



27-я Международная Крымская конференция СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии Материалы конференции

**10—16 сентября 2017 г.
Севастополь, Крым, Россия**

Том 7

**9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование
и распространение радиоволн;
Секция компании «Таркус»**

**Москва • Минск • Севастополь
2017**

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431
С255

Организаторы:

Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ) — проект № 17-07-20555
Российское научно-техническое общество радиотехники, электроники и связи
(РНТОРЭС) им. А. С. Попова
Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (Москва)
Крымский научно-технологический центр им. проф. А. С. Попова (Севастополь)
Севастопольский государственный университет,
Отдел радиоэлектроники и информационной безопасности
Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского,
Физико-технический институт (Симферополь)
Крымская астрофизическая обсерватория,
Отдел радиоастрономии и геодинамики (Кацивели)
ОАО «НПП "Исток" им. Шокина» (Фрязино)
ОАО «Интеграл», НТЦ «Белмикросистемы» (Минск)
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск)
НП ОАО «Фаза» (Ростов-на-Дону)
АО «Микроволновые системы» (Москва)
НПП «Системные ресурсы» (Москва)
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
ООО «Радиокомп» (Москва)
Уральский федеральный университет им. Б. Н. Ельцина (Екатеринбург)
National Instruments (Москва)
Таркус (Ростов-на-Дону — Севастополь)

Техническая и информационная поддержка:

IEEE, Moscow MTT/ED Chapter
IEEE, Moscow AP Chapter
Медиагруппа «Электроника»

27-я Международная Крымская конференция «**СВЧ-техника** и телеком-
C255 муникационные технологии» (КрыМиКо'2017). Севастополь, 10—16 сентября
2017 г. : материалы конф. в 9 т. — Москва ; Минск ; Севастополь, 2017. —
ISBN 978-966-335-433-0 (тт. 1—9).

Т. 7 : в, 186 [1548—1733] с. : ил. — ISBN 978-966-335-440-8.

В 6-й том включены материалы 29 докладов, которые были представлены на секци-
онных заседаниях по направлению 9. Радиоастрономия, дистанционное зондирование и рас-
пространение радиоволн, а также доклад на секции компании «Таркус».

Материалы конференции изданы также на флеш-накопителе.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов в области СВЧ-техники и те-
лекоммуникационных технологий. Сборник также будет полезен студентам и аспирантам
телекоммуникационных, радиотехнических и радиофизических факультетов вузов.

УДК 621.3.029.62+621.39
ББК 32я431

ISBN 978-966-335-433-0 (тт. 1—9)
ISBN 978-966-335-440-8 (т. 7)

© Оргкомитет КрыМиКо'2017
© НТЦ им. Попова, 2017

Том 6

СЕКЦИЯ 8/1: ГОМОДИННЫЕ И АВТОДИННЫЕ СИСТЕМЫ

8.1	ANALYSIS OF OPERATION OF RFID POSITIONING SYSTEM THAT USES CIRCULARLY POLARIZED MICROWAVE Shirokov I. B., Ablyakimov I. S.	1350
8.2	ИЗМЕРЕНИЕ ПУТЕВОЙ СКОРОСТИ И УГЛА СНОСА ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА ДОПЛЕРОВСКИМ СВЧ ДАТЧИКОМ Хаблов Д. В.	1359
8.3	ИССЛЕДОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ И ИХ СОПОСТАВЛЕНИЕ С РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ НА СВЧ Бомбизов А. А., Артищев С. А., Лошилов А. Г., Малютин Н. Д.	1366
8.4	МИКРОВОЛНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР СИГНАЛОВ С МАЛЫМ ШАГОМ СЕТКИ ЧАСТОТ Широков И. Б., Сердюк И. В.	1375
8.5	ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ АВТОДИННЫХ ПРИЁМОПЕРЕДАТЧИКОВ Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П.	1382
8.6	ФАЗОВЫЕ СООТНОШЕНИЯ АВТОДИННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВНЕШНЕМ ДЕТЕКТИРОВАНИИ Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П.	1389
8.7p	МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЁТА АВТОДИНОВ НА ДИОДАХ ГАННА Носков В. Я., Игнатков К. А., Чупахин А. П.	1396
8.8p	АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДАТЧИКА ВЛАЖНОСТИ ПРИ ПОМОЩИ СЛОИСТЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СТРУКТУР Кузнецова И. Е., Кузнецова А. С.	1403
8.9p	ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ АТМОСФЕРЫ В ТРЕХМЕРНОМ МАССИВЕ ДАННЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ Гусев А. В., Никитин Д. А., Прозоров А. М.	1408
8.11p	АВТОДИННЫЙ ДАТЧИК ДВИЖЕНИЯ БЛИЖНЕГО РАДИУСА ДЕЙСТВИЯ Широков И. Б., Азаров А. А., Кузьмин А. С., Шевченко К. Д.	1412

СЕКЦИЯ 8/2: ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОВОЛНОВОЙ ТЕХНИКИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И МЕДИЦИНЕ

8.12	УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИКИ БРОНХИАЛЬНОЙ АСТМЫ НА ОСНОВЕ МИКРОВОЛНОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ Семерник И. В., Семерник О. Е., Демьяненко А. В., Топалов Ф. С., Лебеденко А. А.	1419
8.13	ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТЬЮ В РЕЗЕРВУАРАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО МЕТОДА Совлуков А. С., Терешин В. И.	1424
8.14	INVESTIGATION OF PROCESSING OF DENSE OILY SLUDGE USING MICROWAVE ENERGY Vedenkin D. A., Sedelnikov Y. E.	*
8.15	РЕЗУЛЬТАТЫ НАЧАЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМУ СВЧ ПИРОЛИЗУ ТОРФА Крапивницкая Т. О., Богдашов А. А., Глявин М. Ю., Ворожцов Д. Л., Калынов Ю. К., Кузиков С. В., Песков Н. Ю., Семенычева Л. Л.	1431

8.16	ТЕРАГЕРЦОВАЯ СИСТЕМА ДВУМЕРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ МАТЕРИАЛОВ Бадьин А. В., Бердюгин А. И., Выговский В. Ю.	*
8.17	ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМУЛЬСНОГО ТОКА НА ПЛАСТИЧЕСКУЮ ДЕФОРМАЦИЮ ОБРАЗЦА Стащенко В. И., Троицкий О. А.	*
8.18p	ПЛАСТЧЕСКАЯ ДЕФОРМАЦИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ДЕЙСТВИИ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ИМПУЛЬСОВ ТОКА Троицкий О. А., Стащенко В. И., Хрущов М. М.	*
8.19p	ИЗМЕНЕНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ ПОСЛЕ СВЧ-ОБЛУЧЕНИЯ Мостовщиков А. В., Ильин А. П., Чумерин П. Ю., Юшков Ю. Г.	1438
8.20p	СФОКУСИРОВАННАЯ ШИРОКОПОЛОСНАЯ СИСТЕМА РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ Веденькин Д. А., Седельников Ю. Е.	*
8.21p	ОТРАЖАТЕЛЬНЫЙ СВЧ-МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ ТО НК ИХ СЛОЕВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО СЫРЬЯ Полевик Н. Д., Панферов С. Ю.	1446
8.22p	ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА БЛИЖНЕПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСНОГО СВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ПРИЛОЖЕНИЙ В МЕДИЦИНСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ Гайкович К. П., Смирнов А. И., Янин Д. В.	1452
8.23p	МИКРОВОЛНЫ ВЫСОКОЙ МОЩНОСТИ ПРОТИВ САРАНЧИ И ДРУГИХ ВРЕДНЫХ ЖИВОТНЫХ Запечалов В. Е.	1459
8.24p	АКУСТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ДЛЯ БЕСКОНТАКТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ БАКТЕРИАЛЬНЫХ КЛЕТОК Бородина И. А., Зайцев Б. Д., Гулий О. И., Теплых А. А.	1466
8.25p	ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ СЕНСОРОВ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ Лысенко И. Е., Ежова О. А.	1473

СЕКЦИЯ 8/3: ФОТОНИКА И РАДИОФОТОНИКА

8.26	ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ ГЕТЕРОДИННОГО РАДИОФОТОННОГО ПРИЕМНОГО КАНАЛА Кулагин В. В., Валуев В. В., Конторов С. М., Прохоров Д. А., Черепенин В. А.	*
8.27	ПЛАЗМОННЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ДИФРАКЦИОННЫЕ РЕШЕТКИ ОПТИЧЕСКОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА Головачева Е. В., Грибникова Е. И., Иванова И. Н., Лерер А. М., Приходько Г. И., Ячменов А. А.	1480
8.28	ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ МНОЖЕСТВА МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ДВУХЧАСТОТНОГО РАСЩЕПЛЕНИЯ Иванов А. А., Морозов О. Г., Бурдин В. А., Дашков М. В.	1487
8.29	ОБОБЩЕННАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОГО ДИАГРАММО- ОБРАЗУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В САПР AWR DESIGN ENVIRONMENT Белкин М. Е., Головин В. В., Тыщук Ю. Н.	1494

8.30	ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИФОТОННЫХ КОМПОНЕНТОВ НА ОСНОВЕ 0,25 МКМ SiGe БИКМОП ТЕХНОЛОГИИ Конкин Д. А. *	
8.31	ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОЙ ЧАСТОТЫ МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА АДДИТИВНОГО ЧАСТОТНОГО СМЕЩЕНИЯ Иванов А. А., Морозов О. Г., Сахабутдинов А. Ж., Денисенко П. Е.	1502
8.32p	ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ ПО ЦИФРОВЫМ ТЕЛЕВИЗИОННЫМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ Михайлюк Ю. П., Начаров Д. В., Тумко В. В.	1509
8.33p	СИСТЕМА БЛОКИРОВКИ КАНАЛОВ СВЯЗИ РАДИОУПРАВЛЯЕМЫХ УСТРОЙСТВ Василевский И. Н., Поляков В. А., Яновский А. В., Антипин Е. А., Ракитянский Ф. А., Дементенко С. А., Дудник К. В.	1516
8.34p	МОДУЛЬ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ДЛЯ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ СИСТЕМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТА Василевский И. Н., Поляков В. А., Бритков А. В., Бородина Г. Н., Яновский А. В., Антипин Е. А.	1522
8.35p	ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НОВОЙ ПОСАДОЧНОЙ РАДИОМАЯЧНОЙ ГРУППЫ ДЛЯ РАДИОМАЯЧНОЙ СИСТЕМЫ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ Ершов Г. А., Мясников С. А., Сеницын Е. А., Фридман Л. Б.	1526
8.36p	МНОГОДИАПАЗОННЫЙ МОБИЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОТРАБОТКИ И ИСПЫТАНИЙ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ АВИАЦИОННОГО БАЗИРОВАНИЯ Кудрявцева Т. А., Лепёхина Т. А., Николаев В. И.	1531
8.37p	АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИМИТАЦИИ И ЗАПИСИ СИГНАЛОВ СУЩЕСТВУЮЩИХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ Алексеев С. Б., Лепёхина Т. А., Николаев В. И., Тарасенко А. М.	1536
8.38p	ИССЛЕДОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОФОТОННОГО УДВОИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ Бирюков В. В., Грачев В. А., Лобин С. Г., Палачев М. А., Раевский А. С.	1541
*	Материалы доклада не поступили в Оргкомитет к моменту формирования сборника и опубликованы в дополнительном 9-м томе при условии их получения Оргкомитетом не позднее 30 сентября 2017 г.	

Modeling of a digital radio channel of the navigational upper-air sounding system

Plokhikh O.V., Gusev A.V., Kudinov S.I.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin

Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

o.v.plohih@urfu.ru, a.v.gusev@urfu.ru, kudinoffs@mail.ru

Abstract: *In the report questions of modelling and development of digital radio channel of Polyus navigational upper-air sounding system are considered. The recommendations about a transmission rate choice, coding and transmitted data structure are made, ways of further enhancement are offered. Tests on lowering of a channel out-of-band emission by GFSK modulation are given.*

Keywords: *upper-air sounding systems, radiosonde, noise immunity, radio channel*

Моделирование цифрового радиоканала навигационной системы радиозондирования атмосферы

Плохих О.В., Гусев А.В., Кудинов С.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б.Н. Ельцина

г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

o.v.plohih@urfu.ru, a.v.gusev@urfu.ru, kudinoffs@mail.ru

Аннотация: *В докладе рассматриваются вопросы моделирования и разработки цифрового радиоканала навигационной системы радиозондирования атмосферы «Полюс». Сделаны рекомендации по выбору скорости передачи, кодированию и структуре передаваемой информации, предложены пути дальнейшего усовершенствования. Приведены результаты испытания по снижению уровня внеполосного излучения канала за счет модуляции с фильтром Гаусса.*

Ключевые слова: *системы радиозондирования атмосферы, радиозонд, помехоустойчивость, радиоканал.*

1. Введение

Наиболее точные результаты определения вертикальных профилей температуры, влажности, скорости и направления ветра, давления воздуха и других параметров обеспечивают системы радиозондирования (СР) определяющие параметры атмосферы путем контактных измерений с помощью аэрологических радиозондов (АРЗ) запускаемых различными методами доставки в свободную атмосферу [1]. В России наибольшее распространение получили СР радиолокационного типа. За рубежом широко применяют навигационные СР, измеряющие координаты и скорость АРЗ по сигналам спутниковой навигационной системы GPS.

В радиолокационных СР радиозонд передает на станцию слежения параметры измерительных датчиков (температуры, влажности, давления), а в навигационных к этой информации добавляется координатная информация. До недавнего времени все СР сети Росгидромета использовали для передачи телеметрических данных АРЗ морально устаревший аналоговый радиоканал, разработанный ещё в 60-х годах. Переход на цифровые технологии передачи данных в РФ впервые был реализован сотрудниками УрФУ в 2009 году в макете навигационной СР «Полюс» [2]. Через несколько лет с целью модернизации действующих радиолокационных СР типа Вектор-М и МАРЛ-А тем же коллективом был разработан и испытан радиозонд МРЗ-ЗМК с цифровой передачей данных.

2. Постановка задачи

В серийных отечественных радиолокационных СР с аналоговым радиоканалом телеметрическая информация в АРЗ формируется в виде частоты видеоимпульсов вторичного измерительного преобразователя (измерительного генератора РС-типа), к которому последовательно подключаются сопротивление опорного (калибровочного) резистора, датчика температуры и датчика влажности. АРЗ передает информацию о метеорологических параметрах атмосферы в течение одного 20 секундного цикла. В течение этого интервала последовательно (по 5 с) передаются измерительные частоты соответствующих каналов: частота опорного (калибровочного) канала и далее частоты телеметрических (измерительных) каналов температуры и влажности.

Для навигационных СР выделен диапазон рабочих частот 400..406 МГц. Перед выпуском АРЗ обычно выбирают, на какую частоту в пределах разрешенного диапазона лучше его настроить с учетом местной помеховой обстановки. Шаг перестройки обычно выбирают около 50..250 кГц.

Оптимальный темп обновления телеметрической информации поступающей по радиоканалу АРЗ-СР определяется динамикой изменения параметров атмосферы по мере подъема (падения) зонда, характеристиками бортовых измерительных устройств и стоимостью аппаратуры. Наиболее критичным с точки зрения стоимости является АРЗ, поскольку это невозвратное устройство. В сети Росгидромета каждая станция выпускает по 2 зонда в сутки. Анализ данных зондирования и мировой опыт показывает, что для измерения температуры и влажности обновление данных 1 раз в секунду достаточно для стандартного зондирования. В навигационных СР координатную информацию желательно получать чаще, чтобы более эффективно фильтровать прецессию радиозонда на фале шара-оболочки [3]. На практике темп выдачи координатной информации ограничен измерительным циклом навигационного модуля, равным 1 с.

В СР «Полюс» период обновления основных данных был выбран равным 2 секунды из-за особенностей работы схемы измерительного преобразователя температуры, а скорости АРЗ – 1 с. Типичная структура пакета и состав передаваемой радиозондом МРЗ-Н1 навигационной СР «Полюс» информации приведены в [4]. В зависимости от конкретной реализации длина передаваемого пакета в обычном режиме находится в диапазоне 50..80 байт (400..640 бит). Таким образом, минимально допустимая скорость передачи по радиоканалу равна 320 бит/с для двухсекундного интервала обновления и 640 для секундного. Дифференциальный режим навигационных измерений требует значительно большего объема передачи, поэтому в аппаратуру разумно заложить некоторый запас в приемную и передающую аппаратуру для возможности программной модернизации аппаратуры.

Рабочая дальность канала от 0 до 250 км. Подразумевается работа в прямой видимости. В прямом зондировании угол места (в направлении АРЗ) на предельной дистанции равен 7 градусам. Мощность передатчика АРЗ ограничивается энергоемкостью батареи питания. Мощность излучения зарубежных аналогов варьируется в диапазоне 60..200 мВт. При разработке СР «Полюс» мощность передатчика МРЗ-Н1 была выбрана равной 100 мВт, не более. Испытания показали, что при такой мощности время работы зонда от батареи питания не менее 5 часов. Этого достаточно для прямого зондирования и при необходимости последующего обратного. Был так же разработан режим плавного увеличения мощности передатчика по мере подъема АРЗ с 10 до 100 мВт.

3. Результаты проектирования радиоканала

Известно, что амплитудная манипуляция (АМ) обладает самой низкой помехоустойчивостью. Вероятность ошибки 10^{-6} для канала с АМ обеспечивается при соотношении сигнал/шум (С/Ш) около 16,5 дБ, для канала с частотной манипуляцией (ЧМ) на 3 дБ ниже, а с фазовой манипуляцией (ФМ) выигрыш составляет почти 6 дБ [5]. Несмотря на очевидное преимущество ФМ в помехоустойчивости, для радиоканала СР «Полюс» была выбрана двоичная ЧМ, поскольку применение ФМ усложняет и удорожает аппаратуру. В перспективе возможен переход на ФМ, при наличии недорогой элементной базы.

Диапазон 400..406 МГц выделен только для метеорологических систем. Благодаря канальной перестройке возможна одновременная работа нескольких СР. К сожалению, в этой полосе иногда появляются сигналы систем неавторизованных для данного диапазона, в том числе и за счет внеполосных излучений. В таких случаях эффективна перестройка АРЗ на свободный от помех рабочий канал. В свободном канале на устойчивость приема сигнала АРЗ влияют флуктуационные помехи и замирания сигналов. Для борьбы с замираниями приходится вносить избыточность в передаваемую информацию. Из-за требования низкой себестоимости вычислительные мощности аппаратуры АРЗ существенно ограничены, поэтому в радиоканале СР «Полюс» избыточность реализуется простым повторением каждого пакета по несколько раз. Время критического падения мощности принимаемого сигнала при замираниях соизмеримо с периодом обновления телеметрической информации, поэтому, чем больше будет повторений за период, тем эффективнее будут использованы паузы между замираниями. Избыточность обеспечивается повышением скорости передачи и расширением полосы частот канала, а значит к уменьшению средней энергии элементарной посылки. В случае некогерентного приема это приводит к снижению отношения С/Ш (для флуктуационной помехи) и, соответственно снижению дальности канала и повышению вероятности ошибки. Повышение скорости передачи так же увеличивает стоимость аппаратуры. Компромиссным значением можно считать 5-10 повторений пакета в течение 1..2 секунды. Итоговая скорость передачи в канале составила 2400 бит/с. Девиация выбрана равной ± 2 кГц, таким образом, эффективна полоса сигнала около 8 кГц.

На рис. 1 показана зависимость частоты битовой ошибки (BER – Bit Error Rate) от отношения С/Ш (E_b/N_0 - отношение средней энергии бита к спектральной плотности помехи) для обычной передачи и с 10-кратным

повторением пакетов в канале с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) по данным моделирования в Matlab с некогерентным энергетическим демодулятором ЧМ. В канале с повторениями итоговый пакет формируется по сумме повторяемых битов. На уровне ошибки 10^{-6} выигрыш от накопления 10 пакетов составил около 7 дБ, но за счет увеличения скорости передачи реальное соотношение С/Ш на входе приемника уменьшится на 10 дБ. В итоге для флуктуационной помехи, без учета замираний, получаем проигрыш около 3 дБ.

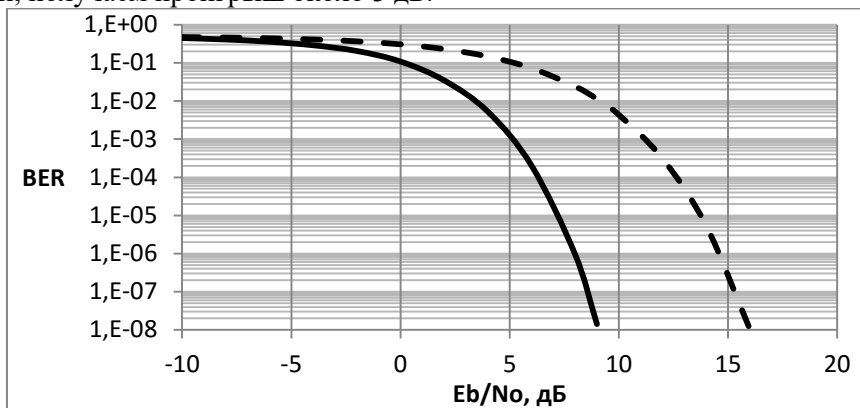


Рис. 1. Частота битовой ошибки для обычной АМ передачи (пунктирная линия) и с 10-кратным повторением пакетов (сплошная линия)

Fig. 1. Bit error rate for usual FSK transmission (dashed line) and for FSK transmission with tenfold repetition (continuous line)

Многочисленные испытания показали хорошую работоспособность разработанного канала. Дальнейшим направлением улучшения устойчивости приема может быть применение помехоустойчивого кодирования. В этой работе исследовались не двоичные циклические коды Рида-Соломона (РС), особенно эффективные в борьбе с импульсными помехами [6]. Замиранья, так же как и импульсные помехи, искажают последовательность смежных битов сообщения. В пакете Matlab были промоделированы каналы АБГШ с кодами РС разной длины и степени кодирования. На рис. 2 показаны вероятности ошибок кодов РС длиной 63 6-разрядных символов с разной степенью кодирования, равной отношению количества информационных символов к общей длине кода. Несмотря на то, что код РС большей избыточностью (кривая 1) кажется более предпочтительным, из-за зависимости ширины полосы сигнала от скорости передачи в канале АБГШ при прочих равных оптимальным является код со степенью коди-

рования в диапазоне 0,6..0,7. Для каналов с замираниями этот оптимум смещается в сторону большей избыточности. Например, для канала с райсовским замиранием и отношением мощностей прямого и отраженного сигнала 7 дБ оптимальное значение около 0,5 [6].

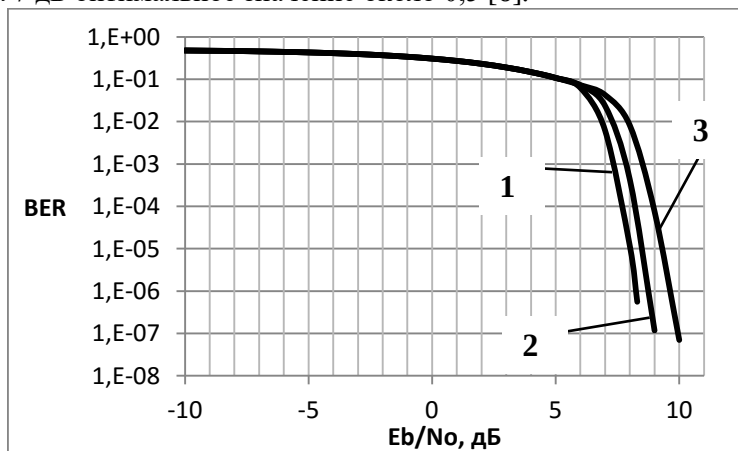


Рис. 2. Частота битовой ошибки для кодов Рида-Соломона длиной 63 символа и степенью кодирования: 0.4 (кривая 1), 0.5 (кривая 2) и 0.7 (кривая 3)

Fig. 2. Bit error rate for Reed-Solomon codes with 63 symbol length and coding ratio equal to 0.4 (curve 1), 0.5 (curve 2) and 0.7 (curve 3)

Для снижения уровня внеполосных излучений в передатчиках применяют ЧМ с использованием фильтра Гаусса для сглаживания частотных перестроек (модуляция GFSK). На базе передатчика AP3 MP3-H1 была выполнена экспериментальная оценка эффективности модуляции GFSK в канале СР «Полус». Опыт показал, что передатчик на микросхеме ADF7012 (Analog Device) с 128-ступенчатой частотной перестройкой позволяет снизить уровень внеполосного излучения на 12-15 дБ по сравнению с аналогичным, но с обычной перестройкой частоты.

5. Заключение

В настоящее время СР «Полус» успешно эксплуатируется в различных регионах РФ. В условия эксплуатации получены дальности устойчивого зондирования до 240 км. Дальнейшие усовершенствования радиоканала системы целесообразно проводить в направлении снижения внеполосных излучений, применения помехоустойчивых кодов типа Рида-Соломона и перехода на фазовую манипуляцию.

Список литературы

- [1] Иванов В.Э., Гусев А.В., Игнатков К.А., Кудинов С.И., Малыгин И.В., Носков В.Я., Плохих О.В., Рысев В.В., Черных О.А. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2015. № 9. С. 3–49.
- [2] Плохих О.В., Иванов В.Э. Некоторые результаты разработки системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных платформ GPS-ГЛОНАСС. // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. Санкт-Петербург: 2009, вып. 6 (тематический выпуск «Широкополосные сигналы и системы»). С. 66–74.
- [3] Плохих О.В. Повышение эффективности оценки скорости ветра в системах радиозондирования атмосферы // 25-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015), Севастополь, 6–12 сентября 2015 г.: Матер. конф. в 2 т. Севастополь, 2015. С. 1194–1195.
- [4] Ширшов Н.В., Плохих О.В., Черных О.А., Иванов В.Э., Сурков Д.В. Структурная схема, тактико-технические характеристики и основные особенности функционирования навигационной системы радиозондирования атмосферы «Полус» / Под общ. ред. С.С. Суворова // *Труды II Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды»*. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2012. Т.1. С. 136–142.
- [5] Каганов В.И., Битюков В.К. Основы радиоэлектроники и связи: Учебное пособие для вузов. М: Горячая линия – Телеком, 2006. 542 с.
- [6] Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2, испр.: Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

References

- [1] Ivanov V.E., Gusev A.V., Ignatkov K.A., Kudinov S.I., Malyigin I.V., Noskov V.Ya., Plohih O.V., Ryisev V.V., Chernyih O.A. [Current Status and Development Prospects of Atmosphere Radio Sensing Systems in Russia]. *Uspehi sovremennoy radioelektroniki [Successes of modern electronic engineering]*, 2013, no. 9, pp. 3–49. (In Russian).
- [2] Plokhikh O. V., Ivanov V. E. [Some results of development of the upper-air sounding system based on the satellite navigation GPS-GLONASS platforms]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika (tematicheskij vypusk «Shirokopolosnye signaly i sistemy»)*. Sankt-Peterburg: 2009, vol. 6, pp. 66–74. (In Russian).
- [3] Plokhikh O. V. Efficiency increase of the wind velocity estimation in the upper-air sounding systems. 25th Int. Crimean Conf. “Microwave & Telecommunication Technology” (CriMiCo'2015). Sevastopol, 2015, pp. 1194–1195. (In Russian).
- [4] Shirshov N.V., Plokhikh O.V., Chernykh O.A., Ivanov V.E., Surkov D.V. [Block diagram, performance characteristics and main operation features of Polyus navigational upper-air sounding system] (ed. by S.S. Suvorov). *Trudy II Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy»*. SPb.: VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2012, vol. 1, p.p. 136–142. (In Russian).
- [5] Kaganov V.I., Bitjukov V.K. [Fundamentals of radio electronics and communication: Manual for higher education institutions]. M: Goryachaya liniya – Telekom, 2006. 542 c. (In Russian).
- [6] Sklyar B. *Digital communications. Fundamentals and Applications*. Second edition: trans. from English. M.: Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2003, 1104 p. (In Russian).

Radar image shift compensation in remote sensing SAR

Petrov Yu.V., Rogozhin V.A., Anikin S.N., Kulikov E.A.
Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov,
1-St Krasnoarmeyskaya St. 1, Saint Petersburg, 198005, Russia
petrov@gti.ru

Abstract: This paper proposes an approach to estimate the navigation error of the aircraft's speed from the shift of the radar image. The analysis of the proposed technique shows that it allows achieving 3-5 cm/s accuracy in the speed estimation of the SAR platform. The accuracy of the speed projection error estimation is mainly affected by the error in determining the gravity center of the image.

Keywords: Radar image, synthetic aperture radar (SAR), navigation error, phase distortion, surface survey.

Компенсация сдвига радиолокационных изображений в РСА ДЗЗ

Петров Ю.В., Рогожин В.А., Аникин С.Н., Куликов Е.А.
Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова
ул. 1-ая Красноармейская, 1, Санкт-Петербург, 198005, Россия
petrov@gti.ru

Аннотация: Рассмотрен метод оценки навигационных ошибок измерения скорости летательного аппарата (ЛА) по сдвигу радиолокационного изображения. Приведены результаты исследований, которые показывают, что точность оценивания скорости носителя РСА может быть не хуже 3-5 см/с. Основным фактором, влияющим на точность определения поправки проекции скорости, является ошибка определения усредненного центра тяжести изображения.

Ключевые слова: радиолокационные изображения, РЛС с синтезированной апертурой, навигационные ошибки, фазовые искажения, обзор поверхности.

1. Введение

Современные авиационные радиолокационные станции (РЛС) с цифровым синтезированием искусственной апертуры антенны (РСА) поз-

воляют получать радиолокационные изображения (РЛИ) земной поверхности с высоким и сверхвысоким разрешением (один метр и менее) на больших дальностях (более ста км) при произвольной траектории полета носителя и практически любых погодных условиях [1,2]. При этом одним из основных источников снижения разрешающей способности РСА являются искажения траекторного сигнала, обусловленные различными дестабилизирующими факторами. К ним относятся неустойчивости движения ЛА, среды распространения радиоволн, аппаратные ошибки, ограничение динамического диапазона приемника, флуктуации при переотражениях облучаемых объектов, ошибки измерения навигационных параметров.

Амплитудные искажения траекторного сигнала обусловлены, в основном, ошибками стабилизации диаграммы направленности антенны и изменением эффективной площади рассеяния цели за время синтеза. Они носят медленный характер, и их влияние эквивалентно изменению весовой функции системы обработки. Обычно амплитудные флуктуации траекторного сигнала за время синтеза невелики и их влиянием можно пренебречь.

К фазовым искажениям траекторного сигнала, в основном, приводят неустойчивости распространения радиоволн, приемеопередающего тракта и систем обработки, а также движения ЛА. Анализ их влияния показал, что существенный вклад в суммарную фазовую ошибку вносят траекторные неустойчивости и ошибки измерений навигационных параметров [3,4].

Ошибки измерения радиальной скорости приводят к линейному набегу фазы траекторного сигнала, и вызывают сдвиг изображения по азимуту, что, в свою очередь, ведет к ошибкам определения координат целей и ошибкам совмещения парциальных кадров при построении РЛИ больших размеров (причем, чем выше потенциальные характеристики РСА, тем влияние этих ошибок на ее реальные характеристики сильнее) (рис.1). Ошибки измерения радиального ускорения приводят к квадратичному набегу фазы, и расфокусировке РЛИ (снижению разрешающей способности РСА), ошибки оценки радиального ускорения, как правило, незначительны и их влиянием можно пренебречь.

Для обеспечения высокого разрешения при обзоре земной поверхности необходимо увеличивать точность измерения навигационных параметров на порядок и более. В некоторых случаях максимально допустимые ошибки измерения радиальной скорости на интервале синтеза должны быть менее 1-2 см/с [5]. К сожалению, точность определения скорости современными навигационными комплексами ограничивает потенциальные возможности РСА.



Рис. 1. Влияние ошибок измерения радиальной скорости при совмещении парциальных кадров радиолокационного изображения большого размера
 Fig. 1. The effect of the errors in radial speed measurement when the partial frames of a large radar image are merged

2. Метод оценки навигационных ошибок

В работе [6] предложен метод оценки навигационных ошибок, основанный на геометрическом критерии - смещении оценки функции отражающей поверхности (ФОП), формируемой на борту носителя РСА в реальном времени. Метод предполагает определение поправки к проекции скорости ЛА на направление обзора которая определяется штатными навигационными средствами. Метод основан на следующих предположениях:

- ошибка измерения скорости носителя РСА постоянна на интервале синтеза искусственной апертуры антенны (что характерно для инерциальных навигационных систем) и ее наличие вызывает сдвиг оценки ФОП по азимуту;
- при отсутствии ошибки измерения скорости центр тяжести оценки ФОП находится в середине интервала оценки;

• величина и знак сдвига оценки ФОП пропорциональны проекции ошибки определения скорости на направление обзора [6]:

$$\delta W_{Iy} = \delta x_0 \cdot W_{Ix} / R = \Delta I_Q \cdot \Delta x_0 \cdot W_{Ix} / R, \quad (1)$$

где: δx_0 – смещение изображения по азимуту, м; W_{Ix} – проекция вектора скорости на ось, перпендикулярную направлению обзора подстилающей поверхности и лежащую в плоскости изображения, м/с; R – проекция радиус-вектора текущего положения фазового центра антенны на ось, совпадающую с направлением обзора подстилающей поверхности, м; ΔI_Q – смещение изображения по азимуту в дискретах изображения; Δx_0 – разрешение по азимуту.

Центр тяжести каждой полосы дальности формируемого РЛИ определяется соотношением:

$$I_Q = \sum_{n=1}^{N_A} f_Q(n) \cdot n / \sum_{n=1}^{N_A} f_Q(n), \quad (2)$$

где N_A – число отсчетов по азимуту в массиве изображения (число столбцов); I_Q – центр тяжести Q -й полосы дальности; Q – номер полосы дальности; f_Q – массив оценок ФОП.

Смещение изображения по азимуту оценивается по сдвигу усредненного по всем полосам дальности центра тяжести относительно середины массива оценок ФОП.

3. Потенциальные точностные характеристики метода

Основным фактором, влияющим на точность определения поправки проекции скорости на направление обзора, является ошибка определения усредненного центра тяжести изображения.

Потенциально относительная ошибка измерения скорости может быть определена с высокой точностью:

$$\delta W_{Iy} / W_{Ix} = \Delta I_Q \cdot \Delta x_0 / R \quad (3)$$

Например, при $\Delta x_0 = 10$ м и $R = 10$ км, сдвиг в один дискрет изображения соответствует относительной ошибке 10^{-3} .

Из этого выражения следует, что для уменьшения ошибки определения поправки проекции скорости носителя на направление обзора надо обеспечивать малый дискрет оценки ФОП по азимуту на больших дальностях (синтезирование с высоким или сверхвысоким разрешением) и повышать точность определения сдвига центра тяжести оценки ФОП.

4. Точность определения сдвига центра тяжести оценки ФОП

Точность определения сдвига центра тяжести оценки ФОП зависит от размеров окна оценивания, закона распределения и корреляционно-спектральных свойств случайных отсчетов оценки ФОП.

Исходя из выражения (2), для повышения точности необходимо уменьшать размер окна оценки ФОП по азимуту и увеличивать число полосок дальности. Для примера в таблице 1 приведены результаты исследования влияния размера окна оценки ФОП на точность определения ее центра тяжести (первое значение размера оценки ФОП – размер по азимуту).

Табл. 1. Результаты исследования влияния размера оценки ФОП на точность определения ее центра тяжести.

Table. 1. The analysis of the reflectivity function estimation influence on the accuracy of determining its gravity center

Размер оценки ФОП	Расчетное значение среднеквадратического отклонения центра тяжести оценки ФОП	Расчетное значение среднеквадратического отклонения ошибки определения скорости (при $W_{Пх} = 200$ м/с, $R=10$ км, $\Delta x_0 = 10$ м), м/с
128*128	0.151	0.030
128*64	0.213	0.043
64*128	0.107	0.021

При наличии пространственной корреляции дискретных отсчетов оценки ФОП ошибка оценки его центра тяжести, а, следовательно, и ошибка определения поправки проекции скорости, увеличивается. Так, например, если коэффициент пространственной корреляции равен 0.7, а размеры массива оценок ФОП 128 на 512 значений, то величина среднеквадратического отклонения (СКО) ошибки оценки центра тяжести равна 0.4 дискрета. При увеличении коэффициента пространственной корреляции до 0.9 (что соответствует, например, спокойной водной поверхности) величина СКО ошибки увеличивается более чем в два раза.

Анализ влияния закона распределения случайных отсчетов оценки ФОП показал, что в случае, если они подчиняются закону распределения Релея-Райса или нормальному, то среднеквадратическое отклонение ошибки определения ее центра тяжести уменьшается по сравнению со случаем распределения оценки ФОП по закону Релея. Если дискретные отсчеты оценки ФОП подчиняются логарифмически-нормальному закону, что характерно для морских поверхностей, то среднеквадратическое от-

клонение ошибки определения ее центра тяжести увеличивается по сравнению с релейским случаем более чем в два раза.

С целью определения точностных характеристик метода при различных направлениях обзора, дальностях и статистических характеристиках оценки ФОП был выполнен ряд исследований [7-9].

5. Заключение

В результате исследований разработанного метода оценки навигационных ошибок установлено, что основным фактором, влияющим на его точность, является ошибка определения центра тяжести оценки ФОП. Эта ошибка в свою очередь существенно зависит от величины дискрета оценки ФОП, размеров окна оценки ФОП, характера подстилающей поверхности и других факторов. При этом проведенный анализ позволяет сделать вывод о работоспособности предложенного метода определения поправки скорости, а так же о том, что точность определения скорости носителя рассматриваемым методом может быть не хуже 3-5 см/с. Такие точностные характеристики превосходят возможности существующих авиационных навигационных систем и позволяют повысить эффективность использования бортовых РСА.

Список литературы

- [1] Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. Учебное пособие для вузов / Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю.; под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: «Радиотехника», 2005. – 368с.
- [2] Справочник по радиолокации / Под. ред. М.И. Сколника. Пер. с англ. Под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Москва: Техносфера, 2014. – 672с.
- [3] Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин [и др.] ; под. ред. В. Т. Горяинова. – М.: Радио и связь, 1988. – 304 с.
- [4] Петров Ю.В., Бызов А.Н., Петров Н.Ю., Юхно С.А. Анализ влияния дестабилизирующих факторов на искажения траекторных сигналов в бортовом радиолокаторе высокого разрешения // Вестник Воронежского государственного университета, серия «Системный анализ и информационные технологии», № 1, 2015.-152 с. – с.67-75.
- [5] Рогожин В.А. Оценка допустимых величин ошибок определения проекции скорости ЛА при синтезировании апертуры антенны. // Актуальные вопросы ракетно-космической техники и технологий: Сб. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ. Вып. 4 / Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2006.
- [6] Муш Б. С., Рогожин В. А. Определение поправки проекции скорости летательного аппарата по оценке функции отражающей поверхности // III международный симпозиум «Аэрокосмические приборные технологии», 2-4 июня, 2004 г.: сб. материалов. – СПб, 2004.– С. 33–36.

[7] Vasilii A. Rogozhin. The definition of correction of aircraft velocity projection by the function of reflecting surface estimate displacement // XI International Scientific – Research Conference “Radiolocation Navigation Communications”, NPF “SAKVOEE”, 2005, Voronezh. – с. 35–42.

[8] Рогожин В. А., Петров Ю. В., Стукалова А. С. Статистические характеристики одного из параметров оценки функции отражающей поверхности бортового радиолокатора // Актуальные вопросы управления в организационно-технических системах : сб. трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых БГТУ / под общ. ред. С. М. Стажкова. – СПб: БГТУ, 2005. – Вып.3. – С. 65–67.

[9] Петров Ю.В., Рогожин В.А., Максимов С.Д. Измерение скорости движения носителя в радиолокаторе с синтезированной апертурой // Радиоэлектронные комплексы многоцелевого назначения: сборник научных трудов. Юбилейный выпуск. 1991-2011/ ОАО «Радиоавионика». – СПб: Изд-во Политехнического университета, 2011.

References

[1] Radiovidenie. Radar systems remote sensing of the Earth. / G. S. Kondratenkov, A. Y. Frolov; edited by G. S. Kondratenkov. – Moscow: "Radio", 2005. – 368p, *in Russian*.

[2] Radar handbook / Edited by M. I. SKOLNIK. Trans. from English. Edited by V. S. Verba. In 2 books. Moscow: Tekhnosfera, 2014. – 672p, *in Russian*.

[3] Radars with digital synthetic aperture antenna / V. N. Antipov, V. T. Goryainov, A. N. Cooking. [et al.] ; edited by V. T. Goryainov. – Moscow: Radio and communication, 1988. – 304 p, *in Russian*.

[4] Petrov, Yu. V., Byzov A. N., Petrov N. Yu., Yukhno S. A. Analysis of the destabilizing factor influence on distortion of trajectory signals in the on-board high resolution radar // Bulletin of Voronezh state University, series "System analysis and information technologies", № 1, 2015.-152 p. – p. 67-75, *in Russian*.

[5] Rogozhin, V. A. Estimating the permissible errors in determining the projection of the aircraft speed during the antenna aperture synthesis. // Actual problems of rocket-space engineering and technology: Coll. works of students, postgraduates and young scientists BSTU. Vol. 4 / Balt. GOS. tehn. Univ. of Illinois St. Petersburg, 2006, *in Russian*.

[6] Mush B. S., Rogozhin V. A. Evaluation of the aircraft speed projection correction by the function of the reflecting surface // III international Symposium "Aerospace instrument technology", June 2-4, 2004: proceedings of. – Saint-Petersburg, 2004– P. 33-36, *in Russian*.

[7] Vasilii A. Rogozhin. Correction of The definition of aircraft velocity projection by the function of reflecting surface estimate displacement // XI International Scientific – Research conference “Radiolocation Navigation Communications”, NPF “SAKVOEE”, 2005, Voronezh. – P. 35–42.

[8] Rogozhin, V. A., Petrov Yu. V., Stukalova, A. S. Statistical characteristics of a parameter in the evaluation function of the reflecting surface with an airborne radar // Actual problems of management in organizational-technical systems : a collection of works of students, undergraduates, postgraduates and young scientists of the University under the General editorship of S. M. Experience-the Cove. – Sph.: BGTU, 2005. – Vol.3. – P. 65-67, *in Russian*.

[9] Petrov Yu. V. Rogozhin, V. A., Maksimov S. D. Measurement of platform speed with a synthetic aperture radar // Radio-Electronic systems multi-purpose: collection of scientific works. Anniversary edition. 1991-2011/ JSC "Radioavionika." – SPb.: Publishing house of Polytechnic University, 2011, *in Russian*.

The ray method of quasi-t-waves at GPR-surveys

¹ Fedorov V. N., ² Fedorova L. L., ³ Prudetsky N. D.

¹North-Eastern federal university of M.K. Ammosov
Yakutsk, 677000, Russian Federation
fvnsvfu@mail.ru

² Mining Institute of the North SB RAS
Yakutsk, 677000, Russian Federation
lar-fed-90@rambler.ru

Abstract: An algorithm for modeling radargrams of a pulsed georadar based on a ray model of the diffraction theory of propagation of Gaussian beams in a quasi-optical approximation is described using the ABCD matrix rule. Paraxial rays are electromagnetic quasi-T-waves. It is shown that the ray model correctly describes the propagation of signals from georadar locators in heterogeneous dispersive rocks, in particular, in frozen sand with ice lenses.

Keywords: ABCD matrix, matrix of transfer, Maxwell's equation, quasi-T-wave, Ground-penetrating radar (GPR), radargramm, dispersion, losses.

Лучевой метод квази-Т-волн при гео-радиолокационных исследованиях

¹Федоров В.Н., ²Федорова Л.Л., ³Прудецкий Н.Д.

¹Северо-восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова
г. Якутск, 677000, Российская Федерация
fvnsvfu@mail.ru

² Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского
г. Якутск, 677000, Российская Федерация
lar-fed-90@rambler.ru

Аннотация: Описывается алгоритм моделирования радарограмм импульсного георадиолокатора на основе лучевой модели дифракционной теории распространения гауссовых пучков в квазиоптическом приближении с помощью матричного правила ABCD. Параксиальные лучи являются электромагнитными квази-Т волнами. Лучевая модель правильно описывает распространение сигналов георадиолокаторов в неоднородных дисперсионных горных породах, в частности, в мерзлом песке с линзами льда.

Ключевые слова: ABCD-матрица, матрица передачи, уравнения Максвелла, квази-Т-волны, георадиолокация, радарограмма, дисперсия, потери.

1. Введение

Совершенствование радиотехнических систем и устройств СВЧ требует развития методов их математического моделирования. Актуальна разработка методов решения обратных задач электродинамики, необходимых для создания аппаратуры идентификации скрытых объектов, а также для создания систем радиовидения.

Наиболее широкое распространение получили методы, основанные на решении уравнений Максвелла, такие как FDTD, TLM и другие [1,2]. Их основной недостаток – использование рекурсивных методов расчета и поэтому потребность в больших машинных ресурсах памяти и быстродействия. Квазиоптические методы расчета, такие, как однородная теория дифракции (UTD), метод лучей (геометрическая оптика) и некоторые другие методы, также нашли достаточно широкое применение [3,4]. Они менее трудоемки, но менее точны.

Принципы, лежащие в основе лучевой модели. Метод матрицы линий передачи (TLM) был предложен в 1971 г. Джонсом и Берле для решения двумерных задач электродинамики [2]. В отличие от методов, основу которых составляют уравнения Максвелла, метод TLM базируется на принципе Гюйгенса, согласно которому огибающая фронтов волн образует новый волновой фронт, на котором также расположены вторичные источники. Таким образом реализуется концепция близкодействия. Если пренебречь длиной волны, то распространение ЭМВ можно описывать с помощью отдельных лучей, а не на языке волновых фронтов. Геометрический луч на языке векторов можно рассматривать как вектор Пойнтинга электромагнитного поля. Рассматриваются только параксиальные лучи, — лучи, которые при своем распространении остаются близкими к ее оси симметрии и почти параллельными ей. Поэтому они близки к электромагнитным квази-Т-волнам. Тогда можно, как в работе [5], ввести ABCD-матрицы передачи для расчета сигналов.

2. Лучевая модель

Излучаемые антенным блоком (АБ) георадиолокатора (ГРЛ) электромагнитные волны (ЭМВ) формируют диаграмму направленности, приведенную на рис.1 (пунктирная линия). Из рис.1 видно, что более 90% энергии излучаемых ЭМВ сосредоточены в секторе 150^0 - 210^0 . Поэтому

можно ограничиться этим сектором и представить падающие ЭМВ в виде суммы параксиальных лучей, лежащих в этом секторе, так, как это показано на рис.2. Амплитуда преломленных и отраженных волн, распространяющиеся в других направлениях лучами, мала, по сравнению с отраженными в прямом и обратном направлениях лучами, совпадающими с трассами, попадающими в АБ. Поэтому ими можно пренебречь. Трассы сигналов образуют параксиальные сигналы [5].

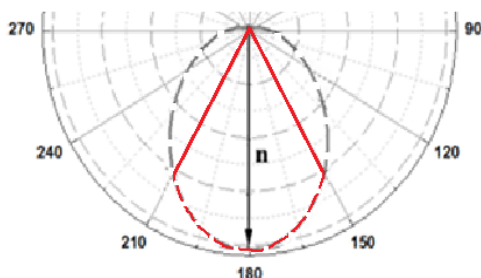


Рис. 1. Диаграммы направленности антенного блока АБ-1200 (пунктирная линия) и лучевой модели (сплошная линия)

Георадиолокатор перемещается с заданным шагом Δx . На каждом шаге компьютер определяет координаты X и Y точек пересечения каждой трассы и слоев разных пород, вычисляет длину участков.

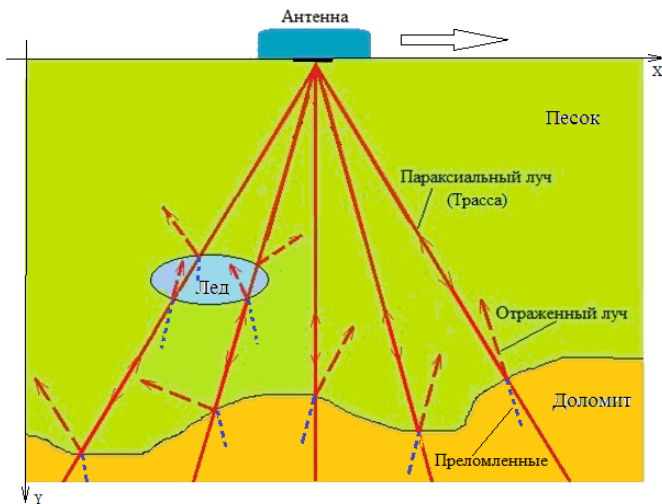


Рис. 2. Лучевая модель с трассами сигналов

Трассы состоят из участков с разными электрофизическими параметрами. Длина участков определяется по законам геометрической оптики. Количество трасс зависит от заданной точности и составляет 12...60, т.е., идут с шагом от 5 до 1 градуса.

Используя модель распространения георадиолокационных сигналов в геологических средах, на основе метода ABCD-матриц [6], рассчитываются трассы сигналов, их временные и частотные характеристики и формируют из них радарограмму.

В качестве модели был рассмотрен случай ледяной линзы в мерзлом песке. На рис. 3 приведена радарограмма лучевой модели, амплитудно-частотные и временные характеристики трасс сигналов ГРЛ АБ-1200 в точках $x=3,62\text{м}$ (ледяная линза) и $x=6,62\text{м}$ (мерзлый песок).

3. Экспериментальные результаты

Результаты математического моделирования горного массива с трещиной заполненной льдом были подтверждены физическим моделированием. Как видно по рисунку 4 георадиолокационные сигналы от нижней границы льда становятся более низкочастотными, чем от верхней границы.

Спектральные характеристики георадиолокационных трасс, полученных при зондировании песка, имеют относительно гладкую форму, а трассы полученные в месте расположения льда имеют довольно изрезанный спектр. Эта особенность объясняется суммированием спектров георадиолокационных сигналов, дифрагированных на поверхности льда, т.к. диаграмма направленности георадара шире льда, то различные частотные составляющие зондирующего сигнала по-разному распространяются в модели горного массива. Более низкие частоты или огибают лед, или отражаются от него сложным образом. Эта особенность спектральных характеристик может, служит критерием выявления трещины заполненной льдом.

4. Заключение

Показано, что лучевая модель хорошо описывает распространение сигналов ГРЛ в неоднородных дисперсионных горных породах. Она, в частности, правильно описывает трещины, заполненные льдом, в мерзлом песке и позволяет определить следующий алгоритм обработки данных георадиолокации:

- выявить оси синфазности георадиолокационных сигналов, отраженных от верхней и нижней (гиперболической) границ горных пород, заполняющих трещину;

- определить характер огибающей Фурье-спектра георадиолокационной трассы;
- уточнить ширину трещины по установленным зависимостям ширины от мощности отсыпки и значениям амплитуд георадиолокационных сигналов.

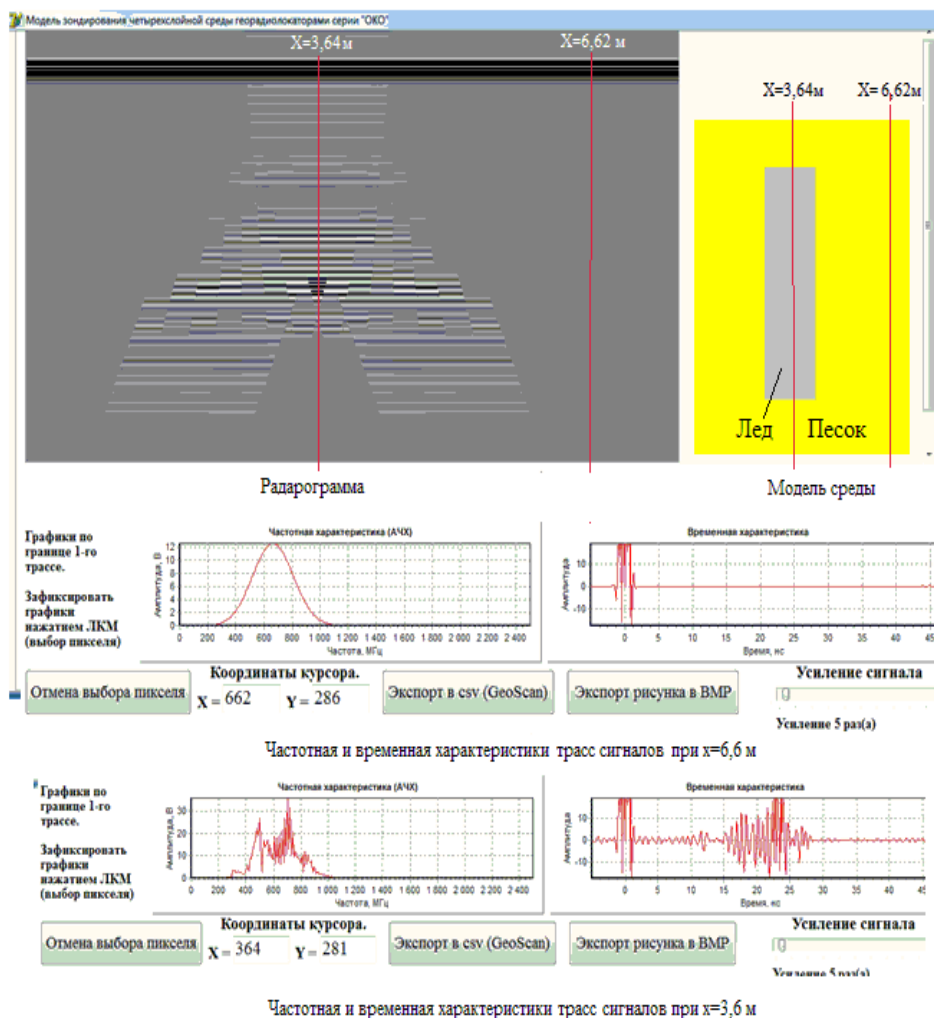


Рис. 3. Рассчитанная радарограмма лучевой модели с АЧХ и ВХ сигнала АБ-1200 в точках $x=3,62$ м (ледяная линза) и $x=6,62$ м (мерзлый песок)

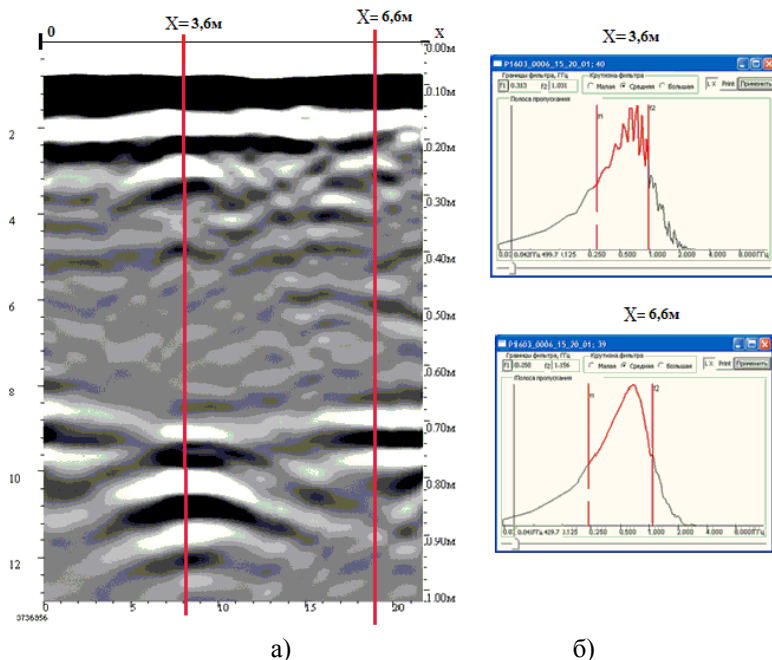


Рис. 4. Экспериментальные измерения среды: а) радарограмма АБ-1200; б) АЧХ трасс в точках $x=3,6$ м и $x=6,6$ м

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект №15-45-05119).

Список литературы

- [1] K. S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Prop.*, vol. AP-14, pp. 302-307, May 1966
- [2] Johns P. B., Beurle R. L. Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix // *Proc. IEE.*— 1971.— Vol. 118, no. 9.— Pp. 1203-1208.
- [3] Russer P. *Electromagnetics, microwave circuit and antenna design for communications engineering* / Ed. by C. F. Balanis.— N.-Y.: Morgan and Claypool, 2006.— 123 pp.
- [4] V. Galdi et al., "Moderately rough surface underground imaging via short-pulse quasi-ray Gaussian beams," submitted to *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Oct. 2001.
- [5] Kogelnik H., On the propagation of Gaussian beams of light through lenslike media including those with a loss or gain variation, *Appl. Opt.* 4, 1562, (1965)
- [6] Федоров В.Н., Федорова Л.Л. Электродинамическое моделирование россыпных месторождения при георадиолокации / X Всероссийская конф. «Радиолокация и радиосвязь». Сб. трудов. -Москва, ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. -21-23 ноября 2016 г. - с. 85-89 с.

References

- [1] K. S. Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. *IEEE Trans. Antennas Prop.*, vol. AP-14, pp. 302-307, May 1966
- [2] *Johns P.B., Beurle R. L.* Numerical solution of 2-dimensional scattering problems using a transmission-line matrix // *Proc. IEE.*— 1971.— Vol. 118, no. 9.— Pp. 1203–1208.
- [3] *Russer P.* Electromagnetics, microwave circuit and antenna design for communications engineering / Ed. by C. F. Balanis.— N.-Y.: Morgan and Claypool, 2006.— 123 pp.
- [4] V. Galdi *et al.*, "Moderately rough surface underground imaging via short-pulse quasi-ray Gaussian beams," submitted to *IEEE Tmns. Antennas Propogat.*, Oct. 2001.
- [5] Kogelnik H., On the propagation of Gaussian beams of light through lenslike media including those with a loss or gain variation, *Appl. Opt.* 4, 1562, (1965)
- [6] Fedorov V.N., Fedorova L.L. Jelektrodinamicheskoe modelirovanie rossypanyh mes-torozhdenija pri georadiolokacii / H Vserossijskaja konf. «Radiolokacija i radio-svjaz». Sb. trudov.-Moskva, IRJe im. V.A. Kotelnikova RAN.-21-23 nojabrja 2016 g.- s. 85-89

Acknowledgements

The paper is based on the research results, which was conducted in the framework of project of the Russian Foundation for Basic Research №15-45-05119.

Prolonged flash in blazar 3C454.3 in 2013-2017

¹Volvach A.E., ²Larionov M.G., ¹Volvach L.N., ²Larionov G. M.

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
RAS, Yalta, Crimea

² Astro Space Center, P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, 117997 Russia
volvach@bk.ru

Abstract: The data of prolonged multifrequency monitoring of the active core of the galaxy (AGN) of Blazar 3C 454.3 are analyzed. The anomalously prolonged outbreak that occurred in the facility in 2013-2017 is twice as long as the possible orbital period of the rotation of the supermassive black hole (SMBH) companion located in the center of the parent galaxy. Based on the interpretation of the complex of observational data 3C 454.3, the shape and duration of the last outbreak can be determined by the coincidence of the planes of the accretion disk and the orbit of the companion of the SMBH.

Keywords: blazar, radio sources, black hole.

Длительная вспышка в блазаре 3C454.3 в 2013-2017 гг.

¹Вольвач А.Е., ²Ларионов М.Г., ¹Вольвач Л.Н., ²Ларионов Г.М.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики, ФГБУН «Крымская Астрофизическая
Обсерватория РАН», Ялта, Крым

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва
volvach@bk.ru

Аннотация: Выполнен анализ данных длительного многочастотного мониторинга активного ядра галактики (АЯГ) блазара 3C 454.3. Аномально длительная вспышка, произошедшая в объекте в 2013-2017 гг., вдвое превышает продолжительность возможного орбитального периода вращения компаньона сверхмассивной черной дыры (СМЧД), расположенной в центре материнской галактики. На основе интерпретации комплекса наблюдательных данных 3C 454.3 форма и продолжительность последней вспышки может определяться совпадением плоскостей аккреционного диска (АД) и орбиты компаньона СМЧД

Ключевые слова: блазары, радиоисточники, черные дыры

1. Введение

Нестационарные внегалактические источники (АЯГ) в коротковолновом участке сантиметрового и в миллиметровом диапазонах длин волн составляют заметную долю от всех радиоизлучающих объектов. В подавляющем большинстве на этих длинах волн это сильно переменные источники. Долговременный многочастотный мониторинг на одиночных радиотелескопах является независимым способом исследования внутренней, субпарсековой структуры источников, недоступной даже для глобальной интерферометрии. Эти исследования служат важным дополнением к существующим РСДБ методам изучения АЯГ. Многочастотные долговременные исследования блазаров поставляют важную информацию о физических процессах, ответственных за излучение во всех спектральных интервалах, от радио- до гамма- диапазона. Как представитель семейства квазаров с плоскими спектрами 3C454.3 многие десятилетия исследовался на многих частотах электромагнитного спектра.

Данные длительного мониторинга плотности потока блазара на миллиметровых длинах волн обнаруживают 13-летний период, который прослеживается, начиная с 1968 года. Максимумы плотностей потоков излучения фиксировались в 1982, 1996, 2010 гг. При этом, амплитуда вспышек росла со временем от 15 Ян в 1982 г. до 20-25 Ян в 2010 г. Этот период поставлен в соответствие прецессионному периоду ($T_{\text{пр}}$) в рамках модели двойной системы из сверхмассивных черных дыр (ДСЧД) [1]. Также определены параметры ДСЧД и вид задержек появления вспышечных явлений между различными частотами радиодиапазона.

Целью работы является анализ связи развития вспышечного явления в источнике 3C454.3, имевшего место в 2013-2017 гг. В данной работе анализируются новые данные, полученные во время детального мониторинга продолжительной вспышки в 3C 454.3 на миллиметровых волнах.

2. Наблюдения

2.1. Наблюдения в радиодиапазоне.

Наблюдения на частотах 22.2 и 36.8 ГГц проводились с помощью 22-метрового радиотелескопа (РТ-22) Крымской астрофизической обсерватории при помощи модуляционных радиометров. Антенная температура от источников измерялась известным методом “ON-ON”. Перед измерением интенсивности излучения положение источника уточнялось сканированием по прямому восхождению и склонению. Затем радиотелескоп устанавливался на источник поочередно одним и другим лепестками диаграмм

направленности, формирующимися при диаграммной модуляции и имеющими взаимно-ортогональные поляризации. Антенная температура от источника определялась как разность между усредненными в течение 30 секунд откликами радиометра в двух различных положениях антенны. В зависимости от интенсивности излучения источника, проводились серии из 6-20 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала, и оценивалась среднеквадратичная ошибка среднего. Ортогональная поляризация лепестков позволяла измерять полную интенсивность излучения от источника независимо от поляризации этого излучения. Поглощение излучения в атмосфере Земли учитывалось методом «разрезов атмосферы», производившихся через 3-4 часа.

При этом использовалась методики наблюдений, при которой также фиксировались антенные температуры от калибровочных источников, параметры которых указаны в таблице 1. Дополнительно, для уточнения калибровочной процедуры, использовались планеты Юпитер и Сатурн, антенные температуры от которых изменялись от фазы этих источников и расстояний до них.

Табл. 1. Параметры калибровочных источников.

Table 1. Parameters of calibration sources.

<i>Частота, ГГц</i>	<i>Принятые значения потоков для источников, Ян</i>			
	DR 21	3C 274	NGC 7027	3C 286
36.8	18.3	14.3	5.1	1.56
22.2	19.5	21.5	5.4	2.37

Примечание: В первой колонке таблицы указана частота, во (второй-пятой) – принятые спектральные плотности потоков.

Антенные температуры от источников пересчитывались в плотности потоков с использованием зависимости:

$$P = 2kT_a/S_{эфф}, \quad (1)$$

где P – поток радиоисточника, k – постоянная Больцмана, T_a – антенная температура от источника, $S_{эфф}$ – эффективная площадь радиотелескопа.

2.2. Наблюдения в гамма-диапазоне.

Данные в гамма-диапазоне получены в рамках миссии FERMI на инструменте LAT [2]. Гамма-источник 1FGL 2253.9+1608 был позиционно отождествлен с блазаром 3C 454.3 [3]. Кривая блеска АЯГ 3C454.3 в радио- и

гамма-диапазоне приведены на рис.1. Каждая точка на кривой блеска соответствует усредненному за сутки фотонному потоку, интегрированному в диапазоне энергий от 100 МэВ до 300 ГэВ. Ошибки измерений показаны на уровне 68%. Угловое расстояние между гамма- и радио-источником составляет 15.1 угловых секунд, что соответствует $\sim 1/3$ радиуса ошибок на доверительном уровне 95%.

3. Продолжительная вспышка в 3С 454.3

В кривых блеска блазара видны квази гармонические составляющие с периодом 13.5 лет, которые были поставлены в соответствие с прецессионным периодом в двойной системе [4-6]. Самый короткий квази период отождествлялся нами с периодом орбитальным движением компаньона центральной сверхмассивной черной дыры ($T_{\text{orb}}=1.55$ года). Этот период был выделен на основе мониторинга на высоких частотах 22.2 и 36.8 ГГц. В системе координат, связанной с блазаром, и с учетом влияния γ -фактора $T_{\text{пр}}$ и T_{orb} равны соответственно 182 годам и 21 годам.

Беспрецедентное удлинение вспышки, начавшейся в 2013 году, трудно было спрогнозировать. Очередной 13-летний цикл должен отмечаться максимумом в 2018 году, если не произойдет серьезного сбоя периодичности прецессионного цикла.

При этом возникает вопрос, за счет какого механизма (эффекта) происходит такое изменение длительности вспышечного явления? Если в процессе прецессии АД происходит изменение угла между выбросами материи и направлением на наблюдателя, то мы обязаны фиксировать изменение γ -фактора отражающие значительное пролонгирование вспышки. В настоящее время она продолжается уже 4 года, что по крайней мере вдвое превышает длительность предыдущей вспышки. Такие изменения в продолжительности подъема излучения в объекте должны сопровождаться изменениями γ -фактора по крайней мере в два раза, учитывая, что вспышечное явление еще не закончилось.

Для проверки этого предположения был проведен гармонический анализ рядов данных длительного мониторинга 3С 454.3 для частоты 36.8 ГГц и гамма-диапазона на интервале времени длительности вспышки (2013-2017) гг. Если в данных будет обнаружен предположительно орбитальный период 1.55 года, тем самым будет установлено, что изменений γ -фактора не наблюдается и надо искать другие причины изменения продолжительности вспышки.

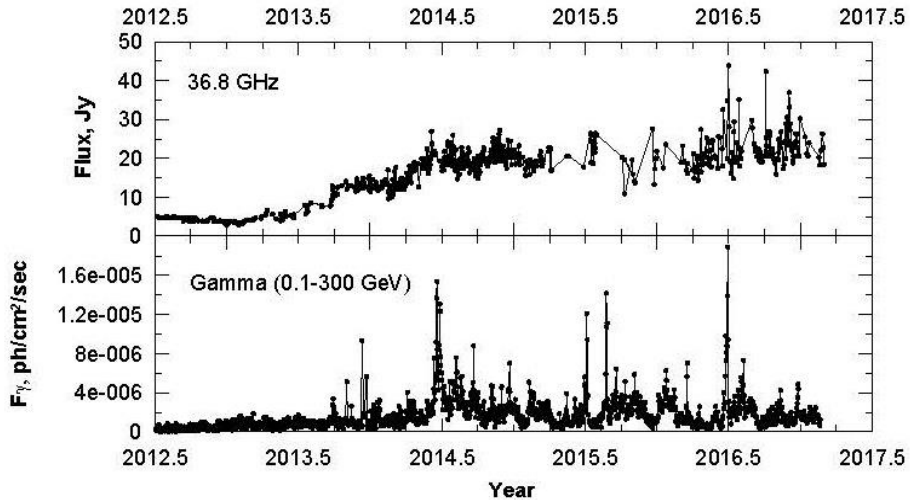


Рис. 1. Вспышечные явления в блазаре 3C 454.3.

Fig. 1. Flare phenomena in blasar 3C 454.3.

Проведенные исследования выявили наличие указанного периода, как в радио мониторинге, так и в данных гамма-диапазона. По данным на частоте 36.8 ГГц обнаружен период 1.8 ± 0.3 года, в гамма-диапазоне значение периода 1.52 ± 0.15 года. Это находится в хорошем согласии по выделению орбитального периода в анализе наших данных [1].

4. Заключение

1. Проведен длительный цикл наблюдений блазара 3C454.3 на частоте 36.8 ГГц с использованием радиотелескопа РТ-22 КрАО. Мониторинг вспышечного явления (2014-2017) гг. проводился большую часть времени с интервалом времени один день.

2. Проведенный гармонический анализ вспышки позволил выявить наличие орбитального периода в данных мониторинга, совпадающего по значению с тем, который был обнаружен ранее на основе данных наблюдений за период с 1982 года.

3. Наличие орбитального периода в данных вспышечного явления может свидетельствовать в пользу того, что изменение его длительности не

связано с увеличением γ -фактора, а напрямую зависит от прохождения компаньона центральной СМЧД сквозь среду аккреционного диска за счет совпадения плоскостей АД и орбиты компаньона.

4. За время последней вспышки в ЗС 454.3 получен богатый наблюдательный материал для исследования структуры среды аккреционного диска.

Список литературы

- [1] Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Ларионов М.Г., Х.Д. Аллер, М.Ф. Аллер, Астрон. журн. 84, №6, 503, (2007).
- [2] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html.
- [3] M. Sasada, M. Uemura, Y. Fukazawa, K.S. Kawabata, R.Itoh, I.Sakon, K. Fujisawa, A. Kadota, T. Ohsugi, M. Yoshida, H. Yasuda, M. Yamanaka, S. Sato, M. Kino, PASJ, 62, N.3, p.645 (2010).
- [4] Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Кардашев Н.С., Ларионов М.Г., Аллер Х.Д., Аллер М.Ф., Виллата М., Раитери К.М. Астрон. журн. 85, №11, 963, (2008).
- [5] Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Кутькин А.М., Ларионов М.Г., Аллер Х.Д., Аллер М.Ф. Астрон. журн. 87, №1, 33, (2010).
- [6] Вольвач А.Е., Вольвач Л.Н., Кутькин А.М., Ларионов М.Г., Виллата М., Раитери К.М., Лахтеенмаки А., Торникоски М., Ниеппола Е., Саволаинен П., Тамми Дж., Аллер М.Ф., Аллер Х.Д., Сергеев С.Г., Дорошенко В.Т., Ефимов Ю.С., Климанов С.А., Назаров С.В., Борман Г.А., Пушкарев А.Б., Жданов В.И., Федорова Е.В., Вавилова И.Б., Чеснок Н.Г. Астрон. журн. 88, №7, 662, (2011).

References

- [1] A.E. Volvach, L.N. Volvach, M.G. Larionov, H.D. Aller, M.F. Aller, Astronomy Reports, 2007, Vol. 51, No. 6, pp. 450–459.
- [2] http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/extract_latdata.html.
- [3] M. Sasada, M. Uemura, Y. Fukazawa, K.S. Kawabata, R.Itoh, I.Sakon, K. Fujisawa, A. Kadota, T. Ohsugi, M. Yoshida, H. Yasuda, M. Yamanaka, S. Sato, M. Kino, PASJ, 62, N.3, p.645 (2010).
- [4] A.E. Volvach, L.N. Volvach, M.G. Larionov, M.F. Aller, H.D. Aller, M. Villata, K.M. Raiteri, Astronomy Reports, 2008, Vol. 52, No. 11, pp. 867–874.
- [5] A.E. Volvach, L.N. Volvach, A.M. Kutkin, M.G. Larionov, M.F. Aller, and H.D. Aller, Astronomy Reports, 2010, Vol. 54, No. 1, pp. 28–37.
- [6] A.E. Volvach, L.N. Volvach, A.M. Kut'kin, M.G. Larionov, M. Villata, K.M. Panteri, A. Lahteenmaki, M. Tornikoski, P. Savolainen, G. Tammi, A.F. Aller, H.D. Aller, S.G. Sergeev, V.T. Doroshenko, Yu.S. Efimov, S.A. Klimanov, S.V. Nazarov, G.V. Borman, A.B. Pushkarev, V.I. Zhdanov, E.V. Fedorova, I.B. Vavilova, and N. G. Chesnok, Astronomy Reports. 2011. Vol. 55. No.7. PP.608-615.

Передвижной измерительно-испытательный комплекс для калибровки и валидации космических РСА

Лепёхина Т. А., Николаев В. И., Семенов М. А.

АО «Концерн «Вега»

Москва, 121170, Российская Федерация

vnikolaev65@inbox.ru

Аннотация: Представлен облик проектируемого аппаратного комплекса в мобильном контейнерном варианте для испытаний, калибровки и валидации космических РСА. Комплекс содержит многодиапазонный активный транспондер для взаимодействия с различными РСА, легко транспортируется и не требует специальной подготовки территории для развёртывания. Предлагается дополнить стационарные радиомишенные полигоны группой мобильных комплексов для повышения оперативности проведения испытаний и калибровки.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, калибровка, валидация, полунатурное моделирование, имитация отражённых сигналов.

1. Введение

Выполнение космическим радиолокатором с синтезированной апертурой (РСА) предъявленных к нему требований в значительной степени зависит от возможностей, структуры, качества и продуманности технических решений наземных испытательных средств. Сейчас в нашей стране практически отсутствуют как радиолокационные полигоны, так и современные метрологические средства (активные транспондеры, контрольные станции). Это приводит к существенному увеличению материальных затрат и сроков проведения лётных испытаний, при этом космический РСА, который должен поставлять информационный продукт надлежащего качества с подтверждёнными характеристиками, неэффективно вырабатывает свой ресурс. Сокращение временных и материальных затрат на наземную отработку, лётные и валидационные испытания является одним из необходимых условий успешной реализации проекта. В качестве аппаратно-программного средства для испытаний космического РСА и его подсистем на различных этапах их жизненного цикла предлагается мобильный измерительно-испытательный комплекс (МИИК).

2. Цели и задачи разработки МИИК

Для проведения лётных и валидационных испытаний РСА в качестве метрологических средств используются наземные радиомишенные полигоны (комплексы валидационных подспутниковых наблюдений), содержащие комплекты пассивных отражателей с калиброванными характеристиками, а также активные имитаторы радиомишеней. В России такие полигоны до настоящего времени не построены.

В зарубежной практике испытаний и калибровки РСА для имитации радиомишеней широкое применение находят активные транспондеры [1]. Их разработка и внедрение наряду с использованием уголковых отражателей и других пассивных испытательных средств, размещаемых на полигонах, связано с задачами, для решения которых пассивные отражатели малопригодны: бистатическая съёмка, поляриметрия; точечные цели с большой (малой) ЭПР, а также с повышенными требованиями по её точности и стабильности; сложные и поверхностно-распределённые цели.

Проверка сквозных характеристик РСА заключается в съёмке радиомишеней с известными калиброванными характеристиками и анализе полученного радиолокационного изображения. Возможность качественно-инструментального контроля характеристик РСА обеспечивается использованием радиомишеней с ярко выраженными свойствами, с отображением которых на изображении связана проверяемая характеристика, и методик автоматизированного анализа качества. Для формирования испытательных воздействий, которые трудно или невозможно задать натурными способами, в том числе и на лётных испытаниях, могут быть использованы аппаратно-программные средства полунатурного моделирования [2], позволяющие имитировать сложные фоно-целевые обстановки (ФЦО) путём преобразования зондирующего сигнала от РСА в имитированный отражённый сигнал. Эта функция может быть реализована с помощью усовершенствованного активного транспондера, имеющего в составе сигнальный процессор и специальное программное обеспечение для имитации отражённых сигналов, в том числе в режиме реального времени.

Активные транспондеры зарубежных операторов РСА, как правило, являются стационарными и размещаются на радиомишенных полигонах. Учитывая, что задача оборудования таких полигонов в нашей стране решается крайне медленно, предлагается мобильный измерительно-испытательный комплекс (МИИК), который может быть оперативно развёрнут в районе, удобном для проведения лётных испытаний, или на месте наземной отработки.

3. Облик и структура МИИК

Мобильный измерительно-испытательный комплекс объединяет в своём составе усовершенствованный активный транспондер, выполняющий описанные выше функции полунатурного моделирования тестовых радиомишеней, и аппаратно-программные средства, с помощью которых выполняется предварительное моделирование фоно-целевых обстановок, обработка радиоголограмм, принимаемых от РСА в технологических режимах, и анализ полученных радиолокационных изображений.

Центральным функциональным элементом комплекса является 4-диапазонный (P, L, S, X) активный транспондер (АТ), выполняющий приём радиолокационных сигналов в полосе частот до 1000 МГц на несущей частоте, их цифровую обработку, ретрансляцию и передачу. Структурная схема АТ с возможностью имитации сложных радиомишеней приведена на рис. 1. Приемный и передающий каналы АТ построены по взаимно симметричным схемам и содержат: квадратурный векторный модулятор и демодулятор, пары цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователей, перестраиваемые переносчики частот вверх и вниз. Шины цифровых входов и выходов ЦАП и АЦП связаны с сигнальным процессором на базе ПЛИС, который, в зависимости от выбранного режима, может выполнять либо передачу цифрового потока между приёмником и передатчиком для ретрансляции сигнала с программируемой задержкой или с программной фильтрацией в режиме реального времени, либо передачу этого же потока цифровых данных сигналов на внешнюю шину для записи на твердотельный RAID-массив и в обратном направлении в режиме прямого доступа к памяти.

Программное обеспечение АТ позволяет осуществлять приём, передачу сигналов (как одновременно, так и отдельно в каждом направлении) и ретрансляцию в непрерывном или импульсном (сегментированном) режиме. Импульсный режим по циклограмме, идентичной циклограмме работы РСА, организуется путём синхронизации от программируемого внутреннего триггера или внешнего импульса, используемого при совместной работе с проверяемым радиолокатором при наземных испытаниях. Импульсный режим позволяет экономить память для хранения принимаемой информации при большой скважности сигнала за счёт снижения средней скорости потока обрабатываемых данных, что увеличивает возможности для дополнительной обработки сигналов в реальном времени. Непрерывный режим обеспечивает возможность записи сигнала с неизвестными моментами синхронизации без потерь информации.

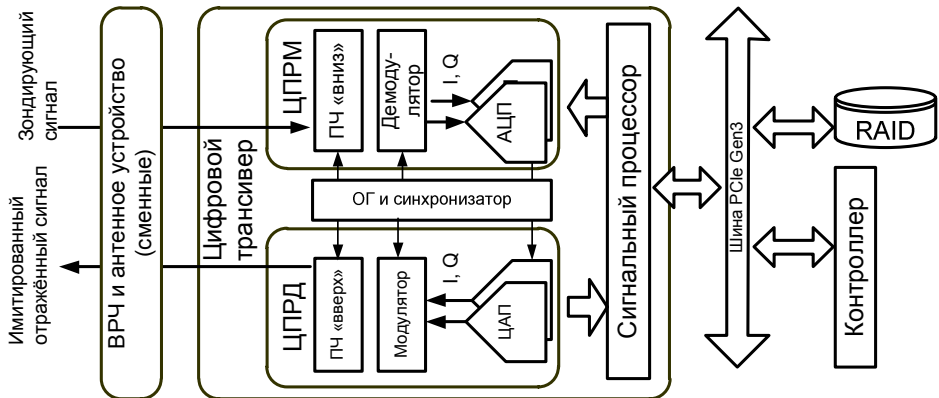


Рис. 1. Структурная схема активного транспондера с возможностью имитации сложных радиомишеней

Формирование отражённого сигнала от снимаемого участка является результатом трёх процессов [3]: 1) генерации зондирующего сигнала (ЗС), представляющего собой последовательность модулированных импульсов $\dot{u}_{snd}(t, \tau)$, где τ – «быстрое» время (аргумент комплексных функций, описывающих законы внутриимпульсной модуляции зондирующего и отражённого сигналов), t – «медленное» время, в котором описывается движение носителя по орбите; 2) отражения ЗС от каждого элемента снимаемой фигуры с комплексным коэффициентом рассеяния $\dot{s}(x, r)$; 3) формирования отражённого сигнала (ОС) как суперпозиции элементарных отражённых сигналов с учётом суммарных задержек распространения ЗС и парциальных ОС на линиях вниз и вверх:

$$\dot{u}_{tr}(t, \tau) = \sum_{m=1}^N L_m^2(t) \cdot e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} \rho(t, x_m, y_m, z_m)} \cdot \dot{s}_m \dot{u}_{snd} \left(\tau - \frac{2\rho(t, x_m, y_m, z_m)}{c} \right),$$

где ρ – расстояние между спутником и m -ым элементарным отражателем в момент t , L_m – коэффициент распространения радиоволн на линии с учётом диаграммы направленности антенны. Такая суперпозиция может быть представлена в виде свёртки комплексной огибающей зондирующего импульса с некоторой импульсной характеристикой

$$\dot{u}_{tr}(t, \tau) = \dot{u}_{snd}(t, \tau') * \dot{h}_{tr}(t, \tau - \tau'),$$

$$\text{где } \dot{h}_{tr}(t, \tau') = \sum_{m=1}^N L_m^2(t) \cdot e^{-j \frac{4\pi}{\lambda} \rho(t, x_m, y_m, z_m)} \cdot \dot{s}_m \delta \left(\tau' - \frac{2\rho(t, x_m, y_m, z_m)}{c} \right).$$

Отражённый сигнал $\dot{u}_r(t, \tau)$, соответствующий съёмке цели или тестового участка расчётного вида при заданном режиме съёмки, может быть имитирован с помощью аппаратно-программного фильтра, имеющего импульсную характеристику $\dot{h}_r(t, \tau')$. Матрица импульсных характеристик фильтра для всех импульсов в сеансе рассчитывается до начала сеанса в соответствии с моделью ФЦО и моделью движения. Фильтрация осуществляется средствами АТ. Возможны два режима имитации в зависимости от сложности ФЦО и производительности применяемого сигнального процессора. В одном случае свёртка вычисляется для комплексной огибающей каждого принятого импульса ЗС и соответствующей ему характеристики, считанной из матрицы, в режиме реального времени. В другом случае модель имитированного отражённого сигнала рассчитывается предварительно по данным модели зондирующего сигнала и сохраняется на накопителе. Воспроизведение сигнала из цифровых данных выполняется в сегментированном режиме.

4. Заключение

Таким образом, наличие сегментированного режима воспроизведения и ретрансляции широкополосных сигналов, а также сигнального процессора для преобразования сигналов в режиме реального времени позволяет имитировать различные тестовые радиомишени для испытаний космических РСА. Предложенные схемотехнические решения и аппаратно-программная реализация МИИК позволяет применять его при испытаниях радиолокаторов, работающих в L, P, S, X-диапазонах частот, а также перспективных многодиапазонных РСА высокого разрешения. Мобильность комплекса обеспечивает возможность быстрого развёртывания и эксплуатации на месте проведения испытаний РСА и его подсистем.

Список литературы

- [1] Jirousek M, Döring B.J, Looser P., Schwerdt M. Linearity Measurements of an Accurate Transponder for Calibrating Future Spaceborne SAR Systems//Proc. of 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar Conference EUSAR 2012. P. 67-70.
- [2] Верба В.С., Татарский Б.Г. (ред.) Радиолокационные системы авиационно-космического мониторинга земной поверхности и воздушного пространства М.: Радиотехника, 2014. - 576 с.: ил.
- [3] Лепёхина Т.А., Николаев В.И. Алгоритм цифровой имитации траекторных сигналов для испытаний радиолокаторов с синтезированной апертурой высокого разрешения // 15-я Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2013». М.: РНТОРЭС им. А.С.Попова, 2013. С.418-422.

Effect of diffraction of electromagnetic waves on parameters of radiointerferometry

Shtykov V.V.

National Research University «MPEI»
Moscow, 111250, Russian Federation
ShtykovVV@yandex.ru

Abstract The new mathematical model of short-range radiolocation proposed. Results of diffraction influence on radar signal are discussed. Gaussian beam is used as a field model. The object surface is presented as an arbitrary surface of an ideal metal. The complex reflection coefficient is obtained. The concrete results are specified on the case of the reflected object in the form of a moving plate

Keywords: diffraction, Gaussian beam, reflection coefficient, phase shift, short-range radiolocation, radiointerferometr

Влияние дифракции электромагнитных волн на характеристики радиоинтерферометра

ШТЫКОВ В.В.

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
г. Москва, 111250, Российская Федерация
ShtykovVV@yandex.ru

Аннотация: Предложена математическая модель ближней радиолокации с учетом дифракции электромагнитных волн. В качестве модели полей используются пучки Гаусса-Эрмита. Объект представлен в виде произвольной поверхности идеального металла, расположенной в поле излучателя. Получены соотношения для комплексного коэффициента отражения. Приведены некоторые конкретные примеры влияния дифракции отражённого от объекта излучения на сигнал радиоинтерферометра.

Ключевые слова: дифракция, пучки Гаусса-Эрмита, комплексный коэффициент отражения, дополнительный набег фазы, радиоинтерферометр.

1. Введение

В настоящее время системы ближней радиолокации (СБРЛ) находят все более широкое применение в самых разнообразных областях: в промышленности, на транспорте, в научных исследованиях, в измерительной технике (в частности, для регистрации вибрации), дистанционной диагностики процессов жизнедеятельности человека и т.п.

Чаще всего интерес представляет информация о перемещении объекта исследования. Как правило, она извлекается из сигнала, который связывают с эффектом Доплера. Однако широко распространенное толкование этого эффекта относится к ситуации, когда излучатель и объект можно считать точечными. В СБРЛ это условие, как правило, не выполняется. Поэтому при обработке фазометрических данных, которые получают в таких системах, необходимо принимать во внимание конечные размеры, как антенны, так и объекта.

2. Коэффициент отражения от объекта

Для того чтобы найти коэффициент отражения от объекта, представим внешнюю часть радиоинтерферометра в виде некоторого двухполюсника (выводы которого указаны на рис.1 справа). Апертура излучателя интерферометра имеет сечение $2a \times 2b$, а поперечное сечение объекта $2c \times 2d$. Поверхность объекта задана функцией $\Delta z = f(x, y)$ ¹.

Запишем связь между комплексными амплитудами напряжений на выходных зажимах этого двухполюсника в виде:

$$\dot{U}_{ref} = \dot{R} \dot{U}_{inc} \quad (1)$$

где $\dot{U}_{ref}$, $\dot{U}_{inc}$ – напряжение отраженной и падающей волны, соответственно, и $\dot{R}$ – комплексный коэффициент отражения.

Комплексный коэффициент отражения можно найти, используя, также как это было сделано в [1], лемму Лоренца[2]

$$\int \mathbf{j}_2 \mathbf{E}_2 dV = \int \mathbf{j}_1 \mathbf{E}_1 dV, \quad (1)$$

где $\mathbf{j}_2$ – поверхностная плотность тока, которая для идеального металла связана с напряженностью магнитного поля соотношением $\mathbf{1}_n \times \mathbf{H}$, $\mathbf{j}_1$ – плотность тока на входе, $\mathbf{E}_1$ – напряженность электрического поля, наво-

¹ Ради удобства далее все линейные размеры будем считать нормированными по длине волны

дима отраженной волной, E_2 – напряженность электрического поля на поверхности объекта, падающей волной.

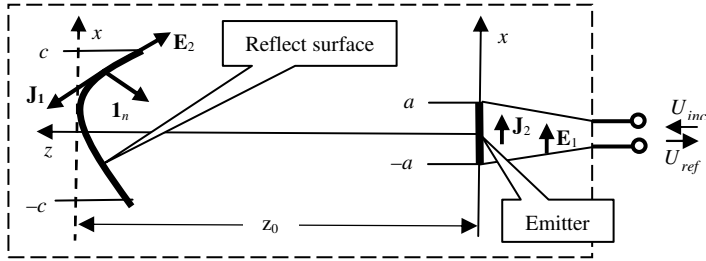


Рис.1. К определению коэффициента отражения

Fig. 1. On the definition of the reflection coefficient

В качестве модели полей ближней и промежуточной зон можно использовать пучки Гаусса-Эрмита. Медленно меняющуюся комплексную амплитуду пучка можно записать следующим образом:

$$\dot{W}(x, y, z) = \exp\left(-\frac{x^2}{2a^2(1-jD_a)} - \frac{y^2}{2b^2(1-jD_b)}\right) / \sqrt{ab\pi(1-jD_a)(1-jD_b)}.$$

Здесь a и b – поперечные размеры пучка в плоскости $z=0$, $D_a = z/2\pi a^2$, $D_b = z/2\pi b^2$ – приведенные расстояния. После преобразований получаем

$$\dot{R} = -\exp(-j4\pi z_0) \int_{S_{obj}} \exp(j4\pi f(x, y)) \dot{W}(x, y, z)^2 dx dy. \quad (2)$$

Экспоненциальный множитель перед интегралом вполне очевиден и не представляет особого интереса. В дальнейшем этот множитель будет опущен.

Интеграл (2) после подстановки функции $\dot{W}(x, y, z)$ принимает вид:

$$\dot{R} = - \iint_{S_{obj}} \frac{\exp(j4\pi f(\xi, \eta)) \exp\left(-\frac{\xi^2}{(1-jD_a)} - \frac{\eta^2}{(1-jD_b)}\right)}{\pi(1-jD_a)(1-jD_b)} d\xi d\eta. \quad (3)$$

$$\text{Здесь } \xi = x/a, \eta = y/b, D_a = \frac{z_0 - f(\xi, \eta)}{2\pi a^2}, D_b = \frac{z_0 - f(\xi, \eta)}{2\pi b^2}.$$

Коэффициент отражения (3) является комплексной величиной, что приближенно описывает дифракцию электромагнитных волн. Это приводит к поправке абсолютной величины коэффициента отражения, что очевидно и не особенно важно. Поправка к фазе имеет принципиальное значение. Дополнительная фаза связана с конечными размерами, как излучателя, так и объекта.

3. Некоторые частные случаи

Для демонстрации влияния геометрии объекта на коэффициент отражения получим результаты для объекта в виде плоской пластины. В этом случае $f(\xi, \eta) \equiv 0$. Если центр пластины совпадает с осью z , то

$$\dot{R} = -\frac{1}{\pi(1-jD_a)(1-jD_b)} \int_{-\xi_c}^{\xi_c} \int_{-\eta_d}^{\eta_d} \exp\left(-\frac{\xi^2}{(1-jD_a)} - \frac{\eta^2}{(1-jD_b)}\right) d\xi d\eta, \quad (4)$$

где $\xi_c = c/a$, $\xi_d = d/b$,

Используя замены $\xi = \xi/\sqrt{1-jD_a}$ и $\eta = \eta/\sqrt{1-jD_b}$, интегралы в (4)

можно выразить через интегралы вероятности $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt$ [3].

В результате комплексный коэффициент отражения можно записать в следующей форме:

$$\dot{R} = -\frac{1}{\sqrt{(1-jD_a)(1-jD_b)}} \operatorname{erf}\left(\frac{\xi_c}{\sqrt{(1-jD_a)}}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{\eta_d}{\sqrt{(1-jD_b)}}\right); \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим ситуацию, когда и излучатель, и объект имеют форму квадратов. В этом случае $D_a = D_b$, $\xi_c = \eta_d$ и коэффициент отражения (5) принимает простой вид

$$\dot{R} = -\operatorname{erf}\left[\xi_c/\sqrt{(1-jD_a)}\right]^2 / (1-jD_a). \quad (6)$$

На рис. 2 приведены результаты расчета для поперечных размеров $2a \times 2a = 2\lambda \times 2\lambda$ и $2c \times 2c = 20\lambda \times 20\lambda$.

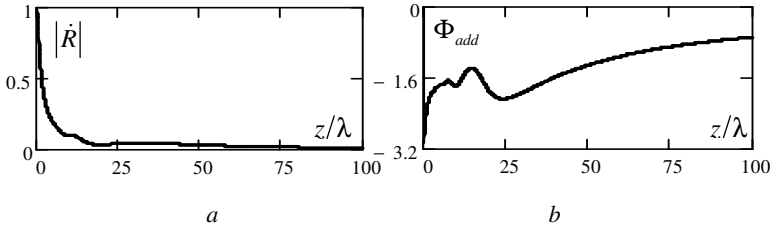


Рис. 2. Зависимость модуль (а) и дополнительной фазы (б) комплексного коэффициента отражения от расстояния до объекта

Fig. 2. Module (a) and phase (b) of reflection vs. space between emitter-object

Причина падения $|\dot{R}|$ с увеличением расстояния вполне очевидна. Если расстояние до объекта стремится к бесконечности, то $D \rightarrow \infty$, $\text{erf}_{x \rightarrow 0}(x) \approx 2x/\sqrt{\pi}$, а коэффициент отражения при этом

$$\dot{R}_{z \rightarrow \infty} = \frac{16a^2 c^2}{z^2} = \frac{S_a S_c}{z^2} \quad (7).$$

Выражение (7) согласуется с традиционной формулой для определения дальности действия радиолокатора. Дополнительный набег фазы – результат дифракции. Немонотонность функций $\Phi_{add}(z)$ связана с влиянием краевых эффектов, которые являются проявлением дифракцией. Дополнительная фаза на краю пластины изменяется от максимума до максимума на 2π . При $z \rightarrow \infty$ кривизна фазового фронта в пределах поперечного сечения объекта становится несущественной и дополнительная фаза обращается в нуль. Поскольку действительная и мнимая части комплексного коэффициента отражения связаны между собой преобразованием Гильберта, пульсациям $\Phi_{add}(z)$ соответствуют пульсации $|\dot{R}(z)|$

В качестве второго примера рассмотрим движение пластины поперек ПГЭ. Пусть пластина движется вдоль оси x (см. рис.1). Этому движению будет соответствовать изменение пределов интегрирования по координате x в интеграле (3). Интеграл по переменной y остается прежним. Для квадратной пластины окончательный результат интегрирования выглядит следующим образом:

$$\dot{R} = -\frac{0,5}{(1 - jD_a)} \text{erf}\left(\frac{\xi_c}{\sqrt{(1 - jD_a)}}\right) \left[\text{erf}\left(\frac{\xi_c + \Delta\xi}{\sqrt{(1 - jD_a)}}\right) + \text{erf}\left(\frac{\xi_c - \Delta\xi}{\sqrt{(1 - jD_a)}}\right) \right] \quad (8)$$

На рис. 3 приведены зависимости модуля и дополнительной фазы коэффициента отражения от величины смещения $\Delta x/a$ относительно центра ПГЭ пластины с размерами $2c \times 2c = 20\lambda \times 20\lambda$, которая находится на удалении 20λ от излучателя.

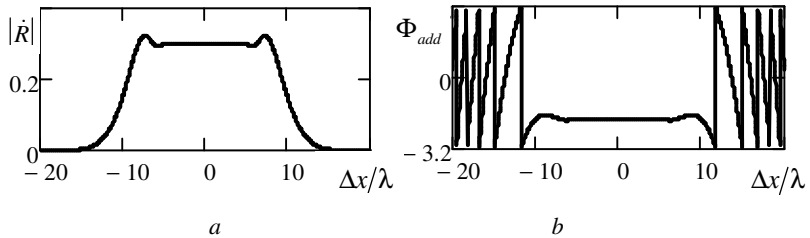


Рис. 3. Зависимость модуля (а) и дополнительной фазы (б) коэффициента отражения от смещения

Fig. 3. Module (a) and phase (b) of reflection vs. shift of the plate

Наконец рассмотрим вращение пластины вокруг продольной оси ПГЭ. Ясно что, если сечения представляют собой прямоугольники разного размера, то при вращении объекта появляются периодические изменения коэффициента отражения.

На рис.4 приведены результаты расчета. зависимостей модуля и дополнительной фазы от угла поворота α вокруг продольно оси ПГЭ.

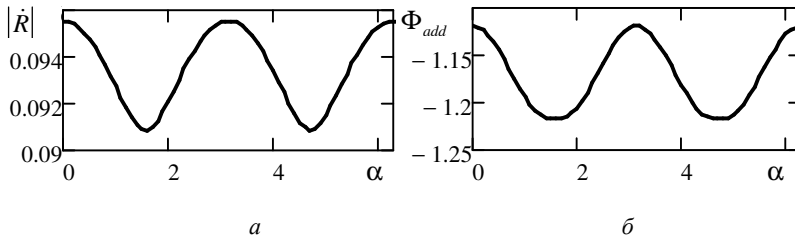


Рис. 4. Зависимость модуля (а) и дополнительной фазы (б) коэффициента отражения от угла поворота пластины α

Fig. 4. Module (a) and phase (b) of reflection vs. rotate angel of the plate α

Излучатель имеет размеры $2a \times 2b = \lambda \times 2\lambda$. Объект с размерами $2c \times 2d = \lambda \times 20\lambda$ расположен на расстоянии 10 длин волн от излучателя.

Зависимости имеют период, равный π . Это является следствием присутствия оси симметрии 2-го порядка. Причина изменения модуля коэффициента отражения более или менее очевидна. Ее можно связать с долей энергии пучка, перехватываемой объектом. Изменение фазы обусловлено краевыми эффектами и являются следствием дифракции пучка на объекте.

4. Заключение

Полученные результаты показывают, что конечные размеры антенны и объекта в СБРЛ приводят к появлению дополнительного фазового набега. Для динамических объектов это в свою очередь приводит к поправке к мгновенной частоте измеряемого сигнала.

Это обстоятельство, во-первых, следует упитывать при обсуждении точности измерения скоростей движения. Изложенная выше приближенная теории учета дифракции позволяет оценить погрешность и установить границы параметров объекта, в пределах которых этим явлением можно пренебречь.

Во-вторых, дополнительный фазовый набег, как это видно из приведенного анализа, может представлять самостоятельный практический интерес. Так, например, изложенная приближенная модель позволяет рассмотреть вопрос о регистрации поперечных перемещений и вращения объекта. Это расширяет область использования радиоинтерферометров.

Список литературы

- [1] Мельниченко В.С., Штыков В.В. Матричное описание многоканального радиоинтерферометра// Радиотехника 2013, № 10, с. 8-13.
- [2] Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны. – М.: Радио и связь 1988. – 440 с.
- [3] Справочник по специальным функциям //Под редакцией М. Абрамовича и И. Стигана/ Пер с англ. под редакцией В. А. Диткина и Л. Н. Кармазинной. – М.: «Наука», 1979. – 832 с

References

- [1] V.S. Mel'nichenko, V.V. Shtykov, "Matrix Representation of Multi-channel Radio interferometer", Radiotekhnika, 2013, no. 10, p. 8–13. (in Russian).
- [2] L.A.Vainshtein, "Electromagnetic Waves", Moscow, Radio i Svyaz', 1988, 440 p. (in Russian).
- [3] M. Abramowitz, I.A. Stegun, "Handbook of Mathematical Functions", Corrected first edition reprint, Dover Publications, 1972, 1060 p.

The simulation of scattering the ultra-wideband signal on the complex object

¹Lvovich I.Ya., ¹Preobrazhenskiy A.P., ²Choporov O.N., ¹Nechaeva A.I.

¹Voronezh Institute of High Technologies,
Lenina, 73a, Voronezh, 394043, Russia

²Voronezh Technical State University,
Moskovskiy, 14, Voronezh, 394026, Russia
app@vvt.ru

Abstract: This paper is devoted to the analysis of technique for calculation the radar cross section of perfectly conducting object with complex shape in the case of incident ultra-wideband pulse, because there is active development of technical tools that use this approach. The time approach is used, which, unlike the frequency method, allows to take into account that the value of the radial distance of the object can exceed the spatial extent of the probing pulses. To describe the object used the faceted model is considered that, the scattering properties of each of the facets are calculated and then, on the basis of the superposition principle, the scattering properties of the whole complex perfectly conducting object are determined. The calculation of the radiated and reflected fields for a specific shape of the probing ultra-wideband signal is carried out.

Keywords: radar cross section, ultra-wideband signal, time approach.

Моделирование рассеяния сверхширокополосного сигнала на объекте сложной формы

¹Львович И.Я., ¹Преображенский А.П., ²Чопоров О.Н.,
¹Нечаева А.И.

¹Воронежский институт высоких технологий,
ул. Ленина, 73а, Воронеж, 394043, Россия

²Воронежский государственный технический университет,
Московский пр., 14, Воронеж, 394026, Россия
app@vvt.ru

Аннотация: Статья посвящена анализу методики для расчета эффективной площади рассеяния идеально проводящего объекта сложной формы в случае, когда на него падает сверхширокополосный импульс, поскольку наблюдается активное развитие технического инструментария, который использует такой

подход. Применяется временной подход, который в отличие от частотного дает возможности учета того, что значение радиальной протяженности объекта может превышать пространственную протяженность зондирующих импульсов. Для описания объекта применяется фацетная модель, учитываются рассеивающие свойства каждого из фацетов и затем, на основе принципа суперпозиции, определяются рассеивающие свойства всего сложного идеально проводящего объекта. Проводится расчет излученных и отраженных полей для определенной формы зондирующего сверхширокополосного сигнала.

Ключевые слова: эффективная площадь рассеяния, сверхширокополосный сигнал, временной подход.

1. Introduction

Among the main parameters that we can see in the equation-range radar the radar cross section (RCS) of objects can be noted. At the present time a large number of different approaches for calculation of the RCS are developed for different elementary structures (plates, spheres, cylinders) in case of irradiation with narrow-band harmonic signals. Due to the fact that there is a development of ultra-wide band (UWB) short-pulse radar can be considered, which are relevant issues associated with the evaluation of RCS objects when they are irradiated with UWB signals with non-harmonic form.

Two methods can be used to estimate the RCS of the object when it is irradiated with the UWB signal. The first method is based on the frequency approach [1-3], the RCS of the object is evaluated at each of the harmonics of the UWB signal on the basis of the formulas allowing to calculate the RCS of the object at a harmonic of the probing signals.

But using this approach can leads to difficulties associated with the fact that for a short UWB waveforms, the radial length of the object may exceed the spatial extent of the probing pulses [4], it is not taken into account in the relevant formulas. In this paper, we present a timing approach. The calculation of the radiated and reflected fields for a given form of the probing UWB signal is carried out.

2. The problem statement

We consider the scattering of UWB pulse on the object with complex form under these conditions:

1. The aperture antenna [5] emitting the UWB signal has a rectangular opening. This rectangular opening has dimensions of L_a and L_b .

Amplitude field distribution in the aperture is uniform. The excitation of the aperture is simultaneously read (no time delay relative to the square aperture).

Vector current distribution is the same for all aperture.

2. Field that excites the revealing of the transmitting antenna, is calculated based on the following expression:

$$E_{init}(t) = E_0 \cdot \exp(-t^2/T^2). \quad (1)$$

where E_0 denotes amplitude; pulse duration can be determined from the expression $\delta_{impuls} = 2T\sqrt{\ln(10)}$ –relative to the level of 0.1. The example of calculated field values is shown in Fig.1.

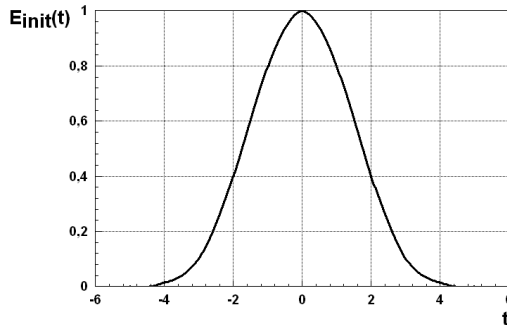


Fig. 1. The incident field for $T=2\text{ns}$

Рис. 1. Падающее поле для $T=2\text{нс}$

3. Object having a complex shape, represented as a set of N perfectly conducting metal flat rectangular sections having dimensions of a_j and b_j , $j=1..N$. These sections are located in front of the antenna and rotated in a horizontal plane at an angle φ_j .

4. It is believed that the incident electromagnetic wave is planar, since the object distance r is large enough

5. The electromagnetic wave propagates in vacuum.

The scheme of propagation of the electromagnetic wave and the location of the object and the antennas is shown in Fig. 2.

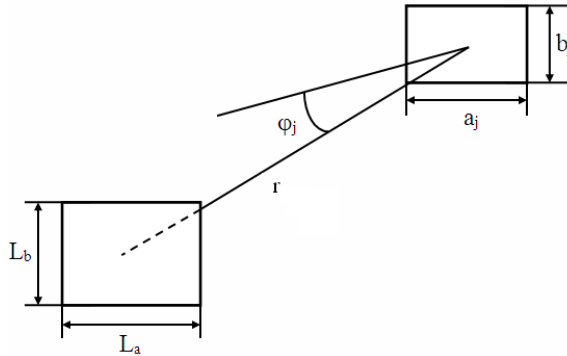


Fig. 2. The scheme of propagation of the electromagnetic wave to metal flat rectangular section
Рис. 2. Схема распространения электромагнитной волны к металлической прямоугольной плоской поверхности

3. The technique of calculation of radiated and scattered fields

In formulae the multiplier is omitted for the delay for signal propagation from the antennas to the target and back. We calculate the radiation field of the transmitting aperture in the far field. We have information about the transmitting aperture. To resolve external problem we use the Kirchhoff approximation. The solution for the radiation of waves for aperture antenna can be expressed in the following form:

$$E_{\text{radiat}}(t) = \frac{1 + \cos \varphi_j}{4\pi cr} \int_{-\frac{L_a}{2}}^{\frac{L_a}{2}} \int_{-\frac{L_b}{2}}^{\frac{L_b}{2}} E'_{\text{init}} \left(t - \frac{r'}{c} \right) dx dy \quad (2)$$

где $E'_{\text{init}} \left(t - \frac{r'}{c} \right)$ – first differential in time of the excitation field; $r' = r - \sin \varphi_j (x \cos \theta_j + y \sin \theta_j)$ – distance from the observation point up to the elements the surface of the aperture; r is the distance from the transmitting antenna to the object; x, y – variables of the integration over the square of the aperture; φ_j, θ_j – angles of rotation of the aperture relative to the observation point in horizontal and vertical planes, respectively.

The field near the surface of metal flat rectangular section can be calculated by the expression:

$$E_{\text{surf}} = \frac{L_a L_b E_0}{T^2 \pi cr} t \exp(-t^2/T^2). \quad (3)$$

The field, scattered from metal flat rectangular section, can be calculated on the base of expression:

$$E_{scatt}(t) = \frac{1+\cos\varphi_j}{4\pi cr} \int_{-\frac{a_j}{2}}^{\frac{a_j}{2}} \int_{-\frac{b_j}{2}}^{\frac{b_j}{2}} E'_{surf} \left(t - \frac{r'}{c} \right) dx dy \quad (4)$$

After the integration we have

$$E_{scatt}(t) = \frac{b_j L_a L_b E_0}{8(\pi cr T)^2} (1 + \cos\varphi_j) \times \\ ((a_j \sin\varphi_j - 2tc) \exp\left(-\left(\frac{a_j \sin\varphi_j - 2tc}{2Tc}\right)^2\right) + \\ + (a_j \sin\varphi_j + 2tc) \exp\left(-\left(\frac{a_j \sin\varphi_j + 2tc}{2Tc}\right)^2\right)) \quad (5)$$

4. The calculation of radar cross section

Radar cross section of the complex object can be calculated with the use of maximum values of the incident and the scattered fields:

$$\sigma_j = 4\pi r \left| \frac{E_{scat}}{E_{inc}} \right|^2 = \frac{8e \ln(10) a_j b_j}{\pi (c \delta_{impuls})^2} \quad (6)$$

Radar cross section of the complex object can be calculated on the base of the principle of superposition:

$$\sigma = \sum_{j=1}^N \sigma_j + 2 \sum_{i>j}^N \sqrt{\sigma_i \sigma_j} \cos \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{ij}, \quad (7)$$

where $\Delta r_{ij} = r_i - r_j$, r_i and r_j - the radius vectors from the i -th and j -th metal flat rectangular section to the point of observation.

As the object of analysis we considered three cubes, as it shown in figure 3.

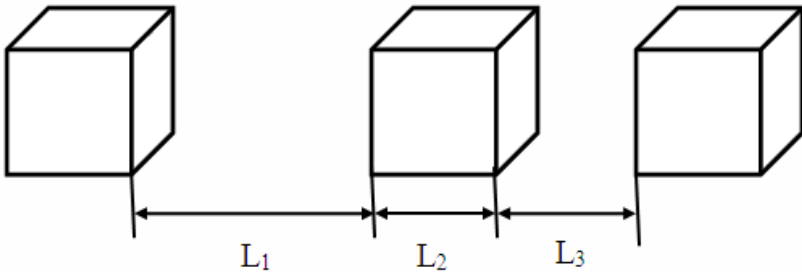


Fig. 3. Three cubes are considered as complex object

Рис. 3. Три куба рассматриваются как объект сложной формы

Here, $L_1 = 10\text{m}$, $L_2 = 0.2\text{m}$, $L_3 = 8\text{m}$.

In Figure 4 we can see the dependence of radar cross section from $c\delta_{impuls}$.

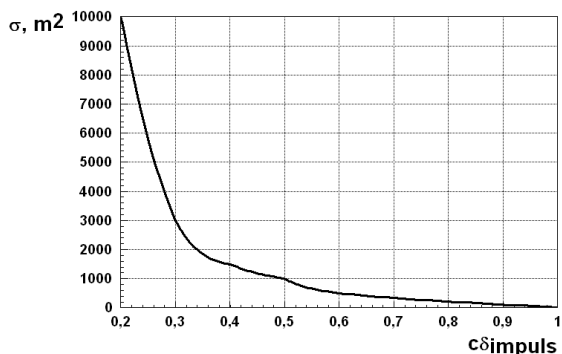


Fig. 4. The dependence of radar cross section from $c\delta_{impuls}$.

Рис. 4. Зависимость эффективной площади рассеяния от $c\delta_{impuls}$

5. Conclusions

In this paper, the technique for calculation of complex object for ultra-wideband signal is developed. This technique is based on the faceted model.

References

- [1] Immoreev I. Use of Ultra-Wideband Location in Air Defence. *Questions of Special Radio Electronics. Radiolocation Engineering Series*. Issue 22. 1991, pp 76-83.
- [2] Preobrazhenskiy A.P. Prediction of radar characteristics of a perfectly conducting cavity within a wavelength range *Telecommunications and Radio Engineering*. 2007. V. 66. № 17. pp. 1543-1548.
- [3] Preobrazhenskiy A.P. Radar characteristic prediction for objects having radio-absorbing coatings over a wavelength range *Telecommunications and Radio Engineering*. 2004. V. 62. № 6. pp. 569-576.
- [4] S. Roy, J. R. Foerster, V. S. Somayazulu and D. G. Leeper, "Ultrawideband radio design: The promise of high-speed, short-range wireless connectivity," in *Proc. of the IEEE*, Vol. 92, issue 2, Feb. 2004, pp. 295-311.
- [5] Harrington R. F. *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*. McGraw-Hill, New York, 1962, pp. 100-103, 143-263, 365-367.

Use of differential ABCD-matrixes of quasi-T-waves for modeling of distribution of pulse signals in layered environments with losses

¹ Fedorov V. N., ² Fedorova L. L., ³ Malyutin N. D.

¹North-Eastern federal university of M.K. Ammosov

Yakutsk, 677000, Russian Federation

fvnsvfu@mail.ru

² Mining Institute of the North SB RAS

Yakutsk, 677000, Russian Federation

lar-fed-90@rambler.ru

³ Tomsk state university of control systems and radioelectronics

Tomsk, 634000, Russian Federation

Abstract: The method based on representation of small sites of the environment in the form of differential matrixes of transfer the quasi-T-wave is described. Matrixes are brought directly out of Maxwell's equations. Through matrixes of sites matrixes of layers, and their multiplication – a matrix of transfer of all environment register. Setting the corresponding boundary conditions pay off distribution of electric field in the environment. The two-dimensional model of the non-uniform dispersive environment is considered. Model allows to consider dispersion, polarization and relaxation losses in everyone a component of the non-uniform dispersive environment. The scheme of the direct account provides fast convergence and stability of the procedure.

Keywords: ABCD matrix, matrix of transfer, Maxwell's equation, Quasi-t-wave, two-dimensional environment, dispersion, losses.

Использование дифференциальных ABCD-матриц квази-Т-волн для моделирования распространения импульсных сигналов в слоистых средах с потерями

¹Федоров В.Н., ²Федорова Л.Л., ³Малютин Н.Д.

¹Северо-восточный федеральный университет им. М.К.Аммосова

г. Якутск, 677000, Российская Федерация

fvnsvfu@mail.ru

²Институт горного дела Севера им. Н.В.Черского

г. Якутск, 677000, Российская Федерация
lar-fed-90@rambler.ru

³Томский университет систем управления и радиоэлектроники
г. Томск, 634000, Российская Федерация
ndmalyutin@yandex.ru

Аннотация: *Описан метод, основанный на представлении малых участков среды в виде дифференциальных матриц передачи квази-Т-волн. Матрицы выводятся непосредственно из уравнений Максвелла. Через матрицы участков записываются матрицы слоев, а их перемножение – матрица передачи всей среды. Задавая соответствующие граничные условия рассчитывается распределение электрического поля в среде. Рассмотрена двухмерная модель неоднородной дисперсионной среды. Модель позволяют учесть дисперсию, поляризацию и релаксационные потери в каждой компоненте неоднородной дисперсионной среды. Схема прямого счета обеспечивает быструю сходимость и устойчивость процедуры.*

Ключевые слова: ABCD-матрица, матрица передачи, уравнения Максвелла, квази-Т-волны, двухмерная среда, дисперсия, потери.

1. Введение

В настоящее время для решения задач электродинамики используются такие методы, как Finite-Difference Time-Domain (FDTD), матриц линий передач (TLM), импедансного аналога электромагнитного пространства (ИАЭП) и другие [1-3]. К недостаткам всех этих методов следует отнести сложность учета дисперсии, потребность их в значительных вычислительных ресурсах и использование рекурсивных методов расчета.

Дифракционная теория распространения гауссовых пучков в квазиоптическом приближении была сформулирована на матричном языке с помощью правила, введенного Kogelnik Н. [4]. Из-за малой величины оптического промежутка ABCD-матрица передачи луча является дифференциальной матрицей и описывает передачу луча через участок Δx . Из-за параксиальности лучей можно считать их квази-Т-волнами.

Электродинамическое моделирование с использованием дифференциальных ABCD-матриц основано на представлении малых участков среды в виде матриц передачи, полученных непосредственно из уравнений Максвелла [5]. Это позволяет записать ABCD-матрицы слоев, а их перемножение – матрица передачи всей среды.

В качестве примера в данной работе рассмотрена ADCD-матрица двухмерной среды, когда компоненты распространяющейся электромагнитной волны (ЭМВ) $\dot{E}_x = \dot{E}_z = 0$.

2. Двухмерная модель ячейки среды

Для комплексных амплитуд электромагнитных волн в прямоугольной системе координат уравнения Максвелла запишутся:

$$\begin{aligned} \text{rot} \vec{H} &= j\omega \vec{E}, \\ \text{rot} \vec{E} &= -j\omega \vec{H} \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь учет потерь и дисперсия учитывается как $\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega\epsilon_0})$.

Пусть вектор Пойтинга $\dot{P}$ ЭМВ распространяется в плоскости xy . Рассмотрим случай, когда $\dot{E}_x = \dot{E}_z = 0$. Тогда $\dot{H}_y = 0$ и ЭМВ описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial x} &= j\omega \mu \dot{H}_z, \\ \frac{\partial \dot{E}_y}{\partial z} &= -j\omega \mu \dot{H}_x, \\ \frac{\partial \dot{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \dot{H}_z}{\partial x} &= j\omega \epsilon \dot{E}_y. \end{aligned} \quad (2)$$

ЭМВ является суперпозицией двух ортогональных Т-волн, как это показано на рис. 1, когда $\dot{E}_y = \dot{E}_y^x + \dot{E}_y^z$, $\dot{H} = \dot{H}_x + \dot{H}_z$, $\dot{P} = \dot{P}_x - \dot{P}_z$ и (2) можно расписать в виде:

$$\begin{aligned} \frac{d\dot{H}_x}{dz} - \frac{d\dot{H}_z}{dx} &= j\omega \epsilon \dot{E}_y & \frac{d\dot{H}_x}{dz} &= j\omega \epsilon \dot{E}_y^z & \frac{d\dot{H}_z}{dx} &= -j\omega \epsilon \dot{E}_y^x \end{aligned}$$

Рис. 1. Электромагнитная волна как суперпозиция двух ортогональных Т-волн.

Fig. 1. Electromagnetic wave as superposition of two orthogonal T-waves

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \dot{E}_y^x}{\partial x} &= j\omega\mu\dot{H}_z, \\
\frac{\partial \dot{H}_z}{\partial x} &= -j\omega\epsilon\dot{E}_y^x, \\
\frac{\partial \dot{E}_y^z}{\partial z} &= -j\omega\mu\dot{H}_x, \\
\frac{\partial \dot{H}_x}{\partial z} &= j\omega\epsilon\dot{E}_y^z.
\end{aligned} \tag{3}$$

Система (3) является двумерным телеграфным уравнением и описывает две Т-волны, распространяющихся в направлениях x и $-z$. Переходя к конечным разностям - $dx \rightarrow \Delta x$ и $dz \rightarrow \Delta z$ и квази-Т-волнам, ABCD-матрица ячейки запишется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_y^x(x + \Delta x) \\ \dot{E}_y^z(z + \Delta z) \\ \dot{H}_x(x + \Delta x) \\ \dot{H}_z(z + \Delta z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & Z \cdot \Delta x & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -Z \cdot \Delta z \\ -Y \cdot \Delta x & 0 & 1 & 0 \\ 0 & Y \cdot \Delta z & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{E}_y^x(x) \\ \dot{E}_y^z(z) \\ \dot{H}_x(x) \\ \dot{H}_z(z) \end{bmatrix} \tag{4}$$

где $\dot{Z} = j\omega\mu$, $\dot{Y} = j\omega\epsilon$.

3. Двухмерная модель среды

Система (3) описывает распространение плоской ЭМВ в двухмерной дисперсионной среде. Систему (3) можно поставить в виде схемы замещения, приведенную на рис. 2. Не трудно показать, что матрица передачи этой эквивалентной схемы соответствует (4) - ABCD-матрице ячейки. Дифференциальные ABCD-матрицы участков позволяет записать ABCD-матрицы слоев, а их перемножение – матрицу передачи среды. Задавая соответствующие граничные условия можно рассчитать распределение электрических полей в этой среде.

4. Практические результаты

На рис.3 приведено рассчитанное распределение электрического поля в двухмерной среде (размеры 1х1 м, $f=800$ МГц, $\epsilon=5$, $\sigma=10^{-2}$ см/м, шаг дискретизации 0,1 м) при следующих граничных условиях:

$$U(0,y)=U(1,y)=U(x,0)=U(x,1)=0, U(0,0.5)=E=1 \text{ В.}$$

Отличие формы фронтов ЭМВ от окружности вызвано граничными условиями, так как источник ЭДС излучает ЭМВ лучом строго по направлению x , постепенно расширяясь. Благодаря прямому счету время расчета составила не более 1 с.

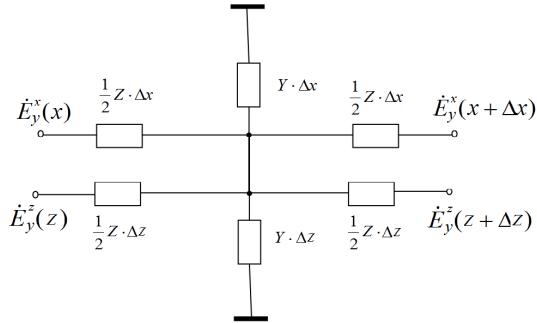


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения ячейки $dxdy$ двухмерной среды.

Fig. 2. Equivalent equivalent circuit of a cell of $dxdy$ of the two-dimensional environment

4. Заключение

Разработана электродинамическая модель, основанная на представлении малых участков среды в виде ABCD-матриц, аналогичных используемым в матричной оптике. Представлена постановка задачи и аналитическое решение, полученное непосредственно из уравнений Максвелла. Это позволяет записать ABCD-матрицы слоев, а их перемножение – матрицу передачи среды. На примере численного эксперимента показано что, задавая соответствующие граничные условия, за короткое время прямым счетом можно рассчитать распределение электрического поля в двумерной дисперсионной неоднородной среде.

Источники финансирования

Статья подготовлена по итогам исследований, проведенных в рамках Проекта Российского фонда фундаментальных исследований №15-45-05119.

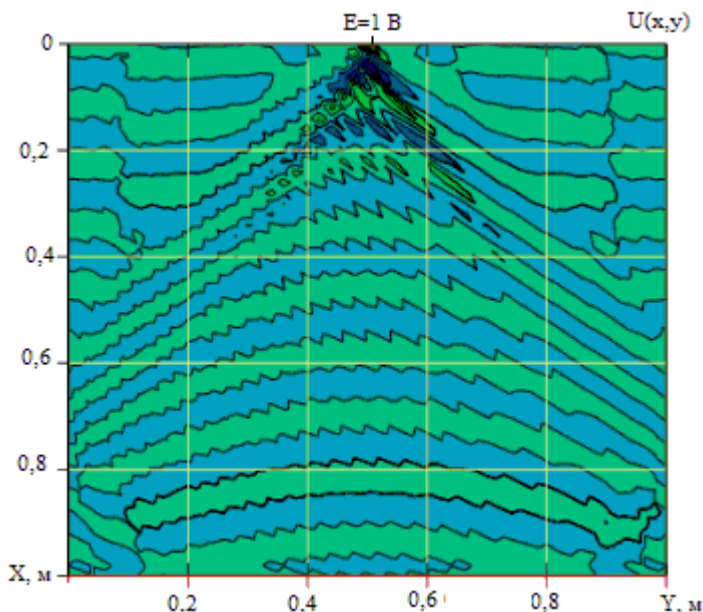


Рис. 3 – Распределение электрического поля $U(x,y)$ в двухмерной модели среды (размеры 1×1 м, $f=800$ МГц, $\epsilon=5$, $\sigma=10^{-2}$ См/м)

Fig. 3 – Distribution of electric field of $U(x, y)$ in two-dimensional model of the environment (the sizes of 1×1 m, $f=800$ MHz, $\epsilon=5$, $\sigma=10^{-2}$ Cm/m)

Список литературы

- [1] K. S.Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans. Antennas Prop., vol, AP-14, pp. 302-307< May 1966
- [2] Петров А.С., Иванов С.А., Королев С.А., Фасмович С.В. Метод матриц линий передачи в вычислительной электродинамике. // Зарубежная радиоэлектроника. 2002, №1, с. 3-38
- [3] Иванов С.А., Сестрорецкий Б.В. Метод импедансного аналога электромагнитного пространства для двухмерных задач электродинамики. // Журнал радиоэлектроники. 2007, № 5, с. 2-2.
- [4] Kogelnik H., On the propagation of Caussian beams of light through lenslike media including those with a loses or gain variation, Appl. Opt. 4, 1562, (1965)

References

- [1] K. S.Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media. IEEE Trans. Antennas Prop., vol, AP-14, pp. 302-307< May 1966
- [2] Petrov A.S., Ivanov S.A., Korolev S.A., Fasmovich S.V. Metod matric linij peredachi v vychislitel'noj jelektrodinamike. // Zarubezhnaja radiojelektronika. 2002, №1, s. 3-38

[3] Ivanov S.A., Sestroreckij B.V. Metod impedansnogo analoga jelectromagnitnogo prostranstva dlja dvuhmernyh zadach jelectrodinamiki. // Zhurnal radioelektroniki. 2007, № 5, s. 2-2.

[4] Kogelnik H., On the propagation of Gaussian beams of light through lenslike media including those with a losses or gain variation, Appl. Opt. 4, 1562, (1965)

Acknowledgements

The paper is based on the research results, which was conducted in the framework of project of the Russian Foundation for Basic Research №15-45-05119.

Crimea - local natural disasters and environmental safety

¹Volvach A.E., ¹Kurbasova G.S., ¹Volvach L.N., ¹Dmitrotsa A.I.,
¹Neyachenko D.I.

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
RAS, Yalta, Crimea
volvach@bk.ru

Abstract: The solution of the problem of forecasting catastrophic natural and man-made phenomena in the Crimea is connected with the organization of complex observations in a network of local geodynamic polygons. In the spectrum of time-frequency wavelet analysis of satellite data on the insolation of a land incident on the surface at the point Kara-Dag for the period from 1983.5 to 2005.5, the effects of regular geo-dynamic oscillations are found, and since 1999 - the oscillation of an unknown nature.

Keywords: insolation; geodynamic cycles; laser.

Крым – локальные природные катастрофы и экологическая безопасность

¹Вольвач А.Е., ¹Курбасова Г.С., ¹Вольвач Л.Н., ¹Дмитроца А.И.,
¹Неяченко Д. И.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики, ФГБУН «Крымская Астрофизическая
Обсерватория РАН», Ялта, Крым
volvach@bk.ru

Аннотация: Решение проблемы прогноза катастрофических природных и техногенных явлений в Крыму связано с организацией комплексных наблюдений в сети локальных геодинимических полигонов. В спектре частотно-временного вейвлет-анализа спутниковых данных об инсоляции падающей на поверхность земли в пункте Кара-Даг за период с 1983.5 по 2005.5 годы обнаружены эффекты регулярных геодинимических колебаний, и с 1999 года - колебание неизвестной природы.

Ключевые слова: геодинимика, РСДБ, лазерный дальномер

1. Введение

Крымский полуостров расположен вблизи границы Евразийской литосферной плиты. Деформации и движения этой плиты на длительном интервале времени оказывали и оказывают в настоящее время влияние на активизацию внутри земных процессов (землетрясения, вулканы, сели). Комплексное изучение планетарных, региональных и местных геодинамических процессов является необходимым условием прогноза любых катастрофических природных явлений.

Влияние внешних и внутри земных процессов на климат и экологию Крыма по-разному проявляется на различных масштабах времени. Поэтому описание долговременных изменений и прогноз геофизических и климатических характеристик полуострова возможен по непрерывным наземным наблюдениям в течение многих лет. В то же время, большинство метеостанций создано лишь недавно, а самые старые, где накоплены многолетние наблюдения, расположены в больших городах, где с развитием энергетики стал формироваться особый микроклимат, существенно отличающийся от климата окружающих территорий. С конца 1970-х годов на помощь климатологам пришли спутники. Однако и они не решают всех проблем. В частности, им недоступны скрытые сплошной облачностью территории. Кроме того, спутниковые измерения выполняются дистанционно косвенными методами, и на их точность влияет множество трудно учитываемых факторов — от поглощения света в атмосфере до ошибок в калибровке бортовых приемников излучения. Поэтому данные космического мониторинга надо постоянно сверять с наземными измерениями. Ещё большие трудности заключаются в сборе данных о магнитном поле, роли которого в формировании локальных климатических и геофизических характеристик в последнее время уделяется большое внимание. Решение проблемы прогноза локальных природных катастроф и экологически вредных техногенных факторов определяется работой сети непрерывно действующих локальных геодинамических полигонов оснащённых современным комплексным экспериментальным оборудованием.

2. Экспериментальная база геодинамических наблюдений

Для изучения возникающих и развивающихся деформационных процессов, движений литосферных плит создаются геодинамические полигоны, экспериментальное оборудование которых реализует проведение комплексных наблюдений методами радио интерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ), лазерной локации искусственных спутников (ЛЛС),

спутниковых систем GPS и ГЛОНАСС. На рис.1 показано полное оснащение и взаимосвязь узлов экспериментального оборудования геодинимического полигона. Комплексные высокоточные наблюдения в сети таких полигонов позволяют решать следующие задачи глобальной геодинимики:

- установление, поддержание и распространение высокоточных небесной и земной систем координат;
- определение параметров вращения Земли (координат полюса, углов процессии и нутации);
- установление, поддержание и распространение Всемирного времени; развитие и поддержание эталонной базы единой системы времени и эталонных частот, средств синхронизации [6];
- построение высокоточной динамической системы координат и ее реализация в виде теории движения тел Солнечной системы;
- определение параметров гравитационного поля Земли.

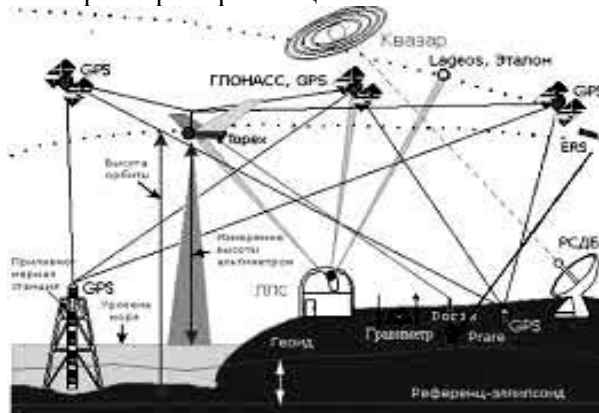


Рис.1. Комплексное оборудование геодинимического полигона.

Fig.1. Complex equipment of geodynamic range.

В Крыму создан и частично оснащён необходимой аппаратурой для комплексных наблюдений геодинимический полигон «Симеиз - Кацивели». В настоящее время проводимые на этом полигоне наблюдения участвуют в решении задач геодинимического и экологического мониторинга при международном взаимодействии [8]. Долговременные наблюдательные программы, в которых участвуют десятки стран и многие международные и национальные организации, основаны на достижениях Глобальной навигационной спутниковой системы ГНСС: GPS (США) и ГЛОНАСС (РФ).

Проводимые на полигоне «Симеиз-Кацивели» наблюдения по согласованным международным программам в настоящее время служат для научных исследований. В то же время положение Крыма вблизи разлома Евразийской плиты и усиленное освоение территории полуострова строительными комплексами требует создания комплексной сети локальных геодинамических станций, прогнозирующих возможности и экологическую безопасность для проведения геодезических, строительных и сельскохозяйственных работ. Изучение местных нерегулярных изменений фигуры Земли, гравитационных, магнитных и сейсмических полей, местных и общих деформаций земной коры необходимо для прогноза землетрясений путём выявления района с аномальными значениями этих параметров. Комплексное изучение планетарных, региональных и местных геодинамических процессов является необходимым условием прогноза катастрофических природных явлений [1].

Глобальные геодинамические циклы в характеристиках климата Крыма. Климатическая система Земли формируется при активном участии всех геосфер планеты: атмосферы, океаносферы, криосферы, поверхности континентов, литосферы, антропоферы [2].

В последнее время резко возросла актуальность изучения геодинамических процессов, происходящих в приповерхностных геологических структурах на локальных территориях, которые характерны для городов и зон расположения крупных инженерных сооружений. При этом особое внимание в составлении долговременных локальных прогнозов уделяется использованию спутниковых климатических параметров подверженных гелио геодинамическим воздействиям [9, 10]. Анализ изменений в структуре долговременных непрерывных рядов наблюдений устанавливает присутствие аномалий.

Любые энергетические изменения в глобальных гелио геодинамических циклах сказываются на атмосферных процессах и влияют на климатические параметры [12, 13]. В настоящей работе обсуждаются возможности установления этой связи методом частотно-временного непрерывного вейвлет-анализа.

Анализ данных SSE показал, что локальные геологические особенности, техногенные факторы, а также региональная и глобальная активность эндогенных процессов Земли способствуют неравномерному распределению инсоляции, падающей на поверхность земли Крыма [3, 11]. Авторы настоящей статьи ранее обнаружили по данным SSE аномальный рост инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг [11]. Наглядное представление о спектральном составе этих данных даёт контурный график на рис.2.

В результате анализа рис.3 обнаружено присутствие в спектре данных регулярных колебаний, коррелирующих с основными геодинамическими процессами. В конце общего временного интервала (с 1999 года) поддается колебание неизвестной природы.

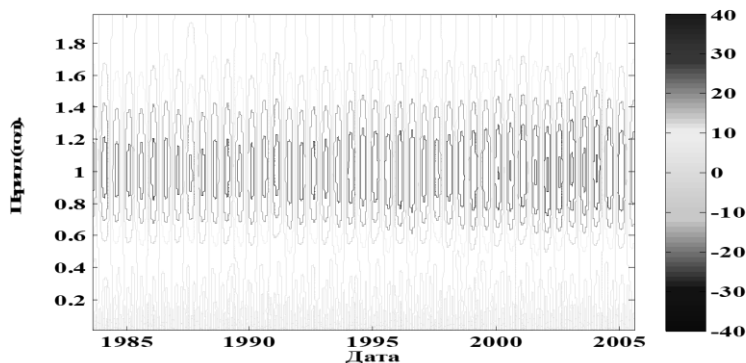


Рис.2. Частотно-временной непрерывный вейвлет-анализ данных об инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг (вейвлеты 'paul'). Контурный график.

Fig.2. Time-frequency continuous wavelet analysis of the data on insolation of the surface of the earth at the point Kara-Dag (wavelets 'paul'). Contour schedule.

Так как в других пунктах полуострова в данных об инсоляции поверхности земли подобное колебание не обнаружено, предположение о роли особой геологической структуры Кара-Дага, высказанное авторами в предыдущих публикациях [11], остаётся в силе.

3. Заключение

1. Актуальность проблемы создания сети локальных геодинамических полигонов и единого центра обработки наземных и спутниковых наблюдений климатических, геодинамических и гелиогеофизических наблюдений необходимо, в связи с прогрессирующим нарастанием различного рода критических деформаций земной поверхности Крыма, а также сопровождающими эти деформации разрушениями различных объектов жизнеобеспечения людей и ухудшением экологической обстановки.

2. Комплексное изучение планетарных, региональных и местных геодинамических процессов является необходимым условием прогноза любых катастрофических природных явлений.

3. Предполагается связь внешнего источника генерации колебания, которое обнаруживается с 1999 года в данных об инсоляции падающей на поверхность земли, с особой геологической структурой Кара-Дага.

Список литературы

- [1]. Авсюк Ю.Н. Приливные силы и природные процессы. М.: Объединённый институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН. 1996. - 186 с.
- [2]. Берри Б. Л. Синхронные процессы в оболочках Земли и их космические причины // Вестник МГУ. 1991. Сер. 5, №1. С. 20-27.
- [3]. Курбасова Г.С., Вольвач А.Е. Вейвлет-анализ наземных и космических измерений локальной инсоляции // Космическая наука и технология. 2014. Т. 20. № 4. С. 42–49.
- [4]. Курбасова Г.С., Вольвач А.Е. Многолетние изменения геомагнитного поля Крыма / Сб.ст. по материалам XXVI МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «Естественные и математические науки в современном мире». №1(25) . Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015. С. 184-192.
- [5]. Курбасова Г.С., Вольвач А.Е. Геомагнитное поле и климат Кара-Дага: когерентные колебания. / Сб.ст. по материалам XXVIII МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «Естественные и математические науки в современном мире» № 3 (27). Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015.С. 84-90
- [6]. Курбасова Г.С., Вольвач А.Е. Время ГЛОНАСС: вейвлет-анализ данных С1. / Сб.ст. по материалам XXIX МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «Естественные и математические науки в современном мире». №4(28) . Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015. С. 62-69.
- [7]. Курбасова Г.С., Вольвач А.Е., Корсакова С. П. Температура поверхности земли в «Никитском ботаническом саду». / Сб.ст. по материалам XXX МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «Естественные и математические науки в современном мире». №5(29) . Новосибирск: Изд. «СибАК», 2015. С. 205-213.
- [8]. Региональная система геодинамического и экологического мониторинга Крыма с использованием GNSS // Пояснительная записка Междисциплинарной проблемно-ориентированной программы. – Х., К.: ГАО НАНУ, 2002. – 71 с.
- [9]. Сидоренков Н. С. Атмосферные процессы и вращение Земли. –СПб. Гидрометеоиздат. 2002, 200 с.
- [10]. Сидоренков Н.С. Лунно–солнечные приливы и атмосферные процессы //Природа, №2, 2008, С.23 – 31.
- [11]. Kurbasova G.S., Vovach A.E. The insolation anomalies on the Crimean peninsula with observations from space // CriMiCo2014, Conference Proceedings – Sevastopol: Weber Publishing. 2014. – Vol.2. P.1085-1086.
- [12]. Kurbasova G.S., Korsun A.A., Rykhlova L.V., Rybalova M.N., Shlikar G.N. Statistical Correlations between 10 – Year Variations of Annual Mean Geodynamical, Geophysical, and Heliophysical Data. //Astronomy Reports. 1997. Vol. 41, No. 1. P.128-134.
- [13]. Kurbasova G.S., Korsakova S.P., Rybalova M.N., Shlikar G.N. Correlations of Changes in the Earth's Rotational Velocity and Some Climate Characteristics: Spectral Estimation in Two_Channel Autoregression Models //Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, 2011, Vol. 107, pp. 90–97.

References

- [1]. Avsyuk Yu.N. Tidal forces and natural processes. M.: United Institute of Physics of the Earth. O. Yu. Schmidt of the Russian Academy of Sciences. 1996. - 186 p.
- [2]. Berry BL Synchronous processes in the Earth's shells and their cosmic causes // Vestnik MGU. 1991. Ser. 5, №1. Pp. 20-27.
- [3]. Kurbasova GS, Volvach AE Wavelet analysis of terrestrial and cosmic measurements of local insolation // Space Science and Technology. 2014. T. 20. № 4. P. 42-49.
- [4]. Kurbasova GS, Volvach AE Long-term changes in the geomagnetic field Kry-ma / Sat.st. On materials of the XXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE "Natural and mathematical sciences in the modern world". №1 (25). Novosibirsk: Izd. "SibAK", 2015. S. 184-192.
- [5]. Kurbasova GS, Volvach AE Geomagnetic field and Kara-Dag climate: coherent oscillations. / Sat.st. Based on the materials of the XXVIII INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE "Natural and Mathematical Sciences in the Modern World" No. 3 (27). Novosibirsk: Izd. "SibAK", 2015. C. 84-90
- [6]. Kurbasova GS, Volvach AE Time GLONASS: wavelet analysis of data C1. / Sat.st. On the materials of the XXI International Scientific and Practical Conference "Natural and Mathematical Sciences in the Modern World". № 4 (28). Novosibirsk: Ed. "SibAK", 2015. pp. 62-69.
- [7]. Kurbasova GS, Volvach AE, Korsakova S, P. The temperature of the earth's surface in the Nikitsky Botanical Garden. / Sat.st. On the materials of the XXX INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL CONFERENCE "Natural and mathematical sciences in the modern world". № 5 (29). Novosibirsk: Izd. "SibAK", 2015. P. 205-213.
- [8]. Regional system of geodynamic and ecological monitoring of Crimea using GNSS // Explanatory note of the Interdisciplinary problem-oriented program. - H., K.: GAO NASU, 2002. - 71 p.
- [9]. Sidorenkov NS Atmospheric processes and rotation of the Earth. -PSP. Hydrometeorological. 2002, 200 p.
- [10]. Sidorenkov N.S. Lunar-solar tides and atmospheric processes // Nature, №2, 2008, p.23 - 31.
- [eleven]. Kurbasova G.S., Volvach A.E. The insolation of anomalies on the Crimean peninsula with observations from space // CriMiCo2014, Conference Proceedings - Sevastopol: Weber Publishing. 2014. Vol. P.1085-1086.
- [12]. Kurbasova G.S., Korsun A.A., Rykhlova L.V., Rybalova M.N., Shlikar G.N. Statistical Correlations between 10 - Year Variations of Annual Mean Geodynamical, Geophysical, and Heliophysical Data. // Astronomy Reports. 1997. Vol. 41, No. 1. P.128-134.
- [13]. Kurbasova G.S., Korsakova S.P., Rybalova M.N., Shlikar G.N. Correlations of Changes in the Earth's Rotational Velocity and Some Climate Characteristics: Spectral Estimation in Two_Channel Autoregression Models // Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, 2011, Vol. 107, pp. 90-97.

Investigation of combining sounding signals with continuous and discrete phase modulation advisability in SAR

Tarasenko A.M.

Joint-Stock Company «Radio Engineering Corporation «Vega»
Moscow, 121170, Russian Federation
asianna@list.ru

Abstract: In the article modulation of sounding signal by M-sequences and Legendre sequences was investigated. The impulse response was used for sounding signals comparison and evaluation their parameters. It is shown that applying of two or more sounding signal modulation methods in one SAR is expediently and realizable. This will allow to take advantages of each modulation methods and to obtain radar images with required characteristics.

Keywords: Synthetic Aperture Radar (SAR), modulation, impulse response, sidelobes, M-sequences, Legendre sequence, Jacobi sequence, LFM

Исследование целесообразности совмещения в РСА зондирующих сигналов с непрерывной и дискретной фазовой модуляцией

Тарасенко А.М.

Акционерное общество «Концерн радиостроения «Вega»
г. Москва, 121170, Российская Федерация
asianna@list.ru

Аннотация: Исследовалась внутриимпульсная модуляция сигнала M-последовательностями и последовательностями Лежандра. Для сравнения и оценки зондирующих сигналов использовалась функция отклика. Учитывалась сложность обнаружения сигнала и его устойчивость к распознаванию. Показана целесообразность применения в одном РСА двух или более способов модуляции зондирующего сигнала, чтобы максимально использовать преимущества, которые дает каждый из них для получения радиолокационного изображения с требуемыми характеристиками.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, РСА, зондирующий сигнал, внутриимпульсная модуляция, шумоподобные функции, M-последовательность, последовательность Лежандра, последовательность Якоби, ЛЧМ.

1. Введение

Поиск и последующее использование функции для модуляции зондирующего сигнала является важным этапом разработки космического РСА. Над решением этой задачи трудятся многие учёные [1,2]. Выбор сигнально-кодовой конструкции влияет на такие важные параметры радиолокатора как пространственное разрешение, радиометрические и энергетические характеристики.

Внутриимпульсная модуляция зондирующих сигналов различными функциями позволяет расширить спектр сигнала и улучшить разрешающую способности по дальности. Два наиболее распространённых способа модуляции – линейная частотная модуляция и фазовое кодирование.

2. ЛЧМ

Сигналы с ЛЧМ модуляцией традиционно используются в радиолокации и широко применяются в современных РСА [3]. При использовании ЛЧМ в качестве зондирующего сигнала максимальные боковые лепестки в сечениях по азимуту и дальности находятся в непосредственной близости от главного лепестка, что неприемлемо для решения задач обнаружения и распознавания сложных целей [4]. Для подавления боковых лепестков (БЛ) функции отклика ЛЧМ-сигнала применяются весовые функции, что позволяет снизить максимальный уровень бокового лепестка, но приводит к расширению главного лепестка функции отклика (ухудшение разрешающей способности) и снижению уровня главного максимума (ухудшение энергетических характеристик).

Другой серьёзной проблемой при применении ЛЧМ в РСА является возникновение неоднозначности по дальности в виду коррелированности зондирующих импульсов друг с другом.

3. ФКМ

Широкое практическое применение фазоманипулированных сигналов в системах обнаружения обусловлено относительно равномерным распределением боковых лепестков корреляционной функции при большом числе дискретов на всей временной плоскости, постоянством амплитуды сигнала, а также простотой его генерирования.

У фазоманипулированных сигналов минимально достижимый уровень боковых лепестков обратно пропорционален числу дискретов (базе

сигнала). Поэтому большее распространение получили фазоманипулированные сигналы с повышенным числом элементов, т.е. промодулированные более длинными кодами.

Применительно к задаче РСА двухпозиционная модуляция М-последовательностью (МП) обладает тем преимуществом, что позволяет модулировать серию импульсов зондирующего сигнала множеством некоррелированных между собой функций, обеспечивающих одинаковую базу сигнала.

В работах [4, 5] проведен анализ различных способов построения зондирующих сигналов на базе М-последовательностей.

Как и МП, последовательности Лежандра являются минимаксными [6]. В теории чисел символы Лежандра вводятся при рассмотрении уравнений второй степени:

$$x^2 \equiv n \cdot (\text{mod } N),$$

причем общий наибольший делитель $(n, N) = 1$. Решить данное уравнение означает найти такое x , при котором оно превращается в тождество. Уравнение имеет решения не при любых значениях n . Значения n , при которых уравнение имеет решения, называются квадратичными вычетами, а значения n , при которых уравнение не имеет решений, называются квадратичными невычетами. Символ Лежандра определяется как:

$$\Psi_n = \left(\frac{n}{N} \right) = 1, \text{ если } n - \text{квадратичный вычет по модулю } N;$$

$$\Psi_n = \left(\frac{n}{N} \right) = -1, \text{ если } n - \text{квадратичный невычет.}$$

Он определен для всех n , не делящихся без остатка на N , причем N – простое число, большее двух. Бинарная последовательность Лежандра $\{a_n\}$ формируется по правилу:

$$a_n = +1, \text{ если } n = 0 \text{ mod } N;$$

$$a_n = \Psi_n, \text{ если } n \neq 0 \text{ mod } N;$$

В отличие от М-последовательности, существует лишь одна последовательность Лежандра конкретной длины, однако разнообразие значений длин, для которых возможно их построение, гораздо больше. Так, на отрезке от 967 до 1091 существует 11 последовательностей Лежандра (их длины 967, 971, 983, 991, 1019, 1031, 1039, 1051, 1063, 1087,

1091), что делает возможным применение в РСА нескольких соседних по длине последовательностей, дополненных нулями, для модуляции зондирующих импульсов.

В ходе исследования АКФ для последовательностей Лежандра и их различных сдвигов выяснилось, что наименьший уровень боковых лепестков обеспечивает сдвиг этих последовательностей на четверть длины. Поэтому в дальнейшем последовательности Лежандра рассматривались с таким сдвигом.

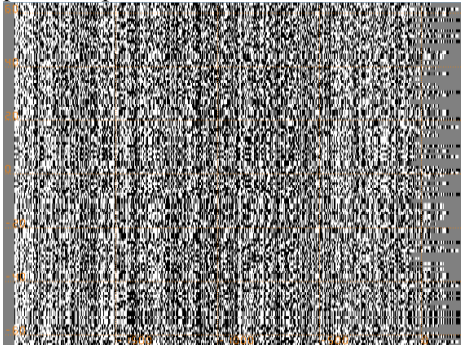


Рис. 1. Зондирующий сигнал, промодулированный последовательностями Лежандра чередующимися по случайному закону

Fig. 1. Sounding signal modulated by random Legendre sequences

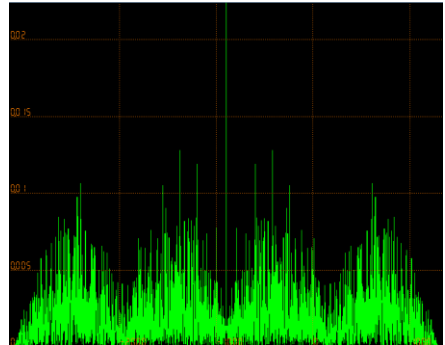


Рис. 2. Главное сечение двумерной функции отклика по дальности для последовательностей Лежандра, чередующихся по случайному закону

Fig. 2. Main range cut of two-dimensional impulse response for random Legendre sequences alternation

Для расширения набора модулирующих функций можно дополнить эти последовательности последовательностями Якоби.

Также представляют интерес коды Голда – тип псевдослучайных последовательностей, которые могут быть сгенерированы путем суммирования по модулю 2 двух М-последовательностей одинаковой длины. Результирующие коды Голда имеют ту же самую длину, что и исходные М-последовательности.

Значимость этих последовательностей обусловлена их очень низкой взаимной корреляцией. Коды Голда пользуются популярностью в современных CDMA системах. Они используются в глобальной спутниковой навигационной системе GPS для разделения сигналов космических аппаратов, в 3G системе мобильной связи стандарта WCDMA для скремблирования CDMA кодов.

Таблица 1. Показатели качества радиолокационного изображения в зависимости от вида модуляции зондирующего сигнала

Table 1. Indications of radar image quality for different sounding signal types

	ФКМ, М-последовательности PCM, M-sequences (1023)	ФКМ, последова- тельности Лежандра PCM, Legandre sequences	ЛЧМ LFM
Максимальный уровень БЛ, дБ Peak side lobe level, dB	-40,63	-37,86	-13,6/ -42,33*
Интегральный уровень БЛ, дБ Integral side lobe level, dB	-6,05	-8,35	-7,47/ -10,16*
			*with Hamming window

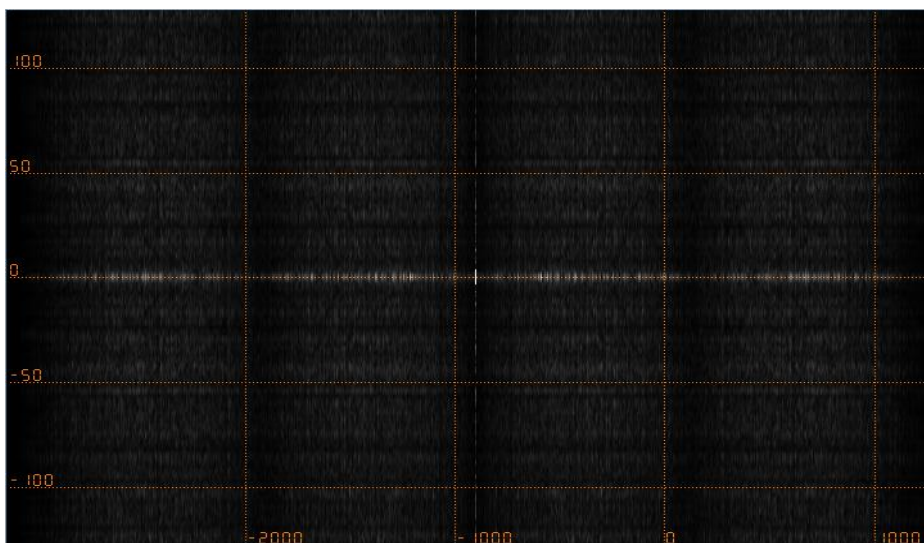


Рис.3 Вид двумерной функции отклика для последовательностей Лежандра, чередующихся по закону чисел

Fig.3 Two-dimensional impulse response for random Legandre sequences alternation

При модуляции зондирующего сигнала стохастическими функциями, рассмотренными в [8], и последовательностями Лежандра получаемая функция отклика РСА на одиночную точечную цель имеет низкий уровень максимальных боковых лепестков, сравнимый с достигаемым при использовании композиционного сигнала на базе М-последовательностей.

Заключение

Боковые лепестки у шумоподобных сигналов во всей полосе изображения, в которой определена функция отклика, имеют вид нормального шума с мощностью, постоянной по азимуту и убывающей при удалении от максимума по дальности, и не имеют локальных максимумов, как в случаях ЛЧМ, М-последовательностей и их ансамблей. Вопрос выбора взвешивающих функций требует дальнейшей проработки.

Использование шумоподобных сигналов и сигналов, модулированных М-последовательностями, целесообразно для задач обнаружения и распознавания объектов в виду низкого уровня максимальных боковых лепестков.

Параметры функции отклика для последовательности Лежандра свидетельствуют о том, что этот вид псевдослучайных последовательностей может быть интересен для применения в РСА и заслуживает более подробного изучения.

Для задач определения границ раздела сред и других, требующих высокого радиометрического разрешения, предпочтение следует отдать регулярным функциям, в частности ЛЧМ, т.к. она обеспечивает наиболее низкий интегральный уровень боковых лепестков функции отклика.

Применение стохастических функций для модуляции зондирующих сигналов РСА обеспечивает подавление помех неоднозначности по дальности без необходимости применения специальных алгоритмов.

Шумоподобные сигналы имеют преимущества при проведении скрытой съемки, так как они малоотличимы от сигналов связанных станций.

Исходя из вышеизложенного, целесообразным является применение в одном РСА двух или более способов модуляции зондирующего сигнала, чтобы максимально использовать преимущества, которые дает каждый из них для получения радиолокационного изображения с требуемыми характеристиками.

Предложенные сигналы были сформированы на несущей частоте с использованием одной ПЛИС, что позволяет осуществить в ближайшем будущем разработку радиолокатора, в котором, кроме хорошо изученной ЛЧМ, будет реализована возможность выбора другого закона формирования зондирующего сигнала в соответствии с целями съёмки и требованиями, предъявляемыми заказчиком к радиолокационным изображениям для решения практических задач.

Список литературы

- [1] Ajit K.S., Ganapati P., Pyari M. P. Generation of Pulse Compression Codes Using NSGA-II // IEEE Xplore Conference: India Conference (INDICON) 2009
- [2] Jonathan J., Kayo Y. The Peak Sidelobe Level of Families of Binary Sequences // IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 52, NO. 5, MAY 2006, P.2247-2254.
- [3] Levanon N., Mozeson E., Radar Signals // New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [4] Вакман Д.Е., Седлецкий Р.М., Вопросы синтеза радиолокационных сигналов // Москва: Советское радио.1973.
- [5] Тарасенко А.М. Исследование влияния способов формирования зондирующего сигнала космического РСА на качество радиолокационного изображения // Успехи современной радиоэлектроники, 2015, №5. С. 13-19
- [6] Кудря А.И., Толстов Е.Ф., Четверик В.Н. Расширение возможностей использования М-последовательностей в РСА // II Всероссийские Арmandовские чтения [Электронные ресурсы]: Радиофизические методы в дистанционном зонировании сред / Материалы V Всероссийской научной конференции. Муром. Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2012. –567 с. ISSN 2304-0297 (CD-ROM), с.518-531, 2012
- [7] Варакин Л.Е., Системы связи с шумоподобными сигналами // Москва: Радио и связь, 1985.
- [8] Тарасенко А.М. Исследование характеристик радиолокатора с синтезированной апертурой при модуляции зондирующего сигнала шумоподобными функциями // материалы международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2016

References

- [1] Ajit K.S., Ganapati P., Pyari M. P. Generation of Pulse Compression Codes Using NSGA-II // IEEE Xplore Conference: India Conference (INDICON) 2009
- [2] Jonathan J., Kayo Y. The Peak Sidelobe Level of Families of Binary Sequences // IEEE TRANSACTIONS ON INFORMATION THEORY, VOL. 52, NO. 5, MAY 2006, P.2247-2254.
- [3] Levanon N., Mozeson E., Radar Signals // New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.
- [4] Vakman D.E., Sedleckij R.M. *Voprosy sinteza radiolokacionnyh signalov* [Problems of radar signal synthesis]. Moscow, Sovetskoe radio, 1973.
- [5] Tarasenko A.M. [Researching of radar image quality dependence on sounding signal generation mode for spaceborne SAR]. *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*, 2015, no.5, pp. 13 - 19. (In Russian).
- [6] Kudrya A.I., Tolstov E.F., Chetverik V.N. *Rasshirenie vozmozhnostej ispol'zovaniya M-posledovatel'nosti v RSA* [Extended possibilities of using M-sequences in SAR].II *Vserossijskie Armandovskie chtenija [Jelektronnye resurs]: Radiofizicheskie metody v distancionnom zonirovanii sred / Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii. Murom. Izd.-poligraficheskij centr MI VIGU*, 2012. –567 p. ISSN 2304-0297 (CD-ROM), pp.518 - 531, 2012. (In Russian).
- [7] Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication system with noise-like signals]. Moscow, Sovetskoe radio, 1985.
- [8] Tarasenko A.M. Investigation of Synthetic Aperture Radar with Noise-type Signal Modulation Characteristics // conference proceedings of 27th Conference “Microwave & Telecommunication Tecnology” CriMiCo’2016 (in Russia)

Variability of Blazar AO 0235 + 164

¹Volvach A.E., ²Larionov M.G., ¹Volvach L.N.

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
RAS, Yalta, Crimea

² Astro Space Center, P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, 117997
volvach@bk.ru

Abstract: We present the results of multi-frequency long-term monitoring of the active galactic nucleus (AGN) 0235+164 from radio to gamma-ray wavelengths. We derive parameters of the orbital and precession motion of a binary super-massive black hole system (BSMBH) model, masses of the central BH and its companion, and time delays between flaring events at different wavelengths. The periods are similar to those reported for other AGN thought to be tight BSMBH systems in a state of merging. A cross-correlation analysis of the evolution of flares at different frequencies allows us to determine delays between flares at different frequencies. The dependence supports an intrinsic character of the variability of AGN at centimeter and shorter wavelengths that corresponds to the idea of the jet activity in AGN being connected with a “blob” of relativistic plasma propagating down the jet and becoming optically thin successively at longer wavelengths.

Keywords: blazar, radio sources, black hole.

Переменность блазара АО 0235+164

¹Вольвач А.Е., ²Ларионов М.Г., ¹Вольвач Л.Н.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики, ФГБУН «Крымская Астрофизическая
Обсерватория РАН», Ялта, Крым

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН,
Москва
volvach@bk.ru

Аннотация: Приведены данные анализа длительного многочастотного мониторинга активного ядра галактики (АЯГ) АО 0235+164 в широком диапазоне длин волн: от радио- до гамма-диапазона. Полученные периоды близки к аналогичным периодам в других ярких АЯГ, которые предположительно являются тесными двойными системами из сверхмассивных черных дыр (СМЧД) и находятся на стадии эволюции близкой к слиянию. По данным наблюдений развития вспышечных явлений на разных частотах проведен кросскорреляционный анализ и определены задержки смещения времени моментов вспышек, происходящих на разных длинах волн.

Ключевые слова: блазары, радиоисточники, черные дыры

1. Введение

Блазар АО 0235+164 является одним из ярчайших АЯГ и активно исследуется в широком диапазоне длин волн от радио- до гамма-диапазона. Он характеризуется значительным диапазоном переменности потока излучения на различных масштабах времени, компактностью структуры, высокой яркостной температурой, наличием компонент со сверхсветовыми движениями и значительной поляризацией радио- и оптического излучения. Как и для других ярких представителей АЯГ, переменное излучение АО 0235+164 может быть интерпретировано в рамках геометрической модели плазменного выброса – джета, ориентированного близко к лучу зрения, в котором присутствуют субсветовые движения материи. Релятивистскими доплеровскими эффектами объясняются предельно высокие яркостные температуры, получаемые по данным интерферометрических наблюдений и измерений на одиночных антеннах.

Принадлежа к семейству АЯГ блазар АО 0235+164 обнаруживает значительный уровень переменности потока излучения на различных временных интервалах от часов до десятков лет в различных диапазонах длин волн. Масштабы изменений потоков зависят от длины волны наблюдений. Так, в оптическом диапазоне колебания потока излучения почти на порядок выше, чем на миллиметровых и сантиметровых длинах волн. По данным наземных интерферометрических и космических наблюдений следует, что АО 0235+164 является очень компактным объектом со структурой на масштабах менее тысячной угловой секунды дуги, что приводит к значениям яркостной температуры в источнике, превышающей $T_j = 6 \times 10^{13}$ К [1, 2]. Видимые сверхсветовые движения компонент (до 30 с) дают высокие значения Доплер (D) и Лоренц-фактора (γ) (16 и более). Это указывает на небольшие углы между выбросами и направлением луча зрения наблюдателя. Эти углы составляют величину около 3° [3]. Еще более значительные значения яркостной температуры АО 0235+164 получены из IDV наблюдений, по которым $T_j \geq 10^{17}$ К. Доплер-фактор, при этом, должен превышать значение 45, чтобы реальные температуры в объекте не превысили комптоновский предел [4].

2. Наблюдения

2.1. Наблюдения в радиодиапазоне.

Наблюдения на частотах 22.2 и 36.8 ГГц проводились с помощью 22-метрового радиотелескопа (РТ-22) Крымской астрофизической обсерватории при помощи модуляционных радиометров. Антенная температура от

источников измерялась известным методом “ON-ON”. Перед измерением интенсивности излучения положение источника уточнялось сканированием по прямому восхождению и склонению. Затем радиотелескоп устанавливался на источник поочередно одним и другим лепестками диаграмм направленности, формирующимися при диаграммной модуляции и имеющими взаимно-ортогональные поляризации. Антенная температура от источника определялась как разность между усредненными в течение 30 секунд откликами радиометра в двух различных положениях антенны. В зависимости от интенсивности излучения источника, проводились серии из 6-20 измерений, после чего рассчитывалось среднее значение сигнала, и оценивалась среднеквадратичная ошибка среднего. Ортогональная поляризация лепестков позволяла измерять полную интенсивность излучения от источника независимо от поляризации этого излучения. Поглощение излучения в атмосфере Земли учитывалось методом «разрезов атмосферы», производившихся через 3-4 часа.

Наблюдения на частотах 4.8 ГГц, 8 ГГц, 14.5 ГГц 26-м проводились на радиотелескопе РТ-26 радиоастрономической обсерватории Мичиганского университета. Методика наблюдений и обработка данных выполнялись по аналогичной схеме и представлены в [5].

2.2. Оптический диапазон длин волн.

Оптические данные в V полосе получены с помощью 1.5-метрового телескопа Каната в Хигаси-Хиросима обсерватории. Типичное время интегрирования составляло 90 с. Данные откорректированы за Галактическое поглощение.

Начиная с 2008 г. группа Бостонского университета ведет регулярные фотометрические и поляриметрические наблюдения АО 0235+164 на 1.8 м Перкинс телескопе Лоуэлл обсерватории (Флагстафф, Аризона, США), используя PRISM камеру. Камера оснащена призмой Волластона и поляриметром с вращающейся полуволновой пластинкой. Фотометрические измерения выполняются в BVRI фильтрах системы Джонсона дифференциальным методом, используя звезды сравнения 1, 2 и 3. Поляризационные параметры измеряются в фильтре R. Одно измерение степени и угла поляризации требует 4-х наблюдений потока на позиционных углах поляриметра 0, 90 и 45, 135 градусов. Для оценки инструментальной поляризации, которая не превышает 0.3%, и абсолютной поправки позиционного угла поляризации неполяризованные и поляризованные стандарты из списка звезд Шмидт и др. [6] наблюдаются каждую ночь. Более детальное описание наблюдений и обработки данных, получаемых с камерой PRISM, можно найти в Джоршадт и др. [7].

Данные в R полосе получены с помощью телескопов Liverpool и Цейсс-1000 CAO [8].

2.3. Инфракрасный диапазон длин волн.

Данные в J полосе получены с помощью 1.5-метрового телескопа Каната в Хигаси-Хиросима обсерватории [8]. Типичное время интегрирования составляло 85 сек.

2.4. Гамма диапазон длин волн.

Данные в гамма диапазоне получены с помощью космического гамма-телескопа Ферми LAT (Large Area Telescope) в диапазоне энергий от 20 МэВ до 300 ГэВ [8]. Обсерватория функционирует с 4 августа 2008 г. в режиме обзоров небесной сферы. Телескоп имеет поле зрения в 2.4 ср. Скорость покрытия всего неба составляет около 3 часов. Это позволяет наблюдать переменность плотности потока объектов на всем небе с высоким временным разрешением.

Наблюдения в гамма-диапазоне АЯГ АО 0235+164 начались, когда источник находился в состоянии вспышки. На рис. 1 приведены данные длительного мониторинга АО 0235+164 на всех длинах волн – от радиодиапазона до гамма-диапазона.

3. Сдвиги по времени между вспышечными явлениями на различных частотах

Вспышечные явления в АЯГ являются отражением активности во внутренних областях. Если говорить об ярких представителях АЯГ, то естественно эту активность связать с аккреционным диском центральной СМЧД и ее компаньоном. Точного механизма передачи активности в «джеты» мы не знаем, но активность в «джетах» доступна наблюдениям методом интерферометрии со сверхдлинными базами - РСДБ. Видимые сверхсветовые движения компонент в выбросах могут происходить с задержками между различными частотами. В процессе распространения облако плазмы расширяется, и становится доступным для наблюдений на более низких частотах. Величины задержек вспышек, наблюдаемые на одиночных радиотелескопах, дают дополнительную информацию о характеристиках среды «джетов» и об их динамике.

В 2007 г. на основе материалов длительного многочастотного мониторинга АЯГ 3С 454.3 нами была определена зависимость временных задержек появлений вспышечных явлений на разных частотах радиодиапазона относительно оптического диапазона длин волн. В работе [8] такая зависимость была аппроксимирована обратнологарифмической зависимостью.

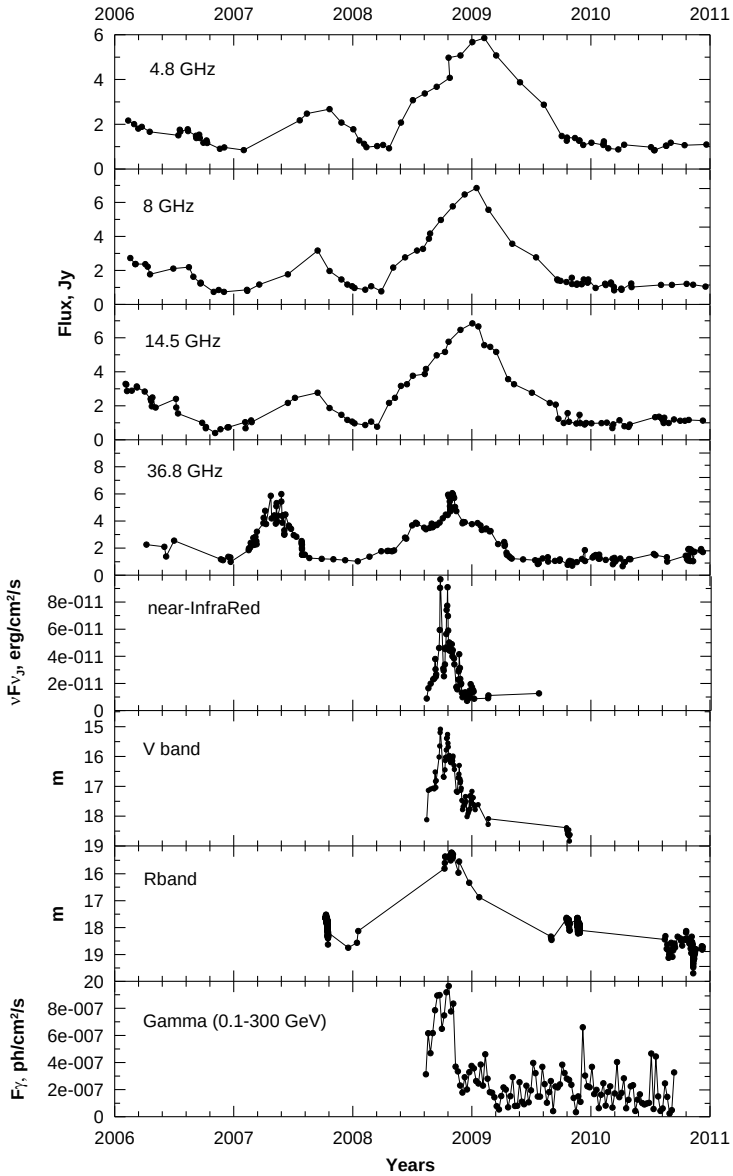


Рис. 1. Вспышечные явления в блазаре AO 0235+154.

Fig. 1. Flare phenomena in blasar AO 0235+154.

В нашем случае это соотношение вида:

$$\Delta T = \frac{0,25}{\log \nu},$$

где ΔT – задержка, выраженная в годах от начала вспышки в гамма-диапазоне, ν – частота наблюдений в ГГц.

Временные сдвиги были определены по вспышечным явлениям 2008-2009 гг. кросскорреляционным методом.

Мы имеем еще одно доказательство того, что при таком изменении задержек в зависимости от частоты, наблюдательные данные не свидетельствуют в пользу гипотезы переменности плотности потока АЯГ как следствие сцинтилляций в межгалактической среде, а скорее указывают на внутренние причины, вызывающие изменения плотности потока в АЯГ.

В работе [8] на основе анализа наблюдательных данных нами было высказано предположение о том, что задержки вспышечных явлений на разных частотах находятся в квадратичной зависимости от углов между направлением выбросов и лучом зрения наблюдателя. Согласно наблюдательным данным прогнозировалось, что эти углы в АО 0235+164 должны находиться в пределах (2° - 3°).

4. Заключение

1. Проанализированы данные длительных многочастотных наблюдений блазара АО 0235+164, выполненных во многих обсерваториях Мира от радио- до гамма-диапазона.

2. Получены свидетельства двойственности системы из СМЧД, выражающиеся в том, что гармоническим анализом установлены возможные значения орбитального и прецессионного периодов в системе, аналогичных тем, которые выявлены в других ярких представителях АЯГ.

3. Задержки во времени вспышечных явлений, возникающие в разных частотных диапазонах, соответствуют гипотезе перемещающегося по джету плазменного облака, просветляющегося последовательно на все более низких частотах. Это указывает скорее на внутренний характер переменности плотностей потоков в АЯГ.

4. Незначительное число ярких представителей АЯГ по отношению к общему числу массивных эллиптических галактик может объясняться их малым временем существования как тесных систем из СМЧД и механизмом излучения, происходящего из узкого конуса по направлению к наблюдателю.

Список литературы

- [1] Chen Y.J., Zhang F.Y., Sjouwermer L.O., *Astrophysics and Space Science*.—1999.—266.—P.495—505.
- [2] Frey S., Gurvits L.I., Altschuller R.D., et al., *Publications of the Astronomical Society of Japan*.—2000.—52.—P.975—982. [3] M. Sasada, M. Uemura, Y. Fukazawa, K.S. Kawabata, R.Itoh, I.Sakon, K. Fujisawa, A. Kadota, T. Ohsugi, M. Yoshida, H. Yasuda, M. Yamanaka, S. Sato, M. Kino, *PASJ*, 62, N.3, p.645 (2010).
- [3] Fujisawa K., Kobayashi H., Wajima K., et al., *Publications of the Astronomical Society of Japan*.—1999.—51.—P.537—545.
- [4] Raiteri C.M., Villata M., Ibrahimov M.A., et al., *Astronomy and Astrophysics*.—2005.—438.—P.39—53.
- [5] Aller M.F., Aller H. D., Hughes P.A., *Bull. Amer. Astron. Soc.*.—2001.—33.—P.1516.
- [6] Schmidt G.D., Elston R., Lupie O.L., *Astronomical Journal*.—1992.—104.—P.1563—1567.
- [7] Cohen R.D., Smith H.E., Junkarinen V.T., et al., *Astrophysical Journal*.—1987.—318.—P.577—584.
- [8] A.E. Vol'vach, M.G. Larionov, L.N. Vol'vach, A. La'hteenmäki, M. Tornikoski, M.F. Aller, H.D. Aller, and M. Sasada, *Astronomy Reports*, 2015, Vol. 59, No. 2, pp. 145–155.

References

- [1] Chen Y.J., Zhang F.Y., Sjouwermer L.O., *Astrophysics and Space Science*.—1999.—266.—P.495—505.
- [2] Frey S., Gurvits L.I., Altschuller R.D., et al., *Publications of the Astronomical Society of Japan*.—2000.—52.—P.975—982. [3] M. Sasada, M. Uemura, Y. Fukazawa, K.S. Kawabata, R.Itoh, I.Sakon, K. Fujisawa, A. Kadota, T. Ohsugi, M. Yoshida, H. Yasuda, M. Yamanaka, S. Sato, M. Kino, *PASJ*, 62, N.3, p.645 (2010).
- [3] Fujisawa K., Kobayashi H., Wajima K., et al., *Publications of the Astronomical Society of Japan*.—1999.—51.—P.537—545.
- [4] Raiteri C.M., Villata M., Ibrahimov M.A., et al., *Astronomy and Astrophysics*.—2005.—438.—P.39—53.
- [5] Aller M.F., Aller H. D., Hughes P.A., *Bull. Amer. Astron. Soc.*.—2001.—33.—P.1516.
- [6] Schmidt G.D., Elston R., Lupie O.L., *Astronomical Journal*.—1992.—104.—P.1563—1567.
- [7] Cohen R.D., Smith H.E., Junkarinen V.T., et al., *Astrophysical Journal*.—1987.—318.—P.577—584.
- [8] A.E. Vol'vach, M.G. Larionov, L.N. Vol'vach, A. La'hteenmäki, M. Tornikoski, M.F. Aller, H.D. Aller, and M. Sasada, *Astronomy Reports*, 2015, Vol. 59, No. 2, pp. 145–155.

The stations of the international radio service "KRIM": research of the Sun's activity

¹Volvach A.E., ¹Kurbasov G.V., ¹Yakubovskaya I.V.

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
RAS, Yalta, Crimea
volvach@bk.ru

Abstract: The perturbation caused by the solar flare is accompanied by the generation of lower-frequency radio emission, affects the biosphere and affects the quality of operation of many terrestrial and space equipment. Radio astronomy diagnostic system, based at the radio telescope RT-22 and three small radio telescopes, is integrated into the World Solar Service e-CALLISTO, which includes 14 ground stations in cooperation with the orbital observatory. It gave access to 24-hour daily volume of information in a wide range of wavelengths of the events that occur on the Sun and affect terrestrial processes. Four robotic telescopes of CrAO combined in "KRIM" Sun Service carry out solar observations in the mode of monitoring and alerts. Solar radio (monitoring) data are stored in a digital form and are exposed to the world solar service sites in real time.

Keywords: Sun, activity, radio.

Станции международной радиослужбы «KRIM»: исследование активности Солнца

¹Вольвач А.Е., ¹Курбасов С.В., ¹Якубовская И.В.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики, ФГБУН «Крымская Астрофизическая
Обсерватория РАН», Ялта, Крым
volvach@bk.ru

Аннотация: Возмущение, вызванное солнечной вспышкой, сопровождается генерацией радиоизлучения понижающейся частоты, воздействует на биосферу и влияет на качество работы многих устройств наземного и космического оборудования. Радиоастрономический диагностический комплекс, созданный на базе радиотелескопа РТ-22 и трех малых радиотелескопов, интегрирован во Всемирную Службу мониторинга солнечной активности, которая включает 14 наземных станций в кооперации с орбитальными обсерваториями. Четыре робот-радиотелескопа КрАО, объединенные в Службу Солнца «KRIM», ведут наблюдения Солнца

в режиме мониторинга и алертов. Данные радио мониторинга солнечной активности сохраняются в цифровом виде и выставляются на сайты мировой службы Солнца в реальном времени.

Ключевые слова: Солнце, активность, радио.

1. Введение

Возмущение физического состояния плазмы, вызванное солнечной вспышкой, распространяется через корону, достигает орбиты Земли, вызывает ряд геофизических явлений, воздействует на биосферу и на качество работы многих устройств наземного и космического оборудования. Последовательное пересечение уровней короны, с которых выходит радиоизлучение на данной частоте, приводит к образованию динамического спектра, представляющего собой зависимость интенсивности наблюдаемого сигнала от частоты со временем. По величине частотного дрейфа можно определить скорость потока частиц и предсказать время их прибытия в окрестности Земли, а по интенсивности всплеска оценить степень воздействия вспышки на земные процессы. Однако не все вспышки одинаково геоэффективны и, возможно, это отражается на свойствах сопутствующего динамического спектра.

Поэтому дистанционные системы контроля и управления, радиационная обстановка в ближнем космосе, навигация, системы посадки самолетов, радиосвязь и другие виды технической деятельности человечества подвержены влиянию солнечной активности. В связи с этим прогнозирование «космической погоды» имеет большое значение. Для получения систематических данных о состоянии солнечной активности в Крымской астрофизической обсерватории были сконструированы и длительное время эксплуатируются радиотелескопы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов волн.

2. Экспериментальная база наблюдений

Для получения систематических данных о состоянии солнечной активности в Крымской астрофизической обсерватории были сконструированы и длительное время эксплуатируются радиотелескопы сантиметрового, дециметрового и метрового диапазонов волн (Рис.1) [1].

Радиотелескопы РТ-2 на длину волны 3 и 5 см (Рис.2), и РТ-3 на 10.2 и 12 см (Рис.3) размещены под радио прозрачными куполами диаметром 6

м и представляют собой параллактические поворотные устройства с электрическим приводом по часовому углу, на которых укреплены параболические зеркала диаметром 2.5 м и 3 м с совмещенными облучателями на эти волны. Применяются радиометры модуляционного типа прямого усиления. Полоса пропускания каждого канала около 40 МГц, постоянная времени равна 1 с. Точность регистрации потока (ширина шумовой дорожки) определяется тропосферными флуктуациями и составляет около 0.2% потока Солнца. Сигнал дискретизируется на 1024 уровня (кванта) и запись осуществляется в цифровом виде с частотой отсчетов 1 Гц в дежурном режиме и с частотой 100 Гц в течение всплеска радиоизлучения для регистрации тонкой структуры события.

Современные средства регистрации и передачи данных позволяют автоматизировать процесс наблюдений и осуществлять экспресс-диагностику солнечных вспышек в режиме реального времени. Для обеспечения этой возможности была модернизирована система управления антенной радиотелескопа РТ-3. Разработана и изготовлена цифровая схема наведения телескопа на Солнце, приспособленная для проведения автоматических наблюдений без участия наблюдателя.

Вспышечное возмущение распространяется во внешние слои короны и генерирует при этом радиоизлучение понижающейся частоты, что дает динамический спектр, описывающий изменение интенсивности и частоты излучения со временем (Рис.5).



Рис.1. Радиотелескопы Службы Солнца КРАО.
Fig.1. Radio telescopes of the Sun Service.



Рис.2. Радиотелескоп на волны 3 и 5 см.
Fig.2. Radio telescope for waves of 3 and 5 cm.

По характеру спектра можно определить скорость распространения возмущения, генерируемую полосу частот, интенсивность энерговыведения и

другие сведения о физических условиях в солнечной короне. Для его регистрации служит радиоспектрограф CALLISTO, для которого разработана и изготовлена широкополосная антенна, являющаяся разновидностью синфазной решетки, состоящей из 116 диполей (Рис.4) и имеющей полосу пропускания от 250 до 350 МГц. По запаздыванию метрового излучения относительно сантиметрового определяется момент прихода корпускулярного потока на Землю (Рис.6). Интенсивность всплесков позволяет оценить ожидаемый масштаб геофизических возмущений.



Рис.3. Радиотелескоп на волны 10 и 12 см в радиопрозрачном куполе.

Fig.3. A radio telescope for waves of 10 and 12 cm.



Рис.4. Антенна радиоспектрографа.

Fig.4. An antenna of a radio spectrograph.

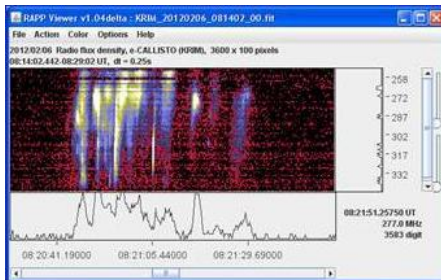


Рис.5. Динамический спектр
Fig.5. Dynamic spectrum.

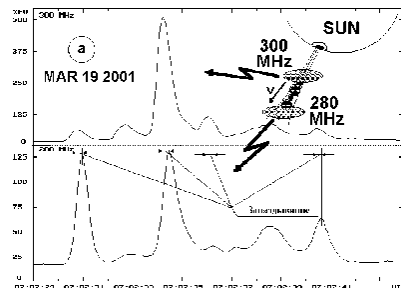


Рис.6. Запаздывание излучения на разных частотах.

Станции сети e-CALLISTO распределены по долготе по всему земному шару и оборудованы однотипными приемниками, имеющими узкую

полосу пропускания (300 кГц), центральная частота которой на большинстве станций быстро (за 0.25 с) перестраивается в широком диапазоне частот от 45 до 800 МГц. Узкая полоса пропускания способствует улучшению видимости интерференционной картины, а малая постоянная времени 1.25 мс позволяет выявить тонкую структуру интерференционных полос. Станция BLEN7M (Цюрих, Швейцария, географические координаты 8.11°E, 47°N, диапазон частот 45-870 MHz, дискретность оси времени 0.25 с) рекомендована организаторами сети в качестве базовой. Ее данные не фильтруются по признаку наличия оптической вспышки и полностью помещаются в доступный архив данных. Поэтому было признано целесообразным выбрать эту станцию как базовую и для поиска следов интерференции.

Станция KRIM (Крым, координаты 34°E, 44.4°N, 250-350 MHz, frequency resolution: 1 MHz, 0.25 с, включена в число выбранных станций в связи с тем, что применяемая на ней антенна достаточно эффективна даже для регистрации излучения невозмущенного Солнца, а разрешающая способность по частоте 1 МГц позволяет регистрировать тонкую структуру динамических спектров [2].

3. Всплеск радиоизлучения 15 марта 2013 г

Наряду с хорошо известными дрейфующими по частоте всплесками II и III типа динамические спектры содержат множество других деталей, происхождение которых иногда трудно объяснить. Например, если радиовсплеск появляется одновременно во всем частотном диапазоне спектрографа, то скорость частотного дрейфа такого события получается бесконечно большая и поэтому популярный механизм генерации радиоизлучения за счет распространения возмущения через солнечную атмосферу не в состоянии объяснить происхождение таких событий. По-видимому, во время вспышки в солнечной короне реализуются различные механизмы генерации радиоволