра водяного пара ИПА РАН для производства радиотепловых наблюдений атмосферы в диапазоне частот 20,7 и 31,7 ГГц и решения задач прикладной метеорологии.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОМЕТРА ВОДЯНОГО ПАРА

Современный вариант радиометра водяного пара (РВП) ИПА РАН [4, 5] построен по классической двухканальной схеме, включает два идентичных независимых канала, каждый из которых принимает излучение на отдельную рупорно-линзовую антенну. Полуширина диаграммы направленности рупорных облучателей составляет  $6^\circ$ . Диаграмма направленности облучателей управляется по углу места с помощью поворотного плоского перископического зеркала, установленного под углом  $45^\circ$  к горизонту. На входе СВЧ блока каждого из каналов установлены два ферритовых переключателя, последовательно подключающие к входу блока сигналы антенны и попеременно – одну из двух калибровочных согласованных нагрузок, находящихся при температурах 40 и  $65^\circ\text{C}$ , что обеспечивает возможность проведения «внутренней» калибровки радиометров в автоматическом режиме. СВЧ узлы блока переключателя, малощумящий усилитель-конвертор (МШУ) и модуль квадратичного детектора – размещены на термостатируемой плите, имеющей температуру  $35^\circ\text{C}$ . В качестве МШУ использованы серийные конверторы НПФ «Микран», г. Томск. На выходе конвертора установлен блок, содержащий усилитель промежуточных частот, квадратичный детектор и усилитель тока детектора. Управление работой узлов РВП, а также передача данных в управляющий компьютер производится по последовательному интерфейсу RS-485. Основные характеристики РВП показаны в табл. 1.

Таблица 1

### Основные технические характеристики радиометра водяного пара

№ п/п	Характеристика	Канал 1	Канал 2
1	Центральная частота, ГГц	20,7	32,0
2	Полоса усиления УПЧ, МГц	500	500
3	Ширина диаграммы направленности, град.	$<7$	$<7$
3	Флуктуационная чувствительность (1 с), К	$<0,1$	$<0,1$
4	Нестабильность усиления 1 час (24 час), %	$<0,03$ (0,06)	$<0,03$ (0,06)
5	Погрешность измерений радиояркостной температуры, К	$<2,5$	$<2,5$
6	Темп измерений, с	5	5
7	Вес (без ПУ), кг	$<90$	

В настоящее время РВП для оперативной оценки обусловленной водяным паром тропосферной задержки установлены в обсерваториях «Светлое», «Зеленчугская», «Бадары», составляющих национальный радиоинтерферометрический комплекс «Квazar-КВО». С дополнительной информацией о комплексе можно ознакомиться на официальном сайте Института прикладной астрономии Российской академии наук ([www.iaaras.ru/quasar/](http://www.iaaras.ru/quasar/)).

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА И ПЕРСПЕКТИВЫ

В Геофизической обсерватории (Лехтуси) [7] эксперимент проводился с 22 марта по 12 октября 2018 года. Основной задачей было проведение угловых и временных измерений радиояркостных температур атмосферы при различных метеорологических условиях. В период эксперимента измерения радиояркостных температур атмосферы проводились по методике временных разрезов, при этом данные измерений радиояркостных температур с дискретностью 5 секунд записывались в суточные текстовые файлы данных. Пример временного хода радиояркостных температур РВП, измеренных 27.03.2018 приведен на рис. 1.

Также были проведены тестовые измерения излучения атмосферы при различных углах места от зенита до горизонта (в ручном режиме управления приводом антенны). Пример измерений радиояркостных температур 06.09.2018 при различных углах положения антенны РВП от 90 до 20 градусов показан на рис. 2.

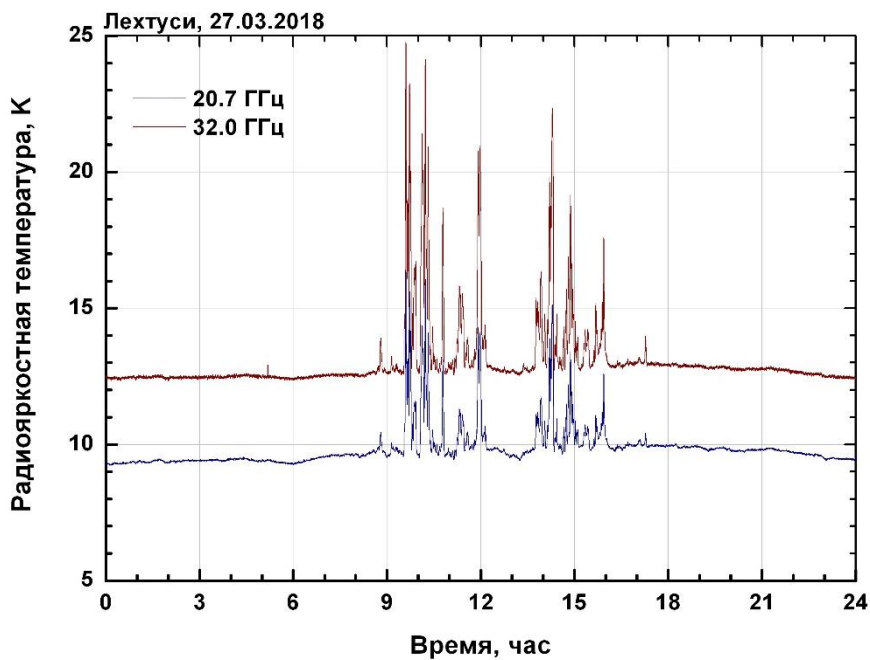


Рис. 1. Пример суточного хода измеренных (в зените) радиояркости температур

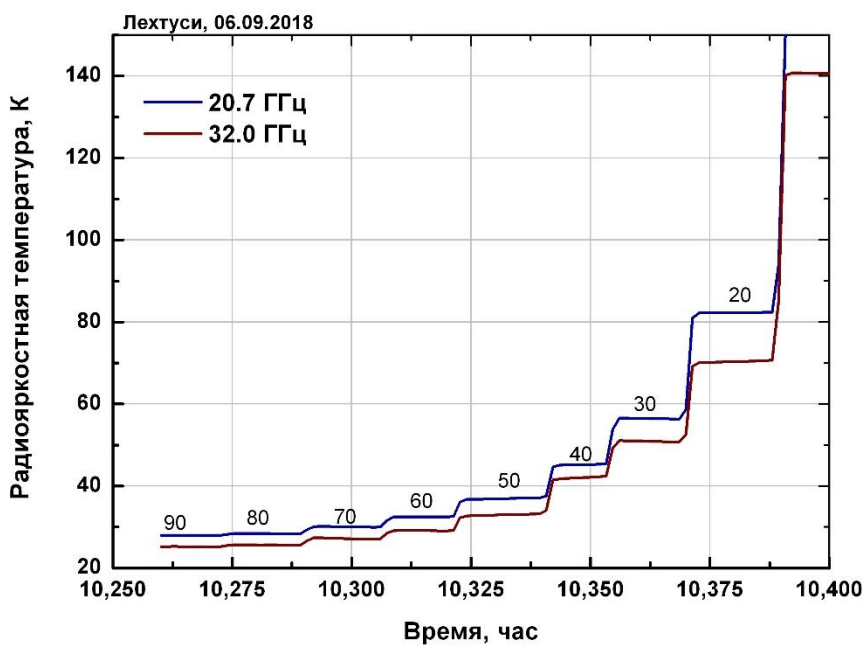


Рис. 2. Пример угловой зависимости радиояркости температур

Эксперименты подтвердили принципиальную возможность совместной одновременной работы РВП с метеорологическим радиолокатором МРЛ-5 (длина волны 3,2 см).

Выделим следующие перспективные направления применения микроволновой радиометрии в прикладной метеорологии: наукастинг и сверхкраткосрочный прогноз, прогноз опасных явлений, связанных с облаками; диагностика атмосферных фронтов; контроль результатов активных воздействий; оперативный контроль радиохарактеристик атмосферы, влажной компоненты тропосферной задержки радионавигационных сигналов. Выполненный эксперимент продемонстрировал возможности и перспективы современной разработки РВП ИПА РАН для решения отмеченных задач. Среди актуальных направлений дальнейших исследований выделим следующие: эксперименты по апробации метода измерения тропосфер-

ной задержки, влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков при различных метеоусловиях, в различных регионах, в различные сезоны (уточнение методик, повышение эффективности метеозащиты и характеристик «всепогодности»); развитие локальной сети радиометров водяного пара в регионе Ленинградской области для задач мониторинга атмосферы (наукастинга) и сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды, связанных с облаками.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В докладе представлены предварительные результаты эксперимента, проведенного в 2018 году в Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского с применением радиометра водяного пара Института прикладной астрономии Российской академии наук. Получены серии новых экспериментальных исследований радиотеплового излучения атмосферы вблизи линии поглощения водяного пара на частотах 20,7 и 32 ГГц при различных метеоусловиях в Ленинградской области для решения задач определения влагозапаса атмосферы, водозапаса облаков и тропосферной задержки радионавигационных сигналов.

## Список используемых источников

1. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, Л.П. Бобылев, С.Ю. Матросов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 253 с.
2. Щукин Г.Г., Караваев Д.М. Применение дистанционных методов зондирования атмосферы в задачах координатно-временного и навигационного обеспечения // Труды ИПА РАН. – 2012. – Вып. 23. – С. 411–414.
3. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 12. – С. 1122–1127.
4. Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Кайдановский М.Н. Аппаратура системы измерения электрических характеристик тропосферы // Труды ИПА РАН. – 2010. – Вып. 21. – С. 255–269.
5. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени / Г.Н. Ильин, В.Ю. Быков, В.Г. Стэмповский, А.М. Шишкин // Труды ИПА РАН. – 2013. – Вып. 27. – С. 210–215.
6. Караваев Д.М., Щукин Г.Г. Метод микроволновой радиометрии в задачах тропосферной коррекции распространения радиосигналов глобальных навигационных систем // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2013. – № 2. – С. 48–51.
7. Состояние и перспективы создания Геофизической обсерватории Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского / И.А. Готюр, Д.А. Денисенков, В.Ю. Жуков, Д.М. Караваев, Е.А. Коровин, Ю.В. Кулешов, С.В. Чернышев, Г.Г. Щукин. // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – Вып. 662. – С. 184–187.

Д.В. Ермилов\*;  
В.М. Калмыков\*;  
Д.В. Козлов\*;  
В.В. Стерлядкин\*\*,

*доктор физико-математических наук, профессор*

\* Центральное конструкторское бюро аппаратостроения, г. Тула;

\*\* Московский институт радиотехники, электроники и автоматики, г. Москва

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ВОЗМОЖНОСТИ РАДИОЛОКАЦИОННОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ ГРАНИЦ ОБЛАЧНОСТИ**

Приводятся результаты комплексных натурных измерений высоты границ облачности на основе использования когерентной РЛС миллиметрового диапазона длин волн одновременно с шар-пилотными измерениями. Одновременно проводились измерения ветрового поля, градиентов и сдвигов ветра. Описаны методики измерений и аппаратура. Отмечены недостатки каждого из методов. Представлено программное обеспечение РЛС, позволяющее определять границы облачности и другие параметры ветрового поля.

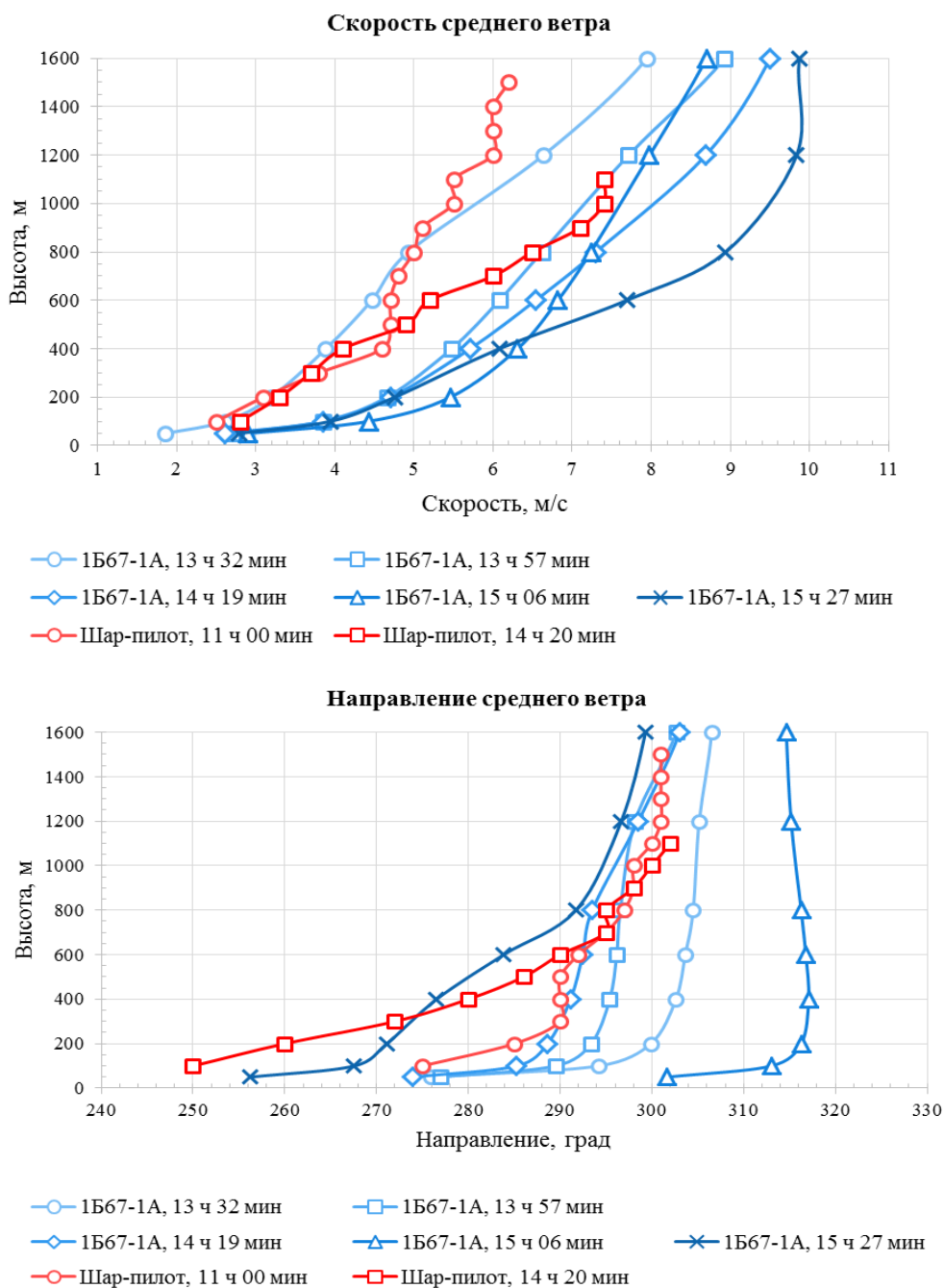
Ключевые слова: нижняя граница облачности, шар-пилотные измерения, профиль ветра, радиолокационное зондирование, сдвиг ветра.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Задача определения нижней и верхней границ облачности является практически значимой для многих потребителей. Принципиально важной эта проблема становится при обеспечении безопасности полетов авиации и при решении задач метеорологического и штурманского обеспечения в военно-транспортной авиации (ВТА) при подготовке и выполнении десантирования парашютным способом. Традиционным решением этой задачи является использование сертифицированных измерителей высоты нижней границы облачности (ИВО) и его аналогов, работающих в оптическом диапазоне длин волн [1, 2]. Современной модификацией являются лидарные измерители [3, 4]. Однако оперативная обстановка далеко не всегда позволяет иметь в распоряжении оптические измерители, в то время как нередко имеется доступ к данным радиолокационных метеорологических радаров. По этой причине весьма актуальным является вопрос о возможности использования метеорологических радаров для определения границ облачности. Первые исследования по данному вопросу проводились в работах ЦАО на РЛС 3 см диапазона [5]. В этих работах авторы отметили принципиальную возможность таких измерений, однако перечислили множество проблем. Во-первых, показано, что радиолокационная граница облаков, как правило, не совпадает с оптической границей, которую измеряют оптическими средствами. Во-вторых, указано, что наличие крупных облачных частиц или осадков, выпадающих из облака, приводит к размыванию и маскировке радиолокационной границы облака. К сожалению, вопросы об условиях, при которых определение границ облачности возможно, и условий, в которых задача не решается или ее решение связано с большими погрешностями, в этих работах до конца не исследованы. Результаты, представленные в данном докладе, являются продолжением таких исследований, которые проводятся в АО ЦКБА, г. Тула с 2010 года [7]. Особенностью является тот факт, что исследования проводятся на базе серийных малогабаритных радиолокаторов профилей ветра, работающих в миллиметровом диапазоне длин волн.

## ОПИСАНИЕ АППАРАТУРЫ И МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ ВЫСОТЫ НИЖНЕЙ ГРАНИЦЫ ОБЛАЧНОСТИ

Измерения (ВНГО) проводилось метеокомплексом 1Б67-1А, основу которого составляет восьмимиллиметровый доплеровский радиолокатор профилей ветра с энергетическим потенциалом, позволяющим на дальности 1 км регистрировать все типы осадков, почти все виды облаков и туманов, а также получать сигналы от интенсивной турбулентности. Параллельно проводились однопунктные шар-пилотные измерения, которые кроме профиля ветра позволяли оценить нижнюю границу облачности как высоту, на которой терялся из видимости шар-пилот. Практика использования метеокомплекса 1Б67-1, на базе которого разработан метеокомплекс 1Б67-1А, показала, что в средней полосе РФ отраженный радиолокационный сигнал в слое до 500 м регистрируется в 85% случаев.



*Рис. 1. Сравнение шар-пилотных и радиолокационных данных указывает на хорошее соответствие*

Метеокомплекс 1Б67-1А позволяет выполнять следующие действия:

- определять скорость ветра на высоте 4 м и на высотах от 100 до 4000 м с средней погрешностью не более 0,5 м/с (при  $v$  до 10 м/с) и 0,05  $v$  (при  $v$  больше 10 м/с);
- определять направление ветра со средней погрешностью не более 6°;
- вычислять вертикальный сдвиг ветра, измеряемый в метрах в секунду на 30 м высоты;
- выявлять опасные уровни сдвига ветра (сдвиг более 6 м/с на 30 м высоты);
- давать оценку высоты нижней границы облачности (ВНГО).

Высота нижней границы облачности вместе со значениями скорости ветра у земли и в приземном слое (на высотах до 1000 м) могут быть использованы для оценки метеоусловий и принятия решений о возможности десантирования парашютным способом личного состава и боевой техники, а также при определении необходимой высоты и скорости десантирования для достижения заданной точки приземления (прицеливания).

На рис. 1 представлены результаты сравнения данных о профиле ветра, полученные радиолокационным и шар-пилотным способами (18.01.2019, г. Псков).

В целом с учетом особенностей измерения и степени усреднения результатов полученные данные о скорости и направлении ветра хорошо подтверждают друг друга. Из представленных данных видно, что потеря шар-пилота в облаках происходила на высотах 1100 и 1500 м.

Радиолокационное определение ВНГО осуществляется по уровню радиолокационной отражаемости, увеличение которого возникает при переходе через границу облачности. Методика радиолокационного определения высоты слоя облаков представлена на рис. 2, а.

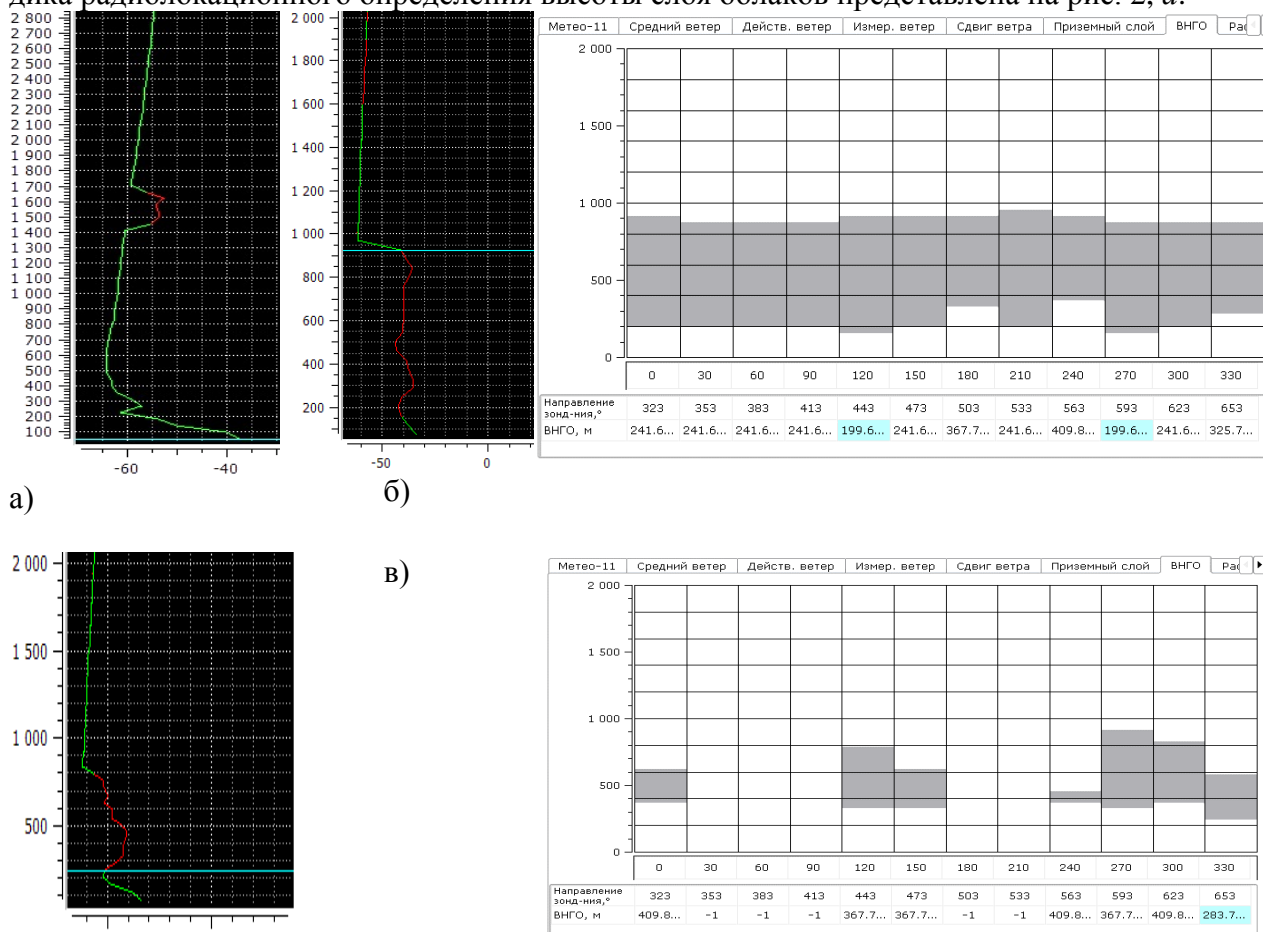


Рис.2. Результаты измерения ВНГО:

а – зависимость радиолокационной отражаемости от высоты (изм. от 18.01.2019.);

б – измерение ВНГО 16.01.2019 в 16:17; в – измерение ВНГО 16.01.2019 в 16:43

дает разрывы облачности по отдельным направлениям



На некоторой высоте на фоне слабого сигнала от подоблачного слоя возникает быстрое возрастание уровня отражаемости. Из рис. 2, *а* следует, что нижняя граница облачности регистрировалась на высоте 1400 м. На верхней границе облака сигнал быстро падает почти до нулевого уровня. На этих принципах строится программное обеспечение.

На рис. 2, *б* представлены результаты измерения ВНГО 16.01.2019 в 16:17 с направления зондирования  $330^\circ$ , что позволяет определить высоту нижней границы облачности 287 м. Рядом представлена копия экрана с профилем облаков по всем направлениям. На рис. 2, *в* представлено появление разрывов в слоистой облачности через 30 минут, в 16:43.

## ТРУДНОСТИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

При определении ВНГО по радиолокационным данным следует сразу отбросить те случаи, при которых такое определение невозможно. Это метеоусловия, при которых из облаков выпадают осадки или оседают крупные облачные капли. В случае осадков мощные отражения наблюдаются до самой земли, а при наличии крупных облачных капель, которые оседают из облака, но могут не долетать до земли, нижняя граница будет существенно занижена. Следует отметить, что наличие крупных облачных капель диаметром свыше 80 мкм можно определить радиолокатором по наличию гравитационного падения, которое регистрируется наряду с горизонтальным ветровым переносом.

Трудности измерения ВНГО с помощью радиолокаторов обусловлены тем, что практическое значение имеют границы облаков, обнаруживаемые в видимом диапазоне длин волн, а их рассеяние отличается от рассеяния микроволн. Кроме того, ВНГО является наиболее изменчивой из измеряемых метеоконцентрациями величиной, варьирующейся не только во времени, но и пространстве. Она зависит от характера и интенсивности выпадающих осадков, изменения температуры, влажности, скорости и направления ветра, турбулентного обмена. Разорванный и неустойчивый характер основания многих видов облаков не позволяет четко и однозначно определить нижнюю границу облаков, а значит, измерить ее высоту [7].

По предварительным данным для недождевых облаков нижнего яруса, до 2 км (слоистые, слоисто-кучевые), определение ВНГО возможно лишь в 20–30% случаев их обнаружения, для облаков среднего яруса, от 2 до 6 км (высокослоистые, высококучевые), и особенно верхнего, более 6 км (перистые), процент обнаружения возрастает. Доля условий обнаружения ВНГО при этом составляет от 40% и более.

Практика радиолокационного измерения высот облаков показывает, что завышение ВНГО происходит при относительно больших дальностях и при обнаружении на малых дальностях мелкокапельных облаков без осадков. Занижение ВНГО имеет место при регистрации метеоконцентрациями эхо-сигналов от выпадающих из облаков частиц в тех случаях, когда они не достигают земной поверхности. Если же выпадающие осадки достигают поверхности земли, то измеряемая ВНГО может оказаться равной нулю.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиолокационное обнаружение облачных слоев с целью определения их высоты в настоящее время не является до конца решенной задачей. Однако знание типов облаков, которое может быть оценено по радиолокационной отражаемости, а также учет наличия или отсутствия гравитационного падения позволяют выделить метеоситуации, при которых определение ВНГО возможно. Это является ценной информацией для многих практических приложений, обеспечения безопасности полетов и десантирования.

### Список используемых источников

1. *Толмачева Н.И.* Методы и средства гидрометеорологических измерений (для метеорологов): учеб. пособие. – Пермь: ПГНИУ, 2011. – 223 с.
2. *Тимофеев Ю.М., Васильев А.В.* Теоретические основы атмосферной оптики. – СПб.: Наука, 2003. – 474 с.
3. *Капустин А.В., Сторожук Н.Л.* Технические средства гидрометеорологической службы: учеб. пособие. – СПб.: Энергомашиностроение, 2005. – 283 с.
4. *Межерис Р.М.* Лазерное дистанционное зондирование: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
5. *Боровиков А.М., Костарев В.В.* О точности измерения высоты облаков радиолокационным методом // Труды ЦАО. – 1961. – Вып. 36. – С. 37–42.
6. Радиотеплолокация в метеорологии / В.Д. Степаненко, Г.Г. Щукин, В.А. Бобылев, С.Ю. Матросов. – М.: Гидрометеоиздат, 1987. – 283 с.
7. О возможности радиолокационных измерений высоты нижней и верхней границ облачности / А.Г. Горелик, Д.В. Ермилов, В.М. Калмыков, Д.В. Козлов, В.В. Стерлядкин, А.В. Хомяков // Материалы V Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» (23–25 мая 2018). – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – С. 398–401.

А.Л. Ильин,  
кандидат технических наук;  
А.В. Шульженко;  
А.Д. Шульженко

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ НОСИТЕЛЕЙ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ЗЕМЛЕОБЗОРА

Рассмотрено влияние нестабильности полета авиационного носителя на качество формируемого радиолокационного изображения. Показано, что ошибки в задании скорости носителя и дальности до объекта наблюдения в процессе формирования радиолокационного изображения приводят к ухудшению пространственного разрешения независимо от величины угла сноса авиационного носителя. Отмечено, что наличие угла сноса авиационного носителя в присутствии ошибок в задании скорости носителя и дальности до объекта наблюдения приводит к появлению дополнительных геометрических искажений формируемого радиолокационного изображения. Приведены требования к навигационному обеспечению при проведении летных испытаний.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, радиолокационное изображение, пространственное разрешение, геометрические искажения, навигационные параметры.

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы использование авиационных носителей нашло широкое применение в задачах разработки космических радиолокационных средств землеобзора и испытаний их основных элементов, таких как радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) [1]. В то же время различия космических и авиационных носителей и условий их функционирования требуют дополнительного анализа и разработки ряда требований к методике проведения авиационных экспериментов.

Одной из причин формирования радиолокационных изображений (РЛИ) недостаточного качества в авиационных РСА является наличие угла сноса носителя  $\alpha_{\text{сн}}$ , приводящее к тому, что максимум диаграммы направленности антенны (ДНА) не соответствует траверзу носителя, что, в свою очередь, приводит к сдвигу доплеровского спектра голограммы. В результате возникает необходимость соответствующей коррекции амплитудной части опорной функции, используемой при формировании РЛИ по координате азимута.

### ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПОЛЕТА И ОШИБОК В ЗАДАНИИ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КАЧЕСТВО ФОРМИРУЕМОГО РЛИ

При гауссовской аппроксимации ДНА траекторный сигнал, отраженный от точечного рассеивателя и зарегистрированный в виде азимутальной голограммы, можно записать в виде [2]

$$\dot{U}_{\text{ар}}(x'') = A_0 \cdot \exp \left[ -\pi \left( \frac{x_0 - x'' - x_{\text{сн}}}{\theta R} \right)^2 \right] \exp \left[ j2\pi \frac{(x_0 - x'')^2}{\lambda R} \right], \quad (1)$$

где  $x''$  – координата путевой дальности регистрируемой голограммы, равная произведению скорости носителя  $V$  на время полета  $t$ ,  $x'' = V \cdot t$ ;

$x_0$  – азимутальная координата точечного рассеивателя;

$x_{\text{сн}}$  – дополнительный линейный азимутальный сдвиг голограммы на дальности  $R$  при наличии угла сноса  $\alpha_{\text{сн}}$ ,  $x_{\text{сн}} \approx \alpha_{\text{сн}} \cdot R$ ;

$\theta$  – угловая ширина ДНА;

$\lambda$  – длина волны РСА.

Комплексная амплитуда сигнала  $\dot{U}_{\text{ан}}(x')$  формируемого РЛИ по координате азимута  $x'$  может быть описана интегралом свертки:

$$\dot{U}_{\text{ан}}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{\text{ар}}(x'') \cdot \exp\left[-\pi\left(\frac{x'' - x' - x_{\text{сн}}}{L_s}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j2\pi\frac{(x_0 - x'')^2}{\lambda R}\right] dx'', \quad (2)$$

где  $\dot{U}_{\text{ар}}(x'')$  – комплексный сигнал голограммы согласно выражению (1);

$L_s$  – параметр, определяющий интервал когерентной обработки сигнала.

Приведенные выражения при  $L_s < \theta R$  позволяют определить вид амплитуды РЛИ точечного рассеивателя:

$$U_{\text{ан}}(x') = \sqrt{\dot{U}_{\text{ан}}(x') \cdot \dot{U}_{\text{ан}}^*(x')} = A_0 \cdot L_s \cdot \exp\left\{-4\pi\left[(x_0 - x')^2 L_s^2 / (\lambda R)\right]^2\right\}. \quad (3)$$

Очевидно, что максимум отметки находится в точке  $x' = x_0$  независимо от величины угла сноса  $\alpha_{\text{сн}}$ , а ширина отметки равна азимутальному разрешению РСА  $\delta_a$ :

$$\Delta(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-4\pi\left[(x')^2 L_s^2 / (\lambda R)\right]^2\right\} dx' = \frac{\lambda R}{2L_s} = \delta_a. \quad (4)$$

Однако полученный результат справедлив только при точном знании траекторных параметров носителя РСА, таких как скорость носителя  $V$  и дальность до объекта наблюдения  $R$ . При наличии ошибки в определении скорости носителя  $\Delta V$  выражение (2) приобретает вид

$$\dot{U}_{\text{ан}}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{\text{ар}}(x'') \cdot \exp\left[-\pi\left(\frac{x'' \cdot k - x' - x_{\text{сн}}}{L_s}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j2\pi\frac{(x_0 - x'' \cdot k)^2}{\lambda R}\right] dx'', \quad (5)$$

где  $k = 1 + \Delta V / V$ .

При этом амплитуда РЛИ точечного рассеивателя с учетом  $\Delta V / V < 1$ , а соответственно  $k^2 \approx 1$  и  $k^2 - 1 \approx 2\Delta V / V$ , принимает вид

$$U_{\text{ан}}(x') \approx A_0 \cdot \frac{L_s}{\sqrt[4]{1 + [2 \cdot \Delta V \cdot L_s / (\delta_a \cdot V)]^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{\pi(x' - x_0 \cdot k - x_{\text{сн}} \cdot 2 \cdot \Delta V / V)^2}{\delta_a^2 \{1 + [2 \cdot \Delta V \cdot L_s / (\delta_a \cdot V)]^2\}}\right\}. \quad (6)$$

В этом случае максимум отметки находится в точке  $x' = x_0 \cdot k + x_{\text{сн}} \cdot 2 \cdot \Delta V / V$ . При отсутствии сноса ( $x_{\text{сн}} = 0$ ) имеет место изменение масштаба РЛИ пропорционально величине  $k$  во всех каналах дальности. Наличие угла сноса приводит к дополнительному сдвигу изображения на величину

$$x_{\text{сдв}} = x_{\text{сн}} \cdot 2 \cdot \Delta V / V = 2 \cdot \alpha_{\text{сн}} \cdot R \cdot \Delta V / V, \quad (7)$$

которая пропорциональна дальности  $R$ .

Указанный сдвиг изображения проявляется в виде его перекоса под углом:

$$\gamma_{\text{рли}} = \arctg(x_{\text{сдв}} / R) \approx 2 \cdot \alpha_{\text{сн}} \cdot \Delta V / V, \quad (8)$$

зависящим как от величины угла сноса  $\alpha_{\text{сн}}$ , так и от относительной ошибки определения скорости носителя  $\Delta V / V$ .

Ширина отметки точечного рассеивателя на РЛИ

$$\Delta(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{\pi(x')^2}{\delta_a^2 \{1 + [2 \cdot \Delta V L_s / (\delta_a V)]^2\}}\right\} dx' = \delta_a \cdot \sqrt{1 + [2 \cdot \Delta V L_s / (\delta_a V)]^2}, \quad (9)$$

т. е. при наличии ошибки определения скорости  $\Delta V$  независимо от величины угла сноса  $\alpha_{\text{сн}}$  происходит ухудшение пространственного разрешения, величина которого зависит не только от относительной ошибки  $\Delta V / V$ , но и от степени фокусировки апертуры  $L_S / \delta_a$ .

При наличии ошибки в определении дальности до цели  $\Delta R$  выражение (2) приобретает вид

$$\dot{U}_{\text{ан}}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{\text{ар}}(x'') \cdot \exp\left[-\pi\left(\frac{x'' - x' - x_{\text{сн}}}{L_S}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j2\pi\frac{(x_0 - x'')^2}{\lambda(R + \Delta R)}\right] dx'' . \quad (10)$$

При этом амплитуда РЛИ точечного рассеивателя с учетом  $\Delta R / R < 1$  принимает вид

$$U_{\text{ан}}(x') \approx A_0 \cdot \frac{L_S}{\sqrt[4]{1 + [\Delta R \cdot L_S / (\delta_a \cdot R)]^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{\pi(x' - x_0 - x_{\text{сн}} \cdot \Delta R / R)^2}{\delta_a^2 \left\{1 + [\Delta R \cdot L_S / (\delta_a \cdot R)]^2\right\}}\right\} . \quad (11)$$

В этом случае максимум отметки находится в точке  $x' = x_0 + x_{\text{сн}} \cdot \Delta R / R$ . При отсутствии сноса ( $x_{\text{сн}} = 0$ ), в отличие от ошибки определения скорости  $\Delta V$ , изменения масштаба РЛИ не происходит, но наличие угла сноса приводит к сдвигу изображения на величину

$$x_{\text{сдв}} = x_{\text{сн}} \cdot \Delta R / R = \alpha_{\text{сн}} \cdot \Delta R, \quad (12)$$

которая так же, как и при ошибке определения скорости, пропорциональна дальности  $R$ .

Указанный сдвиг изображения проявляется в виде его перекоса под углом

$$\gamma_{\text{рли}} = \arctg(x_{\text{сдв}} / R) \approx \alpha_{\text{сн}} \cdot \Delta R / R, \quad (13)$$

который зависит как от величины угла сноса  $\alpha_{\text{сн}}$ , так и от относительной ошибки определения дальности до цели  $\Delta R / R$ .

Ширина отметки точечного рассеивателя на РЛИ

$$\Delta(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-\frac{\pi(x')^2}{\delta_a^2 \left\{1 + [\Delta R \cdot L_S / (\delta_a \cdot R)]^2\right\}}\right\} dx' = \delta_a \cdot \sqrt{1 + [\Delta R \cdot L_S / (\delta_a \cdot R)]^2}, \quad (14)$$

т. е. при наличии ошибки определения дальности  $\Delta R$  независимо от величины угла сноса  $\alpha_{\text{сн}}$  происходит ухудшение пространственного разрешения, величина которого зависит не только от относительной ошибки  $\Delta R / R$ , но и от степени фокусировки апертуры  $L_S / \delta_a$ .

При одновременном наличии ошибок в определении дальности до цели  $\Delta R$  и скорости носителя РСА  $\Delta V$  выражение (2) приобретает вид

$$\dot{U}_{\text{ан}}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} \dot{U}_{\text{ар}}(x'') \cdot \exp\left[-\pi\left(\frac{x'' \cdot k - x' - x_{\text{сн}}}{L_S}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-j2\pi\frac{(x_0 - x'' \cdot k)^2}{\lambda(R + \Delta R)}\right] dx'', \quad (15)$$

где  $k = 1 + \Delta V / V$ .

При этом амплитуда РЛИ точечного рассеивателя с учетом  $\Delta R / R < 1$  и  $\Delta V / V < 1$ , а соответственно  $k^2 \approx 1$  и  $k^2 - 1 \approx 2\Delta V / V$ , принимает вид

$$U_{\text{ан}}(x') \approx A_0 \cdot \frac{L_S}{\sqrt[4]{1 + (L_S / \delta_a)^2 \cdot S_{\Delta}^2}} \cdot \exp\left\{-\frac{\pi(x' - x_0 / k - x_{\text{сн}} \cdot S_{\Delta})^2}{\delta_a^2 \left(1 + (L_S / \delta_a)^2 \cdot S_{\Delta}^2\right)}\right\}, \quad (16)$$

где  $S_{\Delta}$  – суммарная относительная погрешность определения скорости носителя и дальности до объекта наблюдения,  $S_{\Delta} = 2 \cdot \Delta V / V + \Delta R / R$ .

## ТРЕБОВАНИЯ К ТОЧНОСТИ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ

В то же время количественная оценка величин  $\Delta V/V$  и  $\Delta R/R$  показывает следующее. Для условий функционирования авиационных носителей точность определения скорости составляет  $\Delta V/V \approx 0,01$ . В свою очередь, погрешность задания дальности в опорной функции при формировании РЛИ может быть оценена величиной элемента разрешения по указанной координате  $\Delta R \approx \delta_r$ . Соответственно, при  $\delta_r = 1$  м на дальности  $R = 10$  км относительная погрешность определения дальности составляет  $\Delta R/R \approx 10^{-4}$ . Это свидетельствует о том, что основной вклад в ухудшение разрешающей способности и появление геометрических искажений РЛИ вносит ошибка определения путевой скорости носителя РСА.

Полученные выше соотношения позволяют определить как требования к навигационному обеспечению авиационного носителя, используемого при испытаниях космических РСА, так и к методике проведения летных испытаний. Так, например, если допустимое ухудшение азимутального разрешения РСА задано величиной

$$\rho = \Delta(x', \Delta V) / \Delta(x', 0) = 1,4, \quad (17)$$

то согласно выражению (9) ошибка определения скорости носителя РСА не должна превышать величины

$$\Delta V/V \leq \delta_a / L_s, \quad (18)$$

оценка которой при  $\delta_a = 1$  м,  $\lambda = 0,03$  м,  $R = 10$  км,  $L_s = \lambda R / (2\delta_a) = 150$  м составляет  $\Delta V/V = 6,6 \cdot 10^{-3}$ . При невозможности обеспечения этого требования необходимо применение методов автофокусировки при формировании РЛИ [3].

Если точность навигационного обеспечения авиационного носителя, используемого при испытаниях, задана и не может быть изменена при проведении конкретного эксперимента, то уменьшение угла сноса  $\alpha_{сн}$  может быть достигнуто выбором соответствующего курса носителя РСА. Так, если допустимый сдвиг изображения не должен превышать величины азимутального разрешения  $x_{сдв} \leq \delta_a$ , то в соответствии с выражением (7) максимальная величина угла сноса составляет

$$\alpha_{сн} \leq \delta_a \cdot V / (2 \cdot R \cdot \Delta V) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,3^\circ \quad (19)$$

для  $\Delta V/V = 0,01$ ,  $\delta_a = 1$  м,  $R = 10$  км.

Следует отметить, что полученные соотношения носят ориентировочный характер, поскольку предполагают величины  $\Delta V$ ,  $\Delta R$ ,  $\alpha_{сн}$  постоянными на интервале когерентной обработки голограммы. На практике это условие зачастую не выполняется, что приводит к необходимости формирования парциальных РЛИ в субапертурах с последующим их когерентным суммированием [4]. В то же время представленные результаты позволяют сделать следующие выводы.

## ВЫВОДЫ

1. Ошибки в определении скорости носителя и дальности до объекта наблюдения приводят к ухудшению пространственного разрешения РСА независимо от величины угла сноса авиационного носителя. При этом основную роль играют ошибки определения скорости.

2. Величина ухудшения пространственного разрешения РЛИ зависит не только от относительной ошибки траекторных параметров носителя РСА, но и от степени фокусировки апертуры, определяемой отношением  $L_s / \delta_a$ .

3. Наличие угла сноса авиационного носителя приводит к появлению геометрических искажений РЛИ в присутствии ошибок в определении скорости носителя и дальности до объекта наблюдения.

4. Приведенные соотношения позволяют определить требования к точности навигационного обеспечения носителя РСА и выработать рекомендации по проведению авиационного эксперимента.

#### **Список используемых источников**

1. Самолетный комплекс имитационного моделирования средств космической и воздушной разведки / А.Б. Зайцев, А.Л. Зуев, А.Л. Ильин и др. // Материалы ВНК. – М.: в/ч 54023, РАРАН, 2001. – С. 81–89.

2. *Ильин А.Л., Маров М.Н.* Характеристики изображений земной поверхности, формируемых радиолокатором с синтезированной апертурой: учеб. пособие. – МО СССР, 1989. – 132 с.

3. *Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.* Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.

4. *Ильин А.Л., Петраченко М.В., Шульженко А.В.* Выделение эталонных отражателей для автофокусировки по парциальным радиолокационным изображениям РЛС с синтезированной апертурой // Труды XVII Всероссийского симпозиума «Радиолокационные исследования природных сред». – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. – Вып. 9, т. 1. – С. 293–300.

С.И. Моряков\*,

*кандидат технических наук;*

С.М. Нестеров\*,

*доктор технических наук, профессор;*

П.Н. Скоков\*;

И.А. Скородумов\*,

*кандидат технических наук*

\* Центральный научно-исследовательский институт Войск воздушно-космической обороны  
Министерства обороны Российской Федерации, г. Тверь

## ШИРОКОПОЛОСНАЯ РАДИОЛОКАЦИОННАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА НА БАЗЕ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ

Проведено исследование возможности использования мобильной широкополосной радиолокационной измерительной установки на базе векторного анализатора цепей для измерения радиолокационных характеристик объектов в полунатурных и натуральных условиях.

Ключевые слова: радиолокационное зондирование, векторный анализатор цепей, радиолокационные характеристики, эффективная площадь рассеяния, инверсное синтезирование апертуры, радиолокационные изображения.

В последние десятилетия разработчики различных радиотехнических устройств в качестве измерительной аппаратуры все чаще стали использовать высокоточные векторные анализаторы цепей [1, 2]. Современные анализаторы работают в широкой полосе частот от 10 МГц до 67 ГГц в непрерывном и импульсном режимах, обеспечивая до 32000 измерительных точек. Используя модуль электронной калибровки, можно обеспечить точность измерения амплитуды до 0,01 дБ и фазы – до 0,1°. Динамический диапазон на измерительных портах достигает 130 дБ при уровне собственных шумов устройства до –120 дБ. Анализаторы оснащены интегрированной операционной системой, что обеспечивает пользователей средствами управления непосредственно в устройстве.

Указанные возможности векторного анализатора позволяют на его базе с добавлением необходимых блоков и устройств достаточно быстро создавать компактные и мобильные радиолокационные измерительные комплексы, предназначенные для оперативной оценки в широкой полосе частот радиолокационных отражательных характеристик объектов в полунатурных и натуральных условиях.

Целью данной работы было исследование возможностей использования радиолокационной измерительной установки на базе векторного анализатора цепей для получения радиолокационных характеристик объектов в полунатурных и натуральных условиях.

Разработанная на базе векторного анализатора цепей мобильная широкополосная радиолокационная измерительная установка для измерений радиолокационных характеристик объектов на дальности порядка 500 м представлена на рис. 1. Векторный анализатор и дополнительная аппаратура установки размещены в передвижной кабине типа КУНГ, снабженной автономным электрогенератором. На крыше кабины установлены две зеркальные антенны: передающая с раскрытием 2,4 м и приемная с раскрытием 1,2 м. В качестве облучателей антенн использованы два двухполяризационных рупорных облучателя KIR 5800 DR (рис. 2), работающие в частотном диапазоне от 4,5 до 7,5 ГГц. В данном частотном диапазоне совместная работа этих антенн обеспечивает ширину диаграммы направленности порядка 2° и создает на дальности 500 м измерительную зону размером 15–17 м по уровню 3 дБ. Поскольку выходная мощность векторного анализатора в штатном режиме работы не превышает 10 дБм, что не обеспечивает работу на дальности 500 м, он был дополнен отдельным усилителем мощности с усилением 20 дБ. Это позволило получить в антенне мощность сигнала до 1 Вт и производить измерение ЭПР объектов до уровней порядка 0,01 м<sup>2</sup>.





Рис. 1. Широкополосная радиолокационная измерительная установка на базе векторного анализатора цепей

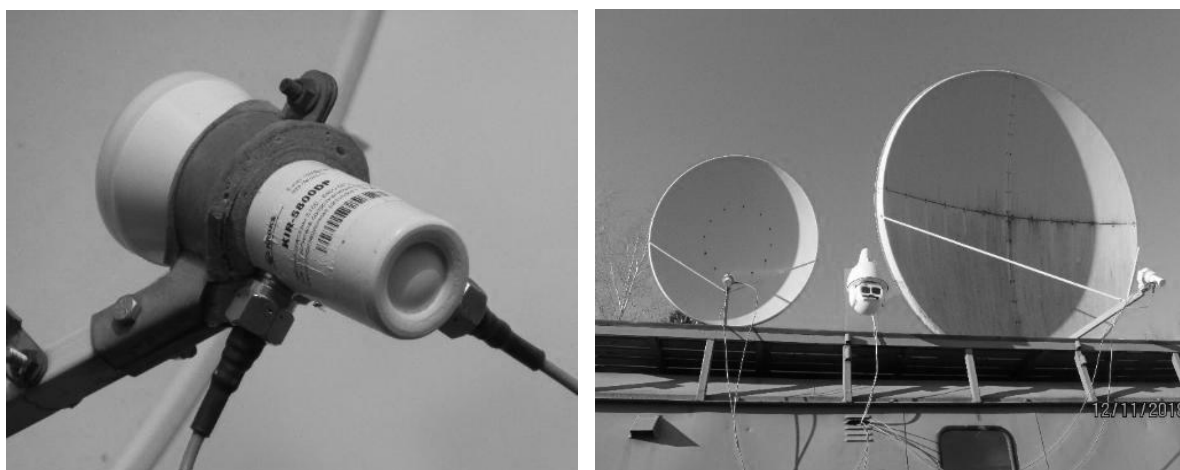


Рис. 2. Двухполяризационные рупорные облучатели KIR 5800 DR и антенные системы

На установке реализован режим поимпульсной перестройки частоты зондирующего сигнала в задаваемой полосе частот. При необходимости частотный диапазон мобильного комплекса может быть изменен оперативной установкой рупорных облучателей требуемого диапазона. При этом необходимо учитывать последующее изменение ширины диаграммы направленности антенной системы и соответствующие изменения размера измерительной зоны и предельных минимальных уровней измеряемой ЭПР.

Между антеннами на крыше кабины установлена видеочамера Dahua SD6AL240-HNI (рис.3). Она используется для наведения антенн в требуемую рабочую точку, а при проведении измерений обеспечивает визуальный контроль за положением и движением объекта.

Для использования установки в качестве радиолокатора требуется выбор квазинепрерывного режима векторного анализатора. Длительность  $\tau$  излучаемого импульса в этом случае определяется согласно выражения

$$\tau \geq \frac{2R}{c}, \quad (1)$$

где  $R$  – дальность до объекта;  
 $c$  – скорость света.

Для дальности 500 м длительность импульса должна быть не менее 3,4 мкс [3].

Измерение минимальных уровней ЭПР в натуральных условиях обеспечивается увеличением длительности импульса относительно получаемой из выражения (1) до величины, когда уровень шума приемного устройства векторного анализатора становится меньше уровня фона местности. Обычно это 20–100 мкс.



Рис. 3. Видеокамера Dahua SD6AL240-HNI

Для выделения полезного сигнала из импульса такой длины используется метод частотно-временных преобразований [4]. Принятый приемным устройством спектр сигнала подвергается обратному преобразованию Фурье и переводится во временную область. Стробированием во временной области выделяется отраженный от объекта сигнал. Применив к нему преобразование Фурье, получаем спектр отраженного от объекта сигнала.

С целью определения ЭПР в м<sup>2</sup> необходимо выполнить операцию калибровки измерительного тракта. В полевых условиях для грубой оценки (по одной калибровочной точке) для этого может использоваться квадрокоптер с известным значением ЭПР. Для получения качественной калибровочной характеристики, уточненной в ее нижней части, в рабочий объем с помощью квадрокоптера последовательно поднимается ряд эталонных сферических отражателей с известными значениями их ЭПР.

Кроме получения угловых диаграмм ЭПР объектов, мобильный комплекс может обеспечить формирование инверсных радиолокационных изображений (РЛИ) объектов. В этом случае векторный анализатор работает в режиме поимпульсной перестройки частоты зондирующего сигнала в полосе 2 ГГц (от 5 до 7 ГГц).

При проведении измерений необходимо обеспечить выполнение условия однозначности по дальности. Шаг по частоте зондирующего сигнала  $\Delta f$ , т. е. интервал между соседними частотами, определяется из соотношения

$$\Delta f = \frac{c}{2R}. \quad (2)$$

Для дальности 500 м он составляет 0,3 МГц [3].

Число частотных дискрет  $N$  в полосе излучения 2 ГГц составит 6666.

Для использования алгоритмов быстрого преобразования Фурье это число необходимо увеличить до кратного степени двойки, т. е. в данном случае до 8192. При этом время записи одной пачки импульсов при длительности импульса 20 мкс составит около 164 мс, а разрешение по дальности [3]

$$\Delta r_s = \frac{c}{2B} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 2 \cdot 10^9} = 7,5 \text{ см}. \quad (3)$$

Разрешение в поперечном направлении зависит от сектора углов поворота объекта за время наблюдения, а окно однозначности в поперечном направлении определяется из соотношения [3]

$$\Delta r_{az} = \frac{\lambda_{\min}}{2N\omega\Delta t}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{\min}$  – минимальная длина волны зондирующего сигнала;

$\omega$  – скорость поворота объекта относительно его центра вращения;

$\Delta t$  – период повторения импульсов.

Для подтверждения расчетных характеристик мобильного комплекса был проведен эксперимент по получению РЛИ вращающегося объекта без использования данных о его угловом положении. В качестве объекта использован эталонный металлический цилиндр с диаметром основания 0,3 м и длиной образующей 2 м, подвешенный на подъемно-поворотной системе открытого радиолокационного измерительного полигона. Изображение подвешенного цилиндра представлено на рис. 4.



Рис. 4. Объект исследований на подъемно-поворотной системе открытого радиолокационного измерительного полигона

На рис. 5 представлены экспериментально полученные на описанной выше установке двумерные инверсно-синтезируемые РЛИ цилиндра, выявляющие контур объекта в секторах синтезирования  $\pm 90^\circ$  и  $\pm 60^\circ$ . В силу неустранимых дополнительных фазовых набегов из-за гибкого подвеса объекта полученные изображения недостаточно сфокусированы. Для улучшения фокусировки объектов могут быть применены известные алгоритмы автофокусировки [5], отработка которых для условий открытого полигона может быть выполнена на представленной установке.

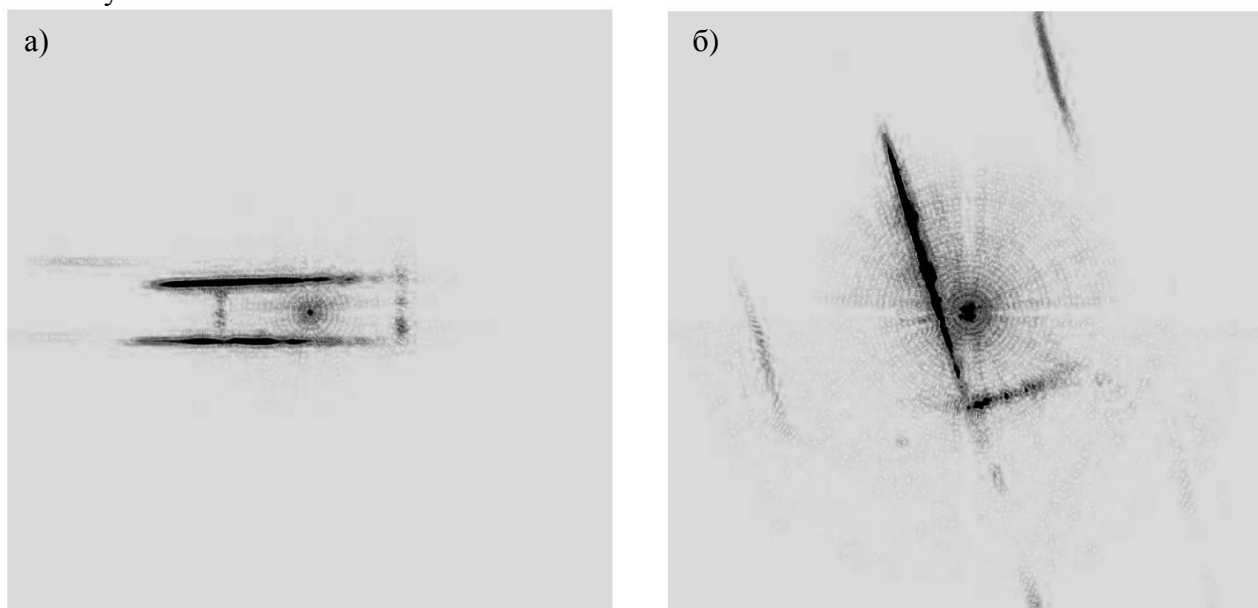


Рис. 5. Экспериментальные инверсно-синтезируемые двумерные радиолокационные изображения цилиндра:  
а – в секторе синтезирования  $\pm 90^\circ$ ; б – в секторе синтезирования  $\pm 60^\circ$

Таким образом, разработана мобильная широкополосная радиолокационная измерительная установка на базе векторного анализатора цепей, обеспечивающая получение угловых диаграмм ЭПР и инверсных радиолокационных изображений объектов. Установка может быть использована для отработки алгоритмов формирования и фокусировки двумерных инверсно-синтезируемых радиолокационных изображений в полунатурных и натурных условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант №18-07-00026 А).

#### Список используемых источников

1. Time-Domain Oscillographic Microwave Network Analysis Using Frequency-Domain Data // МТТ-22. – March, 1974. – № 3. – Р. 276–282.
2. Site Master S331D/S332D – Cable and Antenna Analyzer: User's Guide. – 108 p.
3. Радиолокационные характеристики объектов. Методы исследования: монография / под ред. С.М. Нестерова. – М.: Радиотехника, 2015. – С. 234–255.
4. Методы исследования радиолокационных характеристик объектов: монография / под ред. С.В. Ягольникова. – М.: Радиотехника, 2012. – С. 277–280.
5. Моряков С.И., Нестеров С.М., Скородумов И.А. Алгоритмы автофокусировки инверсно-синтезируемых двумерных радиолокационных изображений объектов // Журнал радиоэлектроники. – 2018. – № 8. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/11/text.pdf> (дата обращения: 12.12.2019).

О.А. Скоробогатова,  
кандидат технических наук, доцент

## ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ УГОЛКОВОГО ТИПА В ИНТЕРЕСАХ ФОНОЦЕЛЕВОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВООРУЖЕНИЯ

Проанализированы основные особенности метрологического обеспечения (МО) косвенных измерений эффективной площади рассеяния (ЭПР) калибровочных радиолокационных отражателей (КРО) уголкового типа в пределах главного лепестка диаграммы обратного рассеяния (ДОР) в радиолокационном диапазоне в интересах фоноцелевого информационного обеспечения космических средств вооружения. Научным аспектом предлагаемого подхода к МО являются полученные автором аналитические выражения для расчета предельного отклонения значений ЭПР КРО уголкового типа в пределах главного лепестка ДОР, вызванного неперпендикулярностью граней образцов отражателей.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, уголкового отражатель, косвенные измерения, неперпендикулярность граней.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость реализации фоноцелевого информационного обеспечения в радиолокационном диапазоне в интересах обеспечения космических средств вооружения обусловлена в первую очередь широким применением радиолокационных средств дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), использующих радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) самолетного и космического базирования [1].

Внешняя калибровка бортовых РЛС землеобзора требует наличия мер ЭПР – эталонных радиолокационных отражателей с известными характеристиками. Наиболее часто в качестве эталонных применяются металлические калибровочные радиолокационные отражатели уголкового типа, такие как трехгранный уголкового отражатель (УО) с треугольными гранями, трехгранный УО с квадратными гранями, двугранный УО с прямоугольными гранями. Все они при сравнительно малых волновых размерах имеют широкие главные лепестки ДОР с достаточно большими и стабильными значениями ЭПР. Угловые размеры главного лепестка ДОР определяются по отношению к нормали плоскости раскрытия КРО (опорной оси) и ограничены уровнем половинной мощности (табл. 1).

Таблица 1

Размеры главного лепестка ДОР КРО

Тип КРО уголкового типа	Угловой размер главного лепестка ДОР, град	Положение опорной оси ( $\theta$ ; $\varphi$ ), град
Трехгранный с треугольными гранями	39	(54,7; 45)
Трехгранный с квадратными гранями	23	(54,7; 45)
Двугранный с прямоугольными гранями	30	(90; 45)

На рис. 1–3 приведены угловые границы главного лепестка ДОР рассматриваемых КРО, а также направление опорной оси.

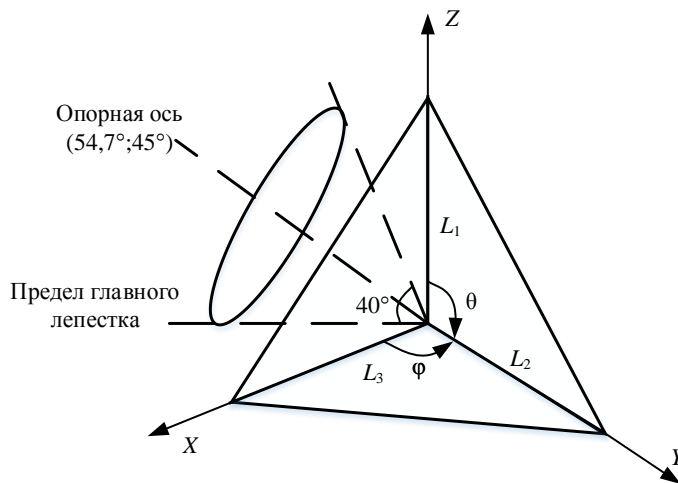


Рис. 1. Границы главного лепестка трехгранного КРО с треугольными гранями

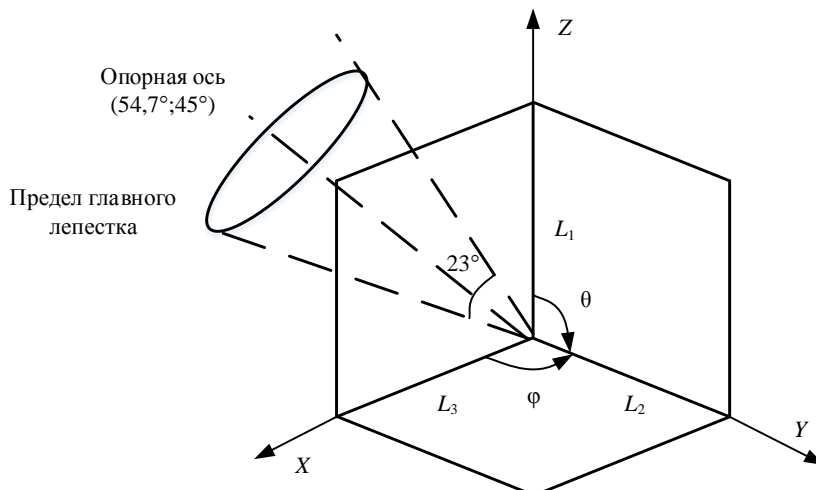


Рис. 2. Границы главного лепестка трехгранного КРО с квадратными гранями

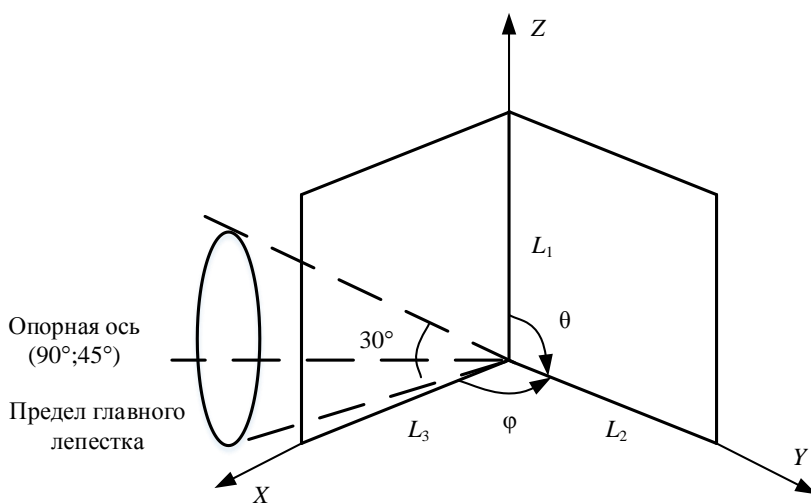


Рис. 3. Границы главного лепестка двугранного КРО с прямоугольными гранями

Конструктивно КРО уголкового типа отличаются простотой изготовления и механическая жесткость, однако в силу влияния факторов неточности изготовления и сборки, а также изменения геометрических параметров в процессе эксплуатации возможно отклонение углов между гранями от прямого, приводящее к быстрому снижению величины моностатической ЭПР [2]. Очевидно, что задачи практического применения КРО уголкового типа требуют оценки их ЭПР в рабочей полосе частот РЛС с учетом возможного отклонения углов между гранями от прямых. Также представляют интерес оценки допустимых отклонений указанных углов, при которых изменение ЭПР КРО в пределах главного лепестка не превышает заданного уровня.

Анализ ряда способов (методов) расчета ЭПР трехгранных КРО, связанных с калибровкой радаров с синтезированной апертурой, предложенных в ряде патентов [3–5], показал, что оценка значений ЭПР как простых, так и сложных объектов в основном проводится на основе использования пакетов имитационного моделирования (например, Ansoft HFSS, FEKO), используя при этом методы физической и геометрической оптики, метод моментов или гибридные методы.

В источниках [3, 4] приведен аналитический способ расчета ЭПР эталонного трехгранного уголкового отражателя с квадратными гранями в широком радиодиапазоне, но учет влияния неперпендикулярности граней на величину ЭПР КРО проводился уже с помощью имитационного моделирования (методом МоМ). Для этого, в каждом конкретном случае, предлагается строить «частные» геометрические модели объекта, учитывающие неперпендикулярность граней УО, и с помощью специализированного программного обеспечения проводить численный расчет уравнений Максвелла для данного объекта.

В работе [5] описан метод расчета УО при вертикальной поляризации падающей волны, основанный на результатах моделирования в FEKO для КРО с заданными параметрами. Особенностью данного подхода является использование двух методов: геометрической оптики и поверхностного интеграла Джордана. В ряде случаев это не всегда удобно, так как такой подход обладает ощутимыми временными затратами, требует определенных аппаратных и программных ресурсов.

Анализ существующего МО измерений ЭПР КРО уголкового типа, используемых при проведении натурных испытаний образцов вооружения, показывает, что современные тенденции связаны с достижением технического результата, обеспечивающего возможность оценки ЭПР отражателей в широкой полосе частот с погрешностью меньшей, чем при прямых измерениях ЭПР.

Следовательно, при разработке метрологического обеспечения измерений ЭПР КРО уголкового типа необходимо использовать системный подход, суть которого состоит в рассмотрении указанного обеспечения как совокупности «проектных» измерений, объединенных одной целью – достижением требуемого качества измерений. При этом организационный аспект МО измерений ЭПР КРО уголкового типа рассматривается как совокупность «проектных» измерений, объединенных в методику выполнения измерений (МВИ), а научный аспект заключается в разработке в широкой полосе частот способа оценки ЭПР уголковых отражателей с непрямыми углами между гранями в пределах главного лепестка диаграммы обратного рассеяния.

### **ОСОБЕННОСТИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ УГОЛКОВОГО ТИПА**

В соответствии с поставленной задачей крайне важно определить допустимые отклонения угла между гранями от прямого, при котором наблюдается падение ЭПР не более чем на 1дБ. Так как на основе прямых измерений провести данные оценки невозможно, то целесообразно разработать методику выполнения косвенных измерений (МВКИ) ЭПР КРО уголкового типа.

Под косвенными измерениями ЭПР КРО понимают измерения, при которых искомое значение величины ЭПР находят на основании известной функциональной зависимости между этой величиной и величинами, найденными прямыми измерениями. Значения ЭПР КРО измеряются в пределах главного лепестка ДОР, определяемого уровнем половинной мощности относительно максимального значения ЭПР, соответствующего направлению наблюдения, нормальному по отношению к плоскости раскрыва КРО (рис. 1–3).

Для обоснованного планирования измерений, правильной интерпретации результатов и погрешностей измерений необходимо принять адекватную физическую модель объекта измерений. Физическая модель должна достаточно близко совпадать с реальным объектом измерения. В качестве измеряемой величины следует выбрать такой параметр модели, который наиболее близко соответствует данной цели измерения. Значение параметра модели может выражаться числом, функцией или функционалом. Виды измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерения, необходимой скоростью измерения, условиями и режимом измерений, а также целями: контрольными, эталонными, прогностическими и т. д. Мероприятия, определяющие «проектные» измерения при проведении МВКИ ЭПР КРО уголкового типа, приведены в табл. 2.

Подготовка к выполнению косвенных измерений ЭПР КРО уголкового типа заключается в выполнении прямых измерений геометрических параметров отражающих поверхностей образца и величины их шероховатости с помощью специальных средств измерения, обеспечивающих требуемые точностные параметры. Прямые измерения геометрических параметров отражающих поверхностей КРО и величины их шероховатости целесообразно выполнять в соответствии с требованиями ГОСТ 8.050–73, ГОСТ 2789–73 и ГОСТ 9378–93.

На основании рекомендаций МИ 2083-90 методика выполнения косвенных измерений ЭПР КРО уголкового типа в пределах главного лепестка ДОР должна реализовать следующие операции:

1. Рассчитать действительные значения ЭПР КРО в главном лепестке ДОР как функции от сферических углов  $\theta$  и  $\varphi$ , отсчитываемых от опорной оси в угломестной и азимутальной плоскостях соответственно. Результат вычислений запротоколировать.

2. Вычислить предельное отклонение результата косвенных измерений ЭПР КРО в пределах главного лепестка ДОР, обусловленное геометрическими и угловыми отклонениями граней исследуемого образца от номинала. Результат вычислений запротоколировать.

3. Вычислить значение ЭПР КРО уголкового типа в пределах главного лепестка ДОР с учетом погрешностей. Результат вычислений запротоколировать.

4. При обработке результатов измерений выявить степень соответствия расчетных значений ЭПР КРО в главном лепестке ДОР с действительными значениями.

При этом модель объекта измерений должна удовлетворять следующим основным требованиям [6]:

- погрешность, обусловленная несоответствием модели объекту измерений, не должна превышать 10% от предела допускаемой погрешности измерений;

- составляющая погрешности измерений, обусловленная нестабильностью измеряемых физических величин в течение времени, необходимого для проведения измерения, не должна превышать 10% от предела допускаемой погрешности измерений.

Если предварительная оценка погрешности не соответствует требованиям точности измерительной задачи, следует проанализировать предполагаемые источники погрешности и осуществить мероприятия по их уменьшению (выбрать более точное средство измерений, изменить метод измерений, поручить измерения более квалифицированному оператору, уточнить влияющие величины и уменьшить их воздействие и т. д.). Результат измерений обычно сопровождается указанием погрешности, с которой выполнено измерение. После округления оценку погрешности указывают либо в абсолютной форме в единицах измеряемой величины, либо в относительной форме. Характеристики погрешности измерений, формы их представления и способы использования при испытаниях изложены в МИ 2083-90, МИ 1317-86.



Таблица 2

**Мероприятия, определяющие «проектные» измерения при проведении  
МВКИ КРО уголкового типа**

Проектные измерения	Содержание мероприятия
1. Определение физической модели объекта измерений	Объект измерения – КРО уголкового типа. Физическая модель КРО: трехгранный уголкоый отражатель (ТУО) с треугольными гранями; ТУО с квадратными гранями; ДУО с прямоугольными гранями
2. Определение цели измерения	Разработка метрологического обеспечения измерений ЭПР КРО уголкового типа в интересах фоновцелового информационного обеспечения космических средств вооружения
3. Выбор измеряемого параметра	ЭПР КРО в пределах главного лепестка ДОР
4. Анализ измерительной задачи	Проведение измерений ЭПР КРО уголкового типа с целью определения допустимых отклонений угла между гранями от прямого, при котором наблюдается падение ЭПР не более чем на 1дБ
5. Формулирование исходных данных для расчета погрешности	Параметры модели (измеряемые величины) – электрические размеры и величина неперпендикулярности граней КРО, значения которых выражаются числами
6. Проведение прямых измерений геометрических параметров отражающих поверхностей КРО и величины их шероховатости	В соответствии с требованиями ГОСТ 8.050–73, ГОСТ 2789–73 и ГОСТ 9378–93 проведение измерений следующих параметров изделия: минимальной длины ребра, неперпендикулярности граней (отклонения углов взаимного положения граней от номинального значения в 90°), шероховатости поверхности и неплоскостности граней
7. Проведение косвенных измерений ЭПР КРО в пределах главного лепестка ДОР	В соответствии с требованиями ГОСТ Р 8.563–2009, МИ 2083-90, МИ 2090-90 и МИ 1317-86 проведение косвенных измерений ЭПР КРО уголкового типа на основе разработанной МВКИ
8. Обработка результатов измерений и представление результата	На основании рекомендаций МИ 2083-90 и МИ 1317-86 выявление степени соответствия расчетных значений ЭПР КРО в главном лепестке ДОР с действительными значениями и с указанием погрешности, с которой выполнено измерение

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ПЛОЩАДИ РАССЕЯНИЯ КАЛИБРОВОЧНЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ С НЕПРЯМЫМИ УГЛАМИ МЕЖДУ ГРЯНЯМИ В ПРЕДЕЛАХ ГЛАВНОГО ЛЕПЕСТКА ДИАГРАММЫ ОБРАТНОГО РАССЕЯНИЯ

Анализ известных аналитических выражений расчета ЭПР углового типа показывает, что с их помощью нельзя провести требуемые оценки значений ДОР КРО в рабочей полосе частот с учетом отклонений углов между гранями от прямых. При широкополосном зондировании вершина главного лепестка ДОР КРО претерпевает флуктуации, не учитываемые в упомянутых выше аналитических выражениях, но влияющие на максимальный уровень ЭПР. Полученные во время проведения научных исследований в рамках СЧ ОКР на данную тему оценки свидетельствуют, что флуктуации значений максимума ЭПР в главном лепестке ДОР от частоты могут достигать порядка 1 дБм<sup>2</sup> (рис. 4, 5).

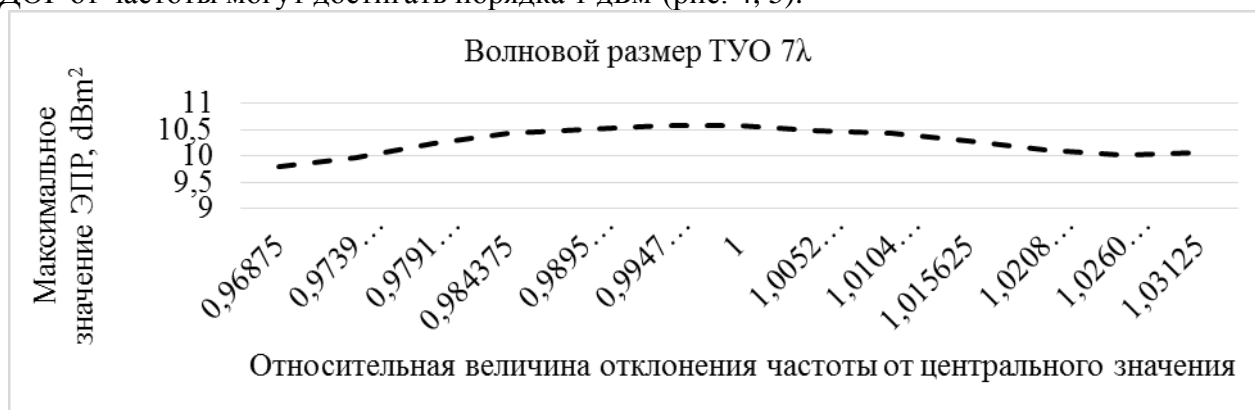


Рис. 4. Максимальные значения ЭПР (в дБм<sup>2</sup>) в пределах главного лепестка ДОР при отклонении частот от центрального значения для ТУО с длиной грани  $7\lambda$

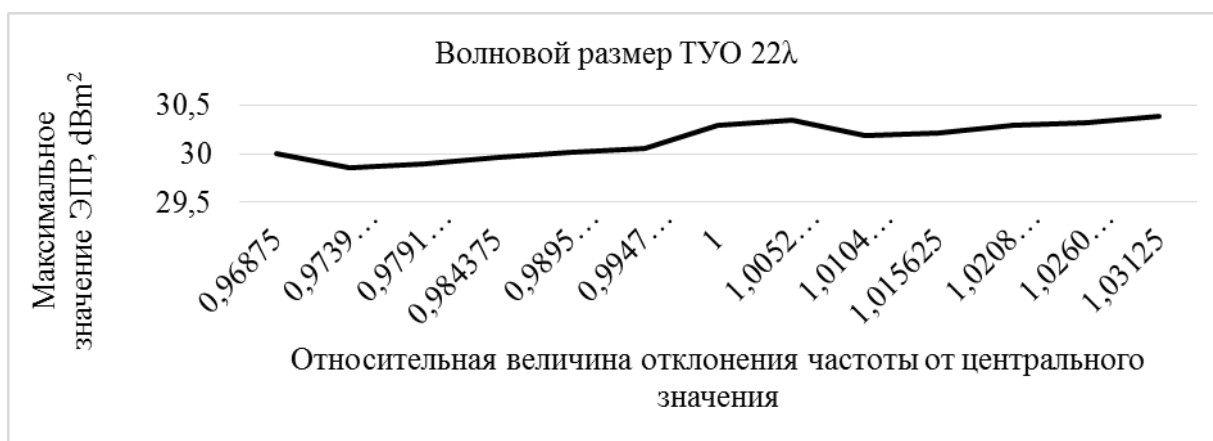


Рис. 5. Максимальные значения ЭПР (в дБм<sup>2</sup>) в пределах главного лепестка ДОР при отклонении частот от центрального значения для ТУО с длиной грани  $22\lambda$

Для корректного применения известных расчетных соотношений ЭПР КРО при оценке моностатических широкополосных характеристик отражения калибровочных УО целесообразно:

- провести коррекцию расчетного соотношения ЭПР на основе введения частотно зависимых коэффициентов  $\chi$ , учитывающих флуктуации ЭПР в заданной полосе частот;
- вычислить предельное отклонение результатов расчета ЭПР в главном лепестке ДОР УО с учетом возможного отклонения углов между гранями от прямых, при котором наблюдается падение ЭПР не более чем на 1дБ.

Полученные во время исследований значения поправочного коэффициента  $\chi$ , входящего в известные расчетные соотношения ЭПР трехгранных УО с треугольными гранями для разных волновых размеров КРО, приведены на рис. 6.

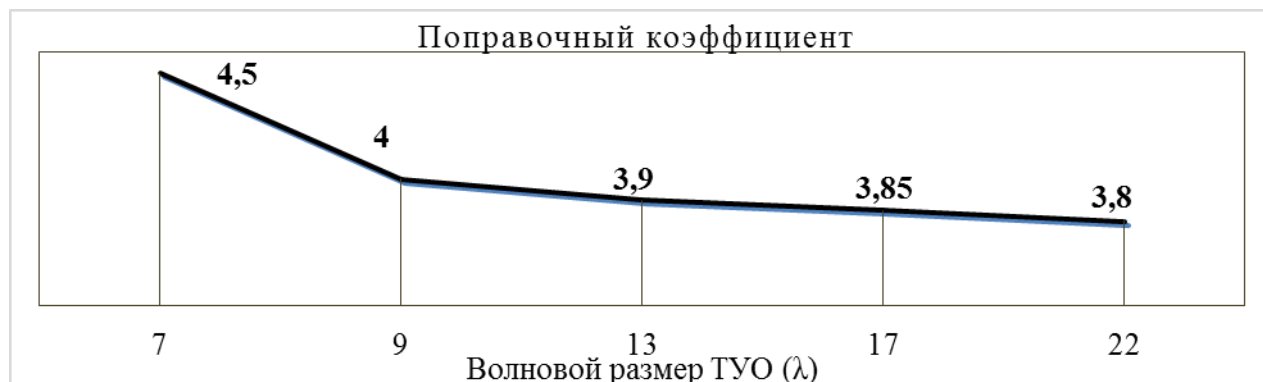


Рис. 6. Значения поправочного коэффициента  $\chi$  при разных волновых размерах граней ТУО

Анализ результатов показывает, что вариации значений поправочного коэффициента ограничены: сверху – минимальными размерами граней трехгранных угловых отражателей (порядка 5–7 длин волн), при этом  $\chi = 4,50$ , снизу – стремится к значению  $\chi = 3,80$ .

В силу изменения геометрических параметров в процессе эксплуатации возможно отклонение заданных линейно-угловых параметров КРО от номинальных (заданных чертежом), приводящее к быстрому снижению величины ЭПР КРО. Количественный анализ выявленных отклонений показывает, что для КРО углового типа ошибка расчетного значения ЭПР относительно идеального КРО углового типа (с идеализированными геометрическими и радиофизическими характеристиками: взаимно-перпендикулярными идеально гладкими гранями большого электрического размера, изготовленными из идеально проводящего металла и бесконечно острыми кромками граней) обусловлена, в первую очередь, возникающей в процессе эксплуатации неперпендикулярностью граней и трансформации геометрических размеров ребер углового отражателя. Ошибкой, связанной с шероховатостью граней КРО, можно пренебречь, так как современные технологии обработки металла позволяют обеспечить предельное значение высоты поверхностных шероховатостей не более единиц-десятков мкм. Единственное ограничение накладывается на изготовление наружных кромок граней изделия: они должны иметь клиновидную форму с углом при вершине не более  $20^\circ$ . Данные ошибки можно считать взаимно независимыми и подчиненными нормальному закону распределения, что позволяет рассматривать их в виде композиции двух вырожденных нормальных законов распределения.

Предельное отклонение значений ЭПР двугранного УО в пределах главного лепестка ДОР, вызванное неперпендикулярностью граней, можно учесть через выражения, приведенные в источниках [2, 7]. Предельное отклонение результата косвенных измерений ЭПР двугранного КРО в пределах главного лепестка ДОР при  $\varphi = 45^\circ$  (рис. 3), обусловленное неперпендикулярностью граней КРО, рассчитывается по формуле [2]

$$\Delta\sigma_{cr\_sq} = 2 \left( \cos^2(\Delta\alpha_{\max}) \sin(\alpha_0) \frac{\sin(\rho_0)}{\rho_0} \right)^2, \quad (5)$$

где  $\Delta\alpha_{\max}$  – максимальный угол отклонения грани из-за неперпендикулярности.

Здесь

$$\alpha_0 = \pi/4 - \Delta\alpha_{\max}/2 - |\Delta\alpha_{\max}|; \quad (6)$$

$$\rho_0 = (\pi L_2 f_0 / c) \sin(\alpha_0) \sin(2\Delta\alpha_{\max}). \quad (7)$$

Предельное отклонение значений ЭПР треугольных УО в пределах главного лепестка ДОР, обусловленное неперпендикулярностью граней, можно учесть через соотношение [7]

$$\Delta\sigma_{tr\_tr,sq} = \left( L_{tr\_tr,sq} - 4 \frac{\sqrt{3}}{\rho} \sin(\Delta\alpha_{max}) \right) / L_{tr\_tr,sq} \quad (8)$$

где  $\Delta\alpha_{max}$  – максимальный угол отклонения грани из-за неперпендикулярности;

$L_{tr\_tr,sq}$  – длина грани мнимого изображения ТУО, получаемого при определении эквивалентной апертуры отражателя,

$$L_{tr\_tr,sq} = L \left( 1 - \sqrt{3} / \rho \cdot \sin(\Delta\alpha_{max}) \right). \quad (9)$$

Здесь  $L$  – геометрически измеренная длина ребра ТУО.

В данном выражении  $\rho = 0,47936$ .

Отклонения углов между гранями КРО от нормальных в принципе могут быть различными как по величине, так и по направлению. В ходе исследований рассмотрены частные случаи, в которых величины отклонений всех трех углов были одинаковы и варьировались в пределах  $\pm(0-0,5)^\circ$  с шагом изменения  $0,1^\circ$ , где положительные значения соответствовали углам, превышающим  $90^\circ$ . Оценки изменения величины максимума ЭПР КРО в главном лепестке ДОР при вариации неперпендикулярности граней в пределах  $(0-0,5)^\circ$  для разных электрических размеров КРО (от 7 до 23 длин волн) показаны на рис. 7–9.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

– увеличение неперпендикулярности положения граней приводит к уменьшению значения ЭПР в максимуме независимо от волнового размера КРО, при этом установлено, что отклонение углов граней КРО от перпендикулярности на  $0,5^\circ$  приводит к уменьшению на 1 дБ значения максимума ДОР УО с волновыми размерами от  $22\lambda$  и выше (рис. 7–9);

– если сравнить два уголкового отражателя одного волнового размера с треугольными и прямоугольными гранями, то неперпендикулярность граней оказывает большее влияние на ЭПР трехгранного уголкового отражателя с квадратными гранями (рис. 8, 9): для КРО с треугольными гранями уменьшение ЭПР в главном максимуме составило 0,40 дБ, а с квадратными гранями – 1,00 дБ;

– с увеличением размеров КРО возрастает влияние неперпендикулярности граней на изменение ЭПР в максимуме (рис. 8, 9).

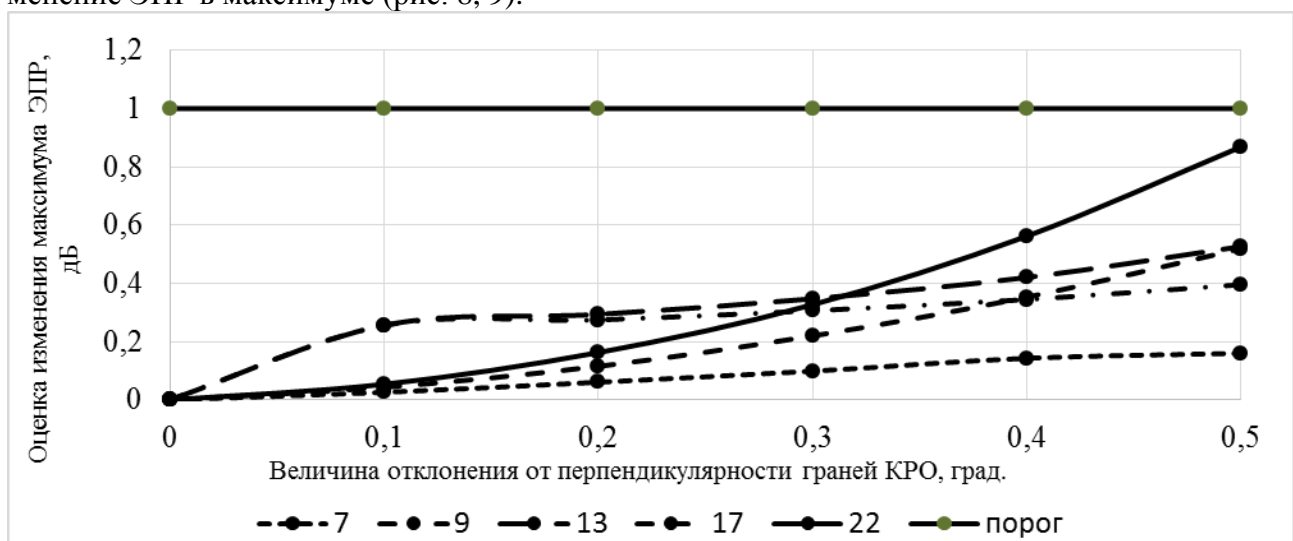


Рис. 7. Оценки изменения величины максимума ЭПР трехгранного КРО с треугольными гранями в главном лепестке ДОР при увеличении неперпендикулярности граней (от 0 до  $0,5^\circ$ ) для разных электрических размеров КРО (от 7 до  $22\lambda$ )

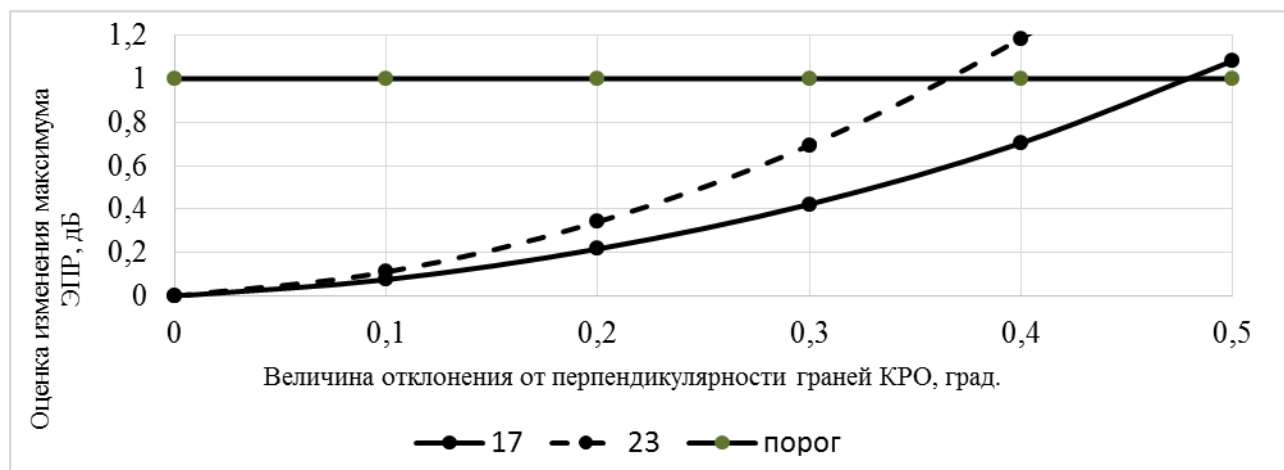


Рис. 8. Оценка изменения величины максимума ЭПР трехгранных КРО с квадратными гранями в главном максимуме ДОР при увеличении неперпендикулярности граней (от 0 до 0,5°) для электрических размеров КРО 17 и 23λ

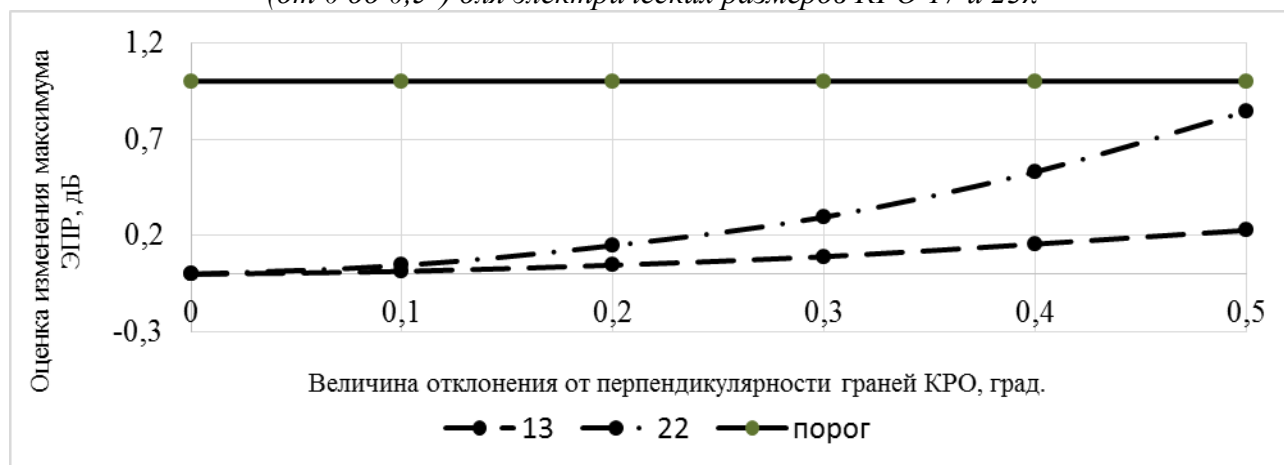


Рис. 9. Оценка изменения величины максимума ЭПР двухгранных КРО с прямоугольными гранями в главном максимуме ДОР при увеличении неперпендикулярности граней (от 0 до 0,5°) для электрических размеров КРО 13 и 22λ

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный подход к метрологическому обеспечению измерений ЭПР КРО уголкового типа в радиолокационном диапазоне можно использовать в интересах фоновое информационного обеспечения космических средств вооружения, а также при проведении испытаний образцов космического вооружения. Полученные результаты оценки ЭПР КРО уголкового типа обеспечивают заданный в установленные сроки результат измерений с требуемой точностью (размером допускаемых погрешностей).

Представленный научный результат дает возможность оценки моностатических ЭПР отражателей уголкового типа в пределах главного лепестка ДОР в широкой полосе частот с погрешностью меньшей, чем при прямых измерениях ЭПР.

Выявлена функциональная зависимость поправочного коэффициента, входящего в аналитическое выражение расчета величины ЭПР трехгранных УО с треугольными гранями, учитывающего флуктуации ЭПР в заданной полосе частот.

В результате проведенных исследований получены аналитические выражения для расчета предельного отклонения значений ЭПР КРО уголкового типа в пределах главного лепестка ДОР, вызванного неперпендикулярностью граней.

### Список используемых источников

1. *Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В.* Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования поверхности Земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны: учеб. пособие. – СПб.: СПбГУАП, 1999. – Ч. 2. – 220 с.
2. *Кобак В.О.* Радиолокационные отражатели. – М.: Сов. радио, 1975. – 248 с.
3. Патент на изобретение № CN 105466365 А. Способ расчета ЭПР трехгранного углового отражателя с квадратными гранями в радиодиапазоне / заявитель Ли Чуань, Ху Цзянь (Китай); патентообладатель Китайская академия наук. – № 201510770350. 0; опубл. 06.04.2016.
4. Патент на изобретение № CN 105466365 В. Способ расчета ЭПР трехгранного углового отражателя с квадратными гранями в радиодиапазоне / заявители Ли Чуань, Ху Цзянь (Китай); патентообладатель Китайская академия наук. – № 201510770350. 0; опубл. 17.11.2017.
5. Патент на изобретение № CN 103530469 В. Метод расчета углового отражателя / заявители Ли Сонгвенг, Ян Цзиньлин, Чжоу Хуэй (Китай); патентообладатель Университет Ухани. – № 201310503009. X; опубл. 30.03.2016.
6. МИ 1317-86 ГСИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроля их параметров.
7. *Скоробогатова О.А.* Разработка метрологического обеспечения измерений эффективной площади рассеяния калибровочных радиолокационных отражателей углового типа, используемых при проведении натуральных испытаний образцов вооружения, на этапе их изготовления и сборки // Сборник трудов IV Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы создания и эксплуатации вооружения, военной и специальной техники» / под общ. ред. Ю.В. Кулешова – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – С. 267–273.

Method of measurement of parameters of the ice cover with the help of on-board radio-electronic stations with the synthetic aperture on the aircraft / A.P. Aleshkin, K.V. Demidov, V.I. Nevzorov, O.L. Polanczyk, S.Y. Semin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 6–10.

A method for measuring the parameters of the ice cover using decimeter-band signals based on the synthesis of the aperture on the aircraft is proposed. The angular resolution of the system is calculated.

*Key words: earth remote sensing, radar aperture synthesis, ice exploration.*

Afonin G.I., Koshkarov A.S., Maltsev G.N. Comparative analysis of the isoplanatism angle estimates at the observation of space and astronomical objects by ground-based optical systems for different atmospheric models // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 11–16.

A comparative analysis of the isoplanatism angle estimates at the observation of space and astronomical objects by ground-based optical systems for different atmospheric models is carried out. The results of calculations of the isoplanatism angle are presented, which are compared with the values of the isoplanatism angle in accordance with empirical models and standard models of the atmosphere. The fulfillment of the isoplanatism condition during the implementation of adaptive phase correction of atmospheric distortions with adaptation by the «laser star» is analyzed. It is shown that in conditions of good astroclimate in ground-based optical systems with adaptive phase correction of atmospheric distortions it is possible adaptation by the «laser star» and obtaining images of space and astronomical objects with high resolution exceeding the atmospheric limit of resolution

*Key words: optical system, observation of space and astronomical objects, adaptive phase correction, «laser star», isoplanatism angle.*

Ultra low frequency wave propagation in the high latitude ionosphere during storm sudden commencement in charged particles precipitation conditions / O.I. Akhmetov, V.B. Belakhovsky, I.V. Mingalev, O.V. Mingalev, Z.V. Suvorova, S.M. Chernyakov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 17–21.

The results of numerical experiments on the electromagnetic signals propagation in the Earth-ionosphere waveguide with various states of the ionosphere in the high latitudes atmosphere of are presented. The concentration profiles used in numerical experiments are based on data from the partial reflections facility at the observatory “Tumanny” (69.0N, 35.7E) of the Polar Geophysical Institute and IRI2016 model during storm sudden commencement 17.03.2013.

The influence of the electron concentration horizontal spatial structure at the heights of reflection on the propagation of the ULF wave is discussed.

*Key words: ULF wave propagation, numerical modeling, ionosphere.*

Bakursky K.V., Gusakov V.M., Tsykunov V.N. Use of signals radio emission sources in the interests if frequency and time support of GLONASS // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 22–26.

To improve the quality of the navigation field and improve the stability of the system time scale of the global navigation satellite system GLONASS it is proposed to use the reception of signal of natural radiation of neutron stars.

*Key words: GLONASS, pulsar time, navigation spacecraft.*

The method of increasing the resolution ability of multiposition radar systems with a synthesized aperture based on splitting a spectrum signal with linear frequency modulation / V.S. Bakholdin,

D.A. Gavrilov, V.F. Ivanov, D.A. Lekontsev // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 27–31.

The article proposes a method for increasing the resolution of a synthetic aperture radar based on the splitting of the spectrum. The use of a signal with a linear frequency modulation and a split spectrum for the formation of radar images is proposed. A comparison of its spectral and correlation characteristics with the characteristics of the meander noise-like signals was made. The possibility of using a signal with a linear frequency modulation and a split spectrum in multifrequency multiposition radar systems with synthesized aperture has been evaluated.

*Key words: synthetic aperture radar, linear frequency modulated signal, radar imaging, multifrequency multiposition radar system, spectrum splitting.*

Bova Y.I., Kryukovsky A.S., Kutuza B.G. The research of faraday rotation of the polarization vector in the high frequency range taking into account of Earth's ionosphere influence // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 32–37.

The influence of ionospheric plasma on the propagation of radio waves of the megahertz range is considered. Refraction errors and signal phase variations are investigated. Depending on the frequency of the radiation source, the angles of the Faraday rotation of the polarization vector were calculated.

*Key words: mathematical modeling, electromagnetic wave propagation, ionospheric plasma, bicharacteristics, ray paths, phase variations, polarization vector, Faraday rotation.*

Vaganov A.A., Onufrey A.Y. Monitoring of the earth and water surface in the optical range by constellation of small spacecrafts in low orbits // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 38–48.

The variants of global monitoring of the earth and water surface using the grouping of small spacecraft in low orbits are considered. Calculations of the bandwidth of the spacecraft continuous review and their required number depending on the orbit height, the angle of the field of view and the observation variant are presented. Requirements to the communication system are presented.

*Key words: monitoring, small spacecraft, orbital parameters, on-Board optical-electronic apparatus, low orbit.*

Gusakov V.M., Ivanov V.F., Savochkin P.V. Simulation of radar wave propagation taking into account Faraday effect // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 49–53.

A radiation model for constructing the trajectory of radio waves in the microwave range propagating through the atmosphere is proposed using a spherical layered model that takes into account both longitudinal and, indirectly, the horizontal distribution of the refractive index, as well as the rotation of the polarization plane due to the Faraday effect. On the basis of the model, an algorithm is developed that allows to achieve high accuracy in determining the radar parameters at low computational cost.

*Key words: radar, radio wave propagation, Faraday effect, Snellius law.*

Criteria for establishing trajectories of space objects simultaneously observed by a radar station / V.I. Erokhin, A.P. Kadochnikov, V.V. Kakaev, Y.V. Soloviev, S.V. Sotnikov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 54–58.

Long-range radar stations often encounter the problem of resolving several space objects that are close to each other. The article proposes new criteria for establishing trajectories of space targets



that are simultaneously in the radar field of view, which are proposed to be used in existing algorithms for the secondary processing of radar information. These criteria allow, without losing the quality of the solution of the task of establishing trajectories of a TO, to reduce the laboriousness of iterating through the options to  $O(n^3)$ , where  $n$  is the number of observed targets.

*Key words: processing of radar information, trajectory set-up.*

Ilushin Y.A., Padokhin A.M. Monitoring of the waving surface level with the interferometric reflectometric technique // Proceeding of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 59–63.

The results of numerical simulation of the experiment on interference reflectometric altimetry of the level of the excited sea surface by signals of radio beacons of Global Satellite Navigation Systems are presented. Systematic errors of sea level determination caused by sea waves are estimated. The effect of partial shading of the profile of the excited surface was investigated in the observation of the beacon in the directions close to the horizontal.

*Key words: global navigation systems, reflectometry, interferometry, sea level, passive radar.*

Lopatin V.P., Fateev V.F. A passive bistatic radar system based on signals of GNSS is presented // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 64–68.

A passive bistatic radar system based on signals of GNSS is presented. This system is promising for measuring the height of the receiver above the reflecting surface, speed of near-surface wind, roughness of water surface, etc. Experiments in the anechoic chamber show the possibility of using phase of signals to measure changes in the height of the receiver above the reflecting surface. The results of the phase GNSS-reflectometry experiments have a high accuracy of the change in height above the reflecting surface. RMS of measurements is no more than 0,2 cm.

*Key words: GNSS-Reflectometry, NKA, bistatic radar, GPS, anechoic chamber.*

Meleshko A.V., Onufrey A.Y., Pyatkov V.V. Synthesis of the multidimensional digital tracking meter of object's coordinates // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 69–75.

The article deals with tracking radar systems by range and angular coordinates. The synthesis of digital discriminators in the systems of measuring range and angular coordinates is given. The digital time discriminator with the channel of compensation of a dynamic error of tracking is offered.

*Key words: radar station, phased array antenna, strobe, discriminator, co-ordinate measurement.*

Muchin A.I., Petrova L.V, Poutchkova I.A. A method of monitoring vessels by modern and advanced communication satellites in the absence of radiation AIS transponders // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 76–80.

The article considers the inefficiency of the automatic identification system in the absence of radio emissions from AIS transponders. In the event of such situations, in order to ensure safe navigation, an alternative method of vessel monitoring is proposed, based on the preparation of an electronic portrait of the object based on the results of receiving radio signals emitted from other on-Board electronic means. As a result, of the analysis of the received radio emissions, the object is identified and entered into the database of ships and ports.

*Key words: vessel monitoring, AIS-transponder, energy availability, communication satellite.*

Smirnov A.P. Absolute method of radar cross section measurement and technical means for its implementation // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 81–85.

A method for measuring RCS using GTEM-cells has been proposed. The method is based on the methods of indirect calculations of the field strength of the emissions in GTEM-cells, which are widely used in EMC testing. The combination of the capabilities of GTEM-cells for immunity and emissions testing allows estimating the RCS through the evaluation of the cell's S-parameters with the object placed. The advantage of the proposed approach is the possibility of measuring RCS in the low-frequency range of less than 0.5–1 GHz, which is not available with conventional measuring instruments. The experimental measurements performed on spherical reflectors showed the extreme proximity of the measurement results to the theoretical estimates.

*Key words: RCS, GTEM-cell, S-parameters, measurements, electromagnetic compatibility.*

Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I., Zhemyakov I.N. Wave disturbances of the neutral component in the Earth mesosphere and lower thermosphere // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 86–90.

The paper discusses possibilities of the monitoring of the mesosphere and the lower thermosphere based on the method of the diagnostics of the Earth's lower ionosphere, based on the creation of artificial periodic irregularities of the ionospheric plasma and the backscattering of probe radio waves from them. Irregularities are created by the radiation into zenith of powerful high-frequency radio waves by the SURA heating facility. The results of the determination of the main parameters of the ionosphere and the neutral atmosphere in the altitude range of 50–130 km are presented, the prospects for the application and the evolution of the method are discussed.

*Key words: mesosphere, lower thermosphere, waves, artificial periodic irregularities, plasma vertical motion, temperature, density.*

Bisyarin M.A. Influence of the dispersive properties of the waveguide channel on mode characteristics and envelope of the high-power signal // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 91–95.

The amplitude-modulated high-power pulse propagation in a planar stratified waveguide channel is investigated. The process is modelled by means of generalization of the nonlinear wave equation taking into account the material dispersion of the medium. A realistic model of the waveguide channel is involved including its longitudinal inhomogeneity and availability of cladding layers. A consistent asymptotic technique of the model equation solution is elaborated enabling to estimate the influence of the material and waveguide dispersions on either pulse mode structure and nonlinear dynamics of its envelope.

*Key words: natural waveguide channel, material dispersion, waveguide dispersion, nonlinear waves, pulse envelope, waveguide's modes, variable coefficients nonlinear Schrödinger equation.*

Small-scale artificial irregularities: observation and results / N.F. Blagoveshchenskaya, T.D. Borisova, A.S. Kalishin, T. Yeoman // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 96–100.

Experimental results concentrating on the features, characteristic and evolution, generation conditions and mechanisms of small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAIs) in the high latitude ionosphere F region induced by the controlled injection of the powerful HF radio waves from the ground into the ionosphere are presented. Results are based on a large number of experiments carried out from 2010–2016 at the EISCAT HF Heating facility near Tromsø. The main attention is paid to the features of AFAIs excited by extraordinary (X-mode) polarized HF pump waves at heater frequencies below and above the critical frequency of the F2 layer.

*Key words: powerful HF radio wave, polarization, high latitude ionosphere, small-scale artificial field-aligned irregularities (AFAIs), instability, excitation mechanism.*

Comparison of efficiency detection of dangerous weather potentials by two Doppler locators / K.L. Voskanan, I.S. Zamorin, A.D. Kuznetsov, O.S. Seroukhova, T.E. Simakina, A.S. Solonin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 101–104.

An assessment of the ability of meteorological objects to be detected by Doppler meteorological radars installed at Pulkovo Airport and at Malookhtinsky Ave, d.98 of St. Petersburg, in an array of 2100 cases of Dangerous Weather Events.

*Key words: doppler meteorological radars, ground weather stations, hazardous weather phenomena, thunderstorms, precipitation.*

Experimental determination for contributions of reflections from object construction elements on radar images / A.S. Gribkov, V.S. Gribkov, S.I. Moryakov, D.A. Sluhaeva // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 105–110.

The method of experimental determination for contributions of reflections from object construction elements, based on analysis of its two-dimensional ISAR images, is proposed. The method allows single measurement to identify and evaluate the contributions of construction elements of the researched object reflected signal.

*Key words: radar cross section, two-dimensional ISAR images of objects, construction elements.*

Denisenkov D.A., Zhukov V.Y., Shchukin G.G. The modeling of weather radar's output information provided observation of nonstationary pole wind // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 111–115.

Describes the mathematical models of cards the width range of radial velocities of the particles obtained from observation of meteorological radar wind shear or vertical air flow. The results of numerical solution of these models. Draws conclusions about the possibility of effective use of data cards for diagnosing these hazards.

*Key words: meteorological radar, wind shear, signal spectrum width, microburst.*

Determination of F-scattering characteristics in summer period based on data of the IS-19 satellite / N.A. Dyatko, A.A. Kapyug, I.V. Kochetov, V.A. Telegin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 116–119.

In this paper, we calculate the probabilities of the appearance of various types of F-scattering in different intervals of invariant latitudes as a function of local time. The studies were carried out for the summer period on the basis of data obtained using the IS-338 ionosonde mounted on board the IK-19 satellite.

*Key words: ionosphere, external sensing, F-scattering, probability.*

Kalatsky M.G., Kruchenitskii G.M., Churilov V.A. Seasonal variability of the zonal averaged fields of vertical distribution of temperature and ozone in non-polar regions of the earth // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 120–123.

Built regression models of seasonal variability fields of the vertical distribution of temperature and ozone in the latitudinal range of 60°S–60°N with a step of 5° and the altitude range 10–50 km with a step of 0.5 km from the Developed software for the animation of the intra-annual evolution of the profiles of the vertical distribution of ozone, temperature, and latitudinal – height cross-sections. The latitudinal and altitudinal dependences of the spectral composition of temperature and ozone fields and their correlation properties are studied. The approaches to the practical application

of the obtained results to the tasks of operational monitoring of the VOD without the use of expensive sensors of balloon sensing of ozone concentration are substantiated.

*Key words: ozone sphere, statistical modeling, vertical temperature distribution, correlation of ozone concentration and temperature profiles.*

Kamyshev A.L., Matyushenko A.A., Fedyai E.A. About increase of accuracy mobile objects coordinates measurement by the meter located on the mobile basis // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 124–128.

The paper presented method and algorithm accuracy mobile objects coordinates measurement by the meter located on the mobile basis which detect object coordinates with basis movement on the measurement interval.

*Key words: mobile object, measurement accuracy.*

Mitnik L.M., Mitnik M.L., Khazanova E.S. Oceanic and atmospheric fronts in the Northwest Pacific Ocean on satellite radar images // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 129–134.

The extended contrast features on the satellite ocean images acquired by synthetic aperture radar (SAR) and real aperture radar (RAR) are analyzed together with the ancillary satellite and ground base data. The data were obtained by C-band ASAR from Sentinel-1A/-1B, L-band PALSAR from ALOS-1/-2, X-band RAR from Cosmos-1500/-1766 satellites as well as by satellite ASCAT and OSCAT scatterometers and AMSR2 and GMI microwave radiometers. Oceanic and atmospheric fronts manifest themselves as narrow contrast zones (boundaries) against the background. The amplitude and sign of the radar contrasts at each spectral band depend on combination of the environmental parameters at both sides of the front under consideration. The variations of the radar backscattering, sea surface wind, and atmospheric parameters are given for the fronts in the Kuroshio-Oyashio transition zone and in extratropical cyclone areas in the Northern Pacific Ocean and show clearly the advantage of the joint analysis of multisensory data.

*Key words: SAR, C-band Sentinel-1A/-1B ASAR, L-band ALOS-1/-2 PALSAR, SAR signatures, oceanic fronts, Kuroshio-Oyashio transition zone, atmospheric fronts.*

Mitnik L.M., Khazanova E.S. Gulf of Finland of the Baltic Sea and groundcover on the satellite C- and L-band SAR images // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 135–139.

Gulf of Finland of the Baltic Sea, the lakes (Ladoga, Peipus, etc.), rivers (the Neva, Velikaya, Narva, etc.) has a significant contrast on the radar images against the background of the East European Plain and Karelian Isthmus. The magnitude and sign of the radar contrast are determined by the state of the water surface (wind, ice cover) and the surrounding land covers (soil type and moisture, vegetation, etc.) and varies with the wavelength and polarization of the radar pulses. The seasonal and synoptic variability of radar contrasts is clearly pronounced, due to changes in surface temperature, the appearance and evolution of snow / ice cover and vegetation, and other processes that affect the value of the Normalized Radar Cross Section (NRCS)  $\sigma^0$ . The article deals with the SAR images acquired from the Envisat and Sentinel-1B satellites in the C-band and from the ALOS-1/ALOS-2 satellites in the L-band. The variability of NRCS and radar contrasts along cross sections intersecting various types of covers was analyzed.

*Key words: SAR, Gulf of Finland, Baltic Sea, C-band Sentinel-1B, Envisat ASAR, L-band ALOS-1/ALOS-2 PALSAR, sea ice, land surface signatures, atmosphere phenomena.*

Multi-frequency microwave radiometric studies of radio-thermal radiation of convective clouds in the formation and development of dangerous atmospheric meteorological phenomena / E.A. Ros-

tokina, I.N. Rostokin, E.V. Fedoseeva, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 140–145.

The article presents the results of multi-frequency microwave studies of the atmosphere during the formation of dangerous weather events - heavy rain using a three-band radiometric system with compensation of background noise. The correlation processing of the results of measurements of radiothermal radiation of the cloudy atmosphere is performed, their correlation with the rain intensity measured in the surface layer of the atmosphere is estimated. The prospects of this method for the formation of forecasts of dangerous weather events are shown.

*Key words: microwave radiometric study of cloudy atmosphere; compensation of background noise; dangerous weather events, correlation coefficient.*

Perspectives of collaborative using the facilities of ISTP SB RAS and AO RTI for the ionosphere error correction in radio location and radio communication systems / O.I. Berngardt, G.A. Zherebtsov, V.I. Kurkin, D.S. Kushnarev, V.P. Lebedev, A.S. Logovsky, A.V. Medvedev, S.V. Olemskoy, A.V. Osipov, K.G. Ratovsky, A.V. Timoshenko, M.Y. Filippov, Y.V. Yasyukevich // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 146–149.

In the report we discuss the directions of work devoted to the ionosphere monitoring and the development of an experimental complex by the ISTP SB RAS and AO RTI. The main practical application of fundamental ionospheric research is to improve the accuracy of shortwave radars and radio communication systems. The report discusses the capabilities of existing experimental tools and those created within the framework of the project of the National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences for the correction of ionospheric errors.

*Key words: ionosphere, ionosphere disturbances, ionosphere error, radiolocation, radio communication.*

Some experimental results: perspectives of water vapour radiometer / V.Y. Bykov, G.N. Ilyin, D.M. Karavaev, G.G. Shchukin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 150–153.

There are discussed method of ground-based microwave radiometry to determine of integrated water vapor and cloud liquid water contents, as well as estimating caused by water vapor tropospheric delay. Presents the technical characteristics of water vapour radiometer, created by IAA RAS and some of the results of studies carried out in geophysical Observatory of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. On the basis of the obtained studies are discussed perspectives of application the water vapour radiometer for problems of applied meteorology.

*Key words: geophysical observatory, meteorological forecasts, water vapor, cloud liquid, water vapor radiometer, tropospheric wet delay, validation.*

Experimental verification of the possibility of radar determination of the height of cloud boundaries / D.V. Ermilov, V.M. Kalmykov, D.V. Kozlov, V.V. Sterlyadkin // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 154–158.

The results of complex field measurements of the height of cloud boundaries based on the use of coherent millimeter-wave radar systems and with the ball-pilot measurements are presented. Simultaneously, measurements were made of the wind field, gradients and wind shears. Measurement techniques and equipment are described. The shortcomings of each method are noted. Software for radar detection of the boundaries of clouds and software for reconstruction of the wind field parameters are discussed.

*Key words: cloud boundary, ball-pilot measurements, wind profile, radar sounding, wind shear.*

Ilyin A.L., Shulzhenko A.V., Shulzhenko A.D. The application features an aircraft when testing radar means semiopetra // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 159–163.

The effect of the instability of the flight in aircraft carrier on the quality of forming radar picture was considered. On this basis the mistakes of carrier's speed setting and distance to the object during the process of radar picture forming lead to deterioration of spatial resolution regardless the angle size aircraft carrier removal. Notice that the angle of removal in aircraft carrier presence and mistakes in speed setting of carrier and distance to object of observation lead to the additional geometric distortions of forming radar picture. The requirements to the navigation support during the test flight are represented.

*Key words: synthetic aperture radar, radar picture, spatial resolution, geometric distortions, navigation parameters.*

Wideband radar measuring set based on vector network analyzer / S.I. Moryakov, S.M. Nesterov, I.A. Skorodumov, P.N. Skokov // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 164–168.

In the paper an experimental research of using a wideband radar measuring set based on vector network analyzer to provide radar cross section measurements and ISAR imaging in semi-naturals and naturals conditions is proposed.

*Key words: radar measuring set, vector network analyzer, radar cross section, inverse synthetic aperture, radar images.*

Skorobogatova O.A. Features of metrological support indirect measurements of the effective area of the scattering calibration of the radar reflectors angle-type in the interests of information support of space weapons // Proceedings of the Mozhaisky Military Aerospace Academy. – SPb.: Mozhaisky MAA, 2019. – Release 670: Radar investigation of natural environments. – P. 169–178.

The main features of the metrological support (MO) of indirect measurements of the effective scattering area (EPR) of angular-type calibration radar reflectors (CRO) within the main lobe of the backscattering diagram (DOR) in the radar range in the interests of phon-target information support of space weapons are analyzed. Scientific aspects-that of the proposed approach for MO are obtained by the author analytical expressions for the calculation of the maximum deviations of the RCS values of KRO angle-type within the main lobe of DOR caused by not-perpendicular faces samples of reflectors.

*Key words: metrological assurance, corner reflector, indirect measurements, not-perpendicular faces.*

**Алёшкин Андрей Петрович**, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-31.

**Афонин Глеб Игоревич**, преподаватель 96-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-95-61, e-mail: vka@mil.ru

**Ахметов Олег Иршатович**, научный сотрудник Полярного геофизического института, (184209, Россия, Апатиты, Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (911) 800-23-66, e-mail: akhmetov@pgia.ru

**Бакурский Клим Валерьевич**, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-99-31, e-mail: vka@mil.ru

**Бахметьева Наталия Владимировна**, ведущий научный сотрудник, заведующий сектором физики и диагностики нижней ионосферы Научно-исследовательского радиофизического института Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (910) 793-23-25, e-mail: nv\_bakhm@nirfi.unn.ru

**Бахолдин Владимир Станиславович**, доцент 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-95-33, e-mail: bvs@email.ru

**Белаховский Владимир Борисович**, научный сотрудник Полярного геофизического института, (184209, Россия, Апатиты, Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (911) 332-87-11, e-mail: belakhovsky@pgia.ru

**Бернгардт Олег Игоревич**, заведующий лабораторией Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 564-569, e-mail: berng@iszf.irk.ru

**Бисярин Михаил Александрович**, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного университета (199034, Россия, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9); тел.: +7 (812) 428-99-50, e-mail: m.bisyarin@spbu.ru

**Благовещенская Наталья Федоровна**, главный научный сотрудник – заведующий лабораторией Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (921) 303-88-15, e-mail: nataly@aari.nw.ru

**Бова Юлия Игоревна**, старший преподаватель кафедры Информационных технологий и естественнонаучных дисциплин Российского нового университета (105005, Россия, Москва, ул. Радио, 22); тел.: +7 (495) 925-03-73, julia\_bova@mail.ru

**Борисова Татьяна Дмитриевна**, старший научный сотрудник Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидромета (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (921) 752-80-41, e-mail: borisova@aari.ru

**Быков Владимир Юрьевич**, научный сотрудник Института прикладной астрономии Российской академии наук (197110, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 8); тел.: +7 (812) 275-09-91, e-mail: igen@iaaras.ru

**Ваганов Алексей Александрович**, адъютант 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (812) 347-96-10, e-mail: alexeyvaganoff@gmail.com

**Восканян Карина Левановна**, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (812) 633-01-74, e-mail: kvosia@mail.ru

**Гаврилов Денис Александрович**, начальник 16-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-95-33, e-mail: gdanas@yandex.ru

**Грибков Алексей Сергеевич**, старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); тел.: +7 (4822) 52-88-38, e-mail: a.s.gribkov@mail.ru

**Грибков Виталий Сергеевич**, научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); тел.: +7 (4822) 52-88-38, e-mail: v.s.gribkov@mail.ru

**Григорьев Геннадий Иванович**, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского радиофизического института Нижегородского государственного университета имени Н.И. Лобачевского (603950, Россия, Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (831) 436-99-50, e-mail: grig19@list.ru

**Гусаков Виктор Михайлович**, старший преподаватель 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (951) 658-62-22.

**Денисенков Дмитрий Анатольевич**, преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (905) 219-59-16, e-mail: dimasden@yandex.ru

**Дятко Николай Аркадьевич**, ведущий инженер Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (905) 586-72-50, e-mail: dyatko.nik@gmail.com

**Ермилов Дмитрий Владимирович**, начальник сектора Центрального конструкторского бюро аппаратостроения (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); тел.: +7 (920) 753-69-97, e-mail: otd412@mail.ru

**Ерохин Владимир Иванович**, старший научный сотрудник 51-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (962) 712-89-82, e-mail: erohin\_v\_i@mail.ru



**Жемяков Илья Николаевич**, студент Нижегородского исследовательского государственного университета имени Н.И. Лобачевского (603950, Россия, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23); тел.: +7 (831) 436-99-50, e-mail: ilia.zhem@yandex.ru

**Жеребцов Гелий Александрович**, научный руководитель Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); академик РАН, доктор физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 564576, e-mail: uzel@iszf.irk.ru

**Жуков Владимир Юрьевич**, старший преподаватель 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 35), кандидат технических наук; тел.: +7 (921) 998-12-06, e-mail: vuzhukov2002@list.ru

**Заморин Игорь Семенович**, директор ООО «МетеоМонитор» (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); тел.: +7 (921) 890-40-09, e-mail: meteomonitor@rshu.ru

**Иванов Вадим Федорович**, старший преподаватель 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (812) 347-95-33, e-mail: vf\_ivanov@list.ru

**Ильин Александр Леонидович**, старший научный сотрудник 45-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (921) 368-23-70.

**Ильин Геннадий Николаевич**, руководитель Отделения радиоастрономических наблюдений Института прикладной астрономии Российской академии наук (191187, Россия, Санкт-Петербург, наб. Кутузова, 10); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (812) 275-09-91, e-mail: igen@iaaras.ru

**Илюшин Ярослав Александрович**, доцент физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1); тел.: +7 (910) 425-36-64, e-mail: ilyushin@phys.msu.ru

**Йоман Тим**, профессор Лейстерского университета (University Road, Leicester LE1 7RH, UK); доктор наук; тел.: +44 (116) 252-35-64, e-mail: ухо@leicester.ac.uk

**Кадочников Андрей Павлович**, старший научный сотрудник – начальник 512-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (981) 782-43-07, e-mail: kado162@mail.ru

**Какаев Виталий Викторович**, начальник 51-го отдела – заместитель начальника 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (911) 196-89-83, e-mail: kakaev\_vv@mail.ru

**Калацкий Максим Григорьевич**, студент кафедры систем, устройств и методов геокосмической физики факультета аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института, (141700, Россия, Московская область, Долгопрудный, пер. Институтский, 9).

**Калишин Алексей Сергеевич**, ведущий научный сотрудник – заведующий отделом геофизики Арктического и антарктического научно-исследовательского института Росгидроме-

та (199397, Россия, Санкт-Петербург, ул. Беринга, 38); кандидат технических наук; тел.: +7 (905) 267-46-91, e-mail: askalishin@aari.ru

**Калмыков Виктор Михайлович**, начальник отдела Центрального конструкторского бюро аппаратостроения (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); тел.: +7 (906) 621-14-90, e-mail: rts6@cdbae.ru

**Камышев Алексей Ларьгеевич**, старший научный сотрудник 523-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (921) 380-85-16, e-mail: kamal@mail.ru

**Каптюг Алексей Александрович**, ведущий инженер Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (916) 323-35-94, e-mail: sabir92111@rambler.ru

**Караваяев Дмитрий Михайлович**, старший научный сотрудник 32-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-95-52, e-mail: dm.karavaev@mail.ru

**Козлов Денис Вячеславович**, ведущий инженер Центрального конструкторского бюро аппаратостроения (300034, Россия, Тула, ул. Демонстрации, 36); тел.: +7 (920) 275-74-75, e-mail: MrKozlovDV@mail.ru

**Кочетов Игорь Валерианович**, ведущий инженер Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова Российской академии наук (108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (916) 375-84-49, e-mail: kochet@triniti.ru

**Кошкарлов Александр Сергеевич**, докторант 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-97-32, e-mail: vka@mil.ru

**Крученицкий Григорий Михайлович**, заведующий отделом № 20 Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета (141700, Россия, Московская область, Долгопрудный, ул. Первомайская, 3); доктор физико-математических наук.

**Крюковский Андрей Сергеевич**, научный руководитель института информационных систем и инженерно-компьютерных технологий Российского нового университета (105005, Россия, Москва, ул. Радио, 22); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (495) 925-03-73, Kryukovsky56@yandex.ru

**Кузнецов Анатолий Дмитриевич**, заведующий кафедрой экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (812) 633-01-74, e-mail: kuznetsov1946@inbox.ru

**Куркин Владимир Иванович**, заведующий отделом Физики околоземного космического пространства Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 56-45-04, e-mail: kurkin@iszf.irk.ru

**Кутуза Борис Георгиевич**, заведующий лабораторией института Радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук (125009, Россия, Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (916) 615-33-21, e-mail: kutuza@cplire.ru

**Кушнарев Дмитрий Сергеевич**, старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 56-45-69, e-mail: ds\_k@iszf.irk.ru@iszf.irk.ru

**Лебедев Валентин Павлович**, старший научный сотрудник Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 564569, e-mail: lebedev@iszf.irk.ru

**Леконцев Дмитрий Александрович**, преподаватель 33-й Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-95-33, e-mail: kuvalda13@mail.ru

**Логовский Алексей Станиславович**, директор НТЦ-10 – главный конструктор Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца (127083, Россия, Москва, ул. 8-го марта, 10, стр. 1); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: info@rti-mints.ru

**Лопатин Владислав Павлович**, младший научный сотрудник научно-исследовательского отделения разработки и эксплуатации средств метрологического обеспечения координатно-временных и навигационных систем Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических изменений (141570, Россия, Московская область, Солнечногорский район, п.г.т. Менделеево); тел.: +7 (495) 526-63-63 (доб. 91-55), e-mail: lopatin@vniiftri.ru

**Мальцев Георгий Николаевич**, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-97-32, e-mail: vka@mil.ru

**Матюшенко Алексей Алексеевич**, старший научный сотрудник 52-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат военных наук, доцент; тел.: +7 (911) 255-00-00, e-mail: mataa47@mail.ru

**Медведев Андрей Всеволодович**, директор Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 428265, e-mail: uzal@iszf.irk.ru

**Мелешко Алла Вячеславовна**, ведущий специалист Научно-производственного предприятия «Радар ммс» (197375, Россия, Санкт-Петербург, ул. Новосельковская, 37, лит. А); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 335-25-55, e-mail: allaluna@list.ru

**Мингалёв Игорь Викторович**, ведущий научный сотрудник Полярного геофизического института, (184209, Россия, Апатиты, Академгородок, 26а); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (921) 171-38-19, e-mail: mingalev\_i@pgia.ru

**Мингалёв Олег Викторович**, заведующий сектора № 203 Полярного геофизического института, (184209, Россия, Апатиты, Академгородок, 26а); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (911) 327-86-47, e-mail: mingalev\_o@pgia.ru

**Митник Леонид Моисеевич**, главный научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: +7 (423) 231-28-54, e-mail: lm\_mitnik@mail.ru

**Митник Мая Львовна**, старший научный сотрудник Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: +7 (423) 231-28-54, e-mail: maia\_mitnik@mail.ru

**Моряков Станислав Игоревич**, младший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); кандидат технических наук; тел.: +7 (4822) 52-88-38, e-mail: s.i.moryakov@mail.ru.

**Мухин Анатолий Иванович**, начальник 372-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-97-59.

**Невзоров Валерий Иванович**, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-95-31.

**Нестеров Сергей Михайлович**, главный научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (4822) 52-88-98, e-mail: s.m.nesterov@inbox.ru

**Олемской Сергей Владимирович**, заместитель директора по научной работе Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 564-564, e-mail: osv@iszf.irk.ru

**Онуфрей Андрей Юрьевич**, ведущий научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-96-10, e-mail: onufrey\_a@mail.ru

**Осипов Александр Владимирович**, директор Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца (127083, Россия, Москва, ул. 8-го марта, 10, стр. 1); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: info@rti-mints.ru

**Падохин Артём Михайлович**, старший научный сотрудник физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119991, Россия, Москва, Ленинские горы, 1); тел.: +7 (495) 939-20-89, e-mail: padokhin@physics.msu.ru

**Петрова Людмила Вячеславовна**, младший научный сотрудник 372-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13).

**Полончик Олег Леонидович**, доцент 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-95-31.

**Пучкова Ирина Александровна**, научный сотрудник 372-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); e-mail: rouchova@mail.ru

**Пятков Вячеслав Викторович**, профессор 82-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (921) 983-20-13, e-mail: pyatkov1955@mail.ru

**Ратовский Константин Геннадьевич**, заведующий лабораторией Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 56-45-39, e-mail: ratovsky@iszf.irk.ru

**Ростокина Елена Анатольевна**, доцент Муромского института Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (602264, Россия, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); кандидат технических наук; тел.: +7 (920) 925-78-72, e-mail: arostokina@yandex.ru

**Ростокин Илья Николаевич**, доцент Муромского института Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (602264, Россия, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук; тел.: +7 (920) 944-15-84, e-mail: rostockin.ilya@yandex.ru

**Савочкин Павел Владимирович**, заместитель начальника 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (911) 272-56-73.

**Сероухова Ольга Станиславовна**, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: +7 (921) 315-99-66, e-mail: iram@iram.ru

**Сёмин Сергей Юрьевич**, старший преподаватель 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (812) 347-95-31.

**Симакина Татьяна Евгеньевна**, доцент кафедры экспериментальной физики атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: +7 (812) 633-01-74, e-mail: tatiana.simakina@gmail.com

**Скоков Петр Николаевич**, старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); тел.: +7 (4822) 52-88-38, e-mail: p.n.skokov@mail.ru

**Скоробогатова Ольга Анатольевна**, старший научный сотрудник 422-й научно-исследовательской лаборатории 42-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. генерала Хрулёва, 16); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (911) 226-98-44.

**Скородумов Иван Алексеевич**, старший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); кандидат технических наук; тел.: +7 (4822) 52-88-38, e-mail: i.a.skorodumov@mail.ru

**Слухаева Дарья Андреевна**, младший научный сотрудник Центрального научно-исследовательского института Войск воздушно-космической обороны Министерства обороны Российской Федерации (170026, Россия, Тверь, наб. Аф. Никитина, 32); тел.: +7 (4822) 52-88-38.

**Смирнов Андрей Павлович**, старший научный сотрудник, руководитель направления электромагнитной совместимости и радиоизмерений научно-производственной фирмы «Диполь» (197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Рентгена, 5, корп. Б); доктор технических наук; тел.: +7 (812) 424-57-60, e-mail: smirnov@dipaul.ru

**Соловьёв Юрий Валерьевич**, старший научный сотрудник 51-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (952) 234-81-34, e-mail: soloviev\_yu@mail.ru

**Солонин Александр Сергеевич**, директор Института радарной метеорологии (188685 Ленинградская обл., пос. Воейково, 15); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (812) 633-01-74, e-mail: iram@iram.ru

**Сотников Сергей Владимирович**, старший научный сотрудник 51-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (911) 784-43-67, e-mail: sergeyu\_sotnikov@lenta.ru

**Стерлядкин Виктор Вячеславович**, профессор кафедры физики Московского института радиотехники, электроники и автоматики (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (916) 631-70-72, e-mail: sterlyadkin@mail.ru

**Суворова Зоя Викторовна**, программист Полярного геофизического института (184209, Россия, Апатиты, Академгородок, 26а); e-mail: suvorova@pgia.ru

**Телегин Виктор Алексеевич**, заведующий лабораторией Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкина Российской академии наук (108840, Россия, Москва, Троицк, Калужское шоссе, 4); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (909) 990-92-01, e-mail: telvika@gmail.com

**Тимошенко Александр Васильевич**, начальник комплексного отдела – заместитель генерального конструктора Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца (127083, Россия, Москва, ул. 8-го марта, 10, стр. 1); доктор физико-математических наук; тел.: +7 (495) 612-99-99, e-mail: u567ku78@gmail.com

**Фатеев Вячеслав Филиппович**, начальник научно-технического центра метрологического обеспечения наземной и космической гравиметрии Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических изменений (141570, Россия, Московская область, Солнечногорский район, п.г.т. Менделеево); доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ; тел.: +7 (495) 526-63-63 (доб. 91-55), e-mail: fateev@vniiftri.ru

**Федосеева Елена Валерьевна**, доцент Муромского института Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (602264, Россия, Владимирская обл., Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук; тел.: +7 (905) 144-42-06, e-mail: elenafedoseeva@yandex.ru

**Федяй Евгений Александрович**, начальник 52-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук; тел.: +7 (911) 760-14-83.

**Филиппов Михаил Юрьевич**, ведущий инженер Радиотехнического института имени академика А.Л. Минца (127083, Россия, Москва, ул. 8-го марта, 10, стр. 1); тел.: +7 (926) 364-59-31, e-mail: mm.grif@gmail.com

**Хазанова Елена Сергеевна**, ведущий инженер Тихоокеанского океанологического института имени В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (690041, (690041, Россия, Владивосток, ул. Балтийская, 43); тел.: +7 (423) 231-28-54, e-mail: khazanova@poi.dvo.ru

**Цыкунов Владислав Николаевич**, адъюнкт Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (911) 246-02-07.

**Черняков Сергей Михайлович**, научный сотрудник Полярного геофизического института (18301, Мурманск, ул. Халтурина, 15); тел.: +7 (8152) 25-35-57 (доб. 124).

**Чурилова Валентина Александровна**, студентка кафедры систем, устройств и методов геокосмической физики факультета аэрофизики и космических исследований Московского физико-технического института, (141700, Россия, Московская область, Долгопрудный, пер. Институтский, 9).

**Шульженко Андрей Викторович**, научный сотрудник 452-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (911) 296-35-78.

**Шульженко Анастасия Дмитриевна**, начальник 361-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); тел.: +7 (981) 828-56-06.

**Щукин Георгий Георгиевич**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (198199, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-52, e-mail: ggshchukin@mail.ru

**Ясюкевич Юрий Владимирович**, ведущий научный сотрудник Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (664033, Россия, Иркутск, ул. Лермонтова, 126-А); кандидат физико-математических наук; тел.: +7 (3952) 42-82-65, e-mail: yasukevich@iszf.irk.ru

**Алёшкин Андрей Петрович**, профессор 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-31.

**Доронин Александр Павлович**, профессор 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-52.

**Евсеев Владимир Иванович**, старший научный сотрудник 453-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук; тел.: +7 (911) 749-49-50.

**Клейменов Виктор Владимирович**, главный научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**Козырев Геннадий Иванович**, профессор 34-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-34.

**Краснов Виктор Михайлович**, доцент 52-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-52.

**Крюковский Андрей Сергеевич**, научный руководитель института информационных систем и инженерно-компьютерных технологий Российского нового университета (105005, г. Москва, ул. Радио, 22); доктор физико-математических наук, профессор; тел.: +7 (495) 925-03-73, , e-mail: Kryukovsky56@yandex.ru

**Маков Александр Борисович**, доцент 12-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); кандидат технических наук, доцент; тел.: +7 (921) 923-08-03, e-mail: alexmakof@mail.ru

**Мальцев Георгий Николаевич**, профессор 32-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор; тел.: +7 (812) 347-95-32.

**Мысливцев Тимофей Олегович**, начальник 31-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-96-31.

**Назаров Андрей Вячеславович**, начальник 33-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-96-33.

**Поляков Виталий Евгеньевич**, старший научный сотрудник 563-й лаборатории Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**Попов Александр Сергеевич**, старший научный сотрудник 23-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.



**Разумов Александр Владимирович**, старший научный сотрудник 57-го отдела Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.

**Растягаев Дмитрий Владимирович**, проректор по информационным технологиям института информационных систем и инженерно-компьютерных технологий Российского нового университета (105005, г. Москва ул. Радио, 22); кандидат физико-математических наук, доцент; тел.: +7 (495) 925-03-73.

**Ромашов Владимир Викторович**, заведующий кафедрой радиотехники Муромского института (филиала) Владимирского государственного университета имени А.Г. и Н.Г. Столетовых (602264, Владимирская обл., г. Муром, ул. Орловская, 23); доктор технических наук, профессор.

**Сазонов Константин Викторович**, начальник 62-й кафедры Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, доцент; тел.: +7 (812) 347-96-54, e-mail: sazonov\_konstantin@yandex.ru

**Шалдаев Сергей Евгеньевич**, начальник 5-го управления Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского (197198, Россия, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13); доктор технических наук, профессор.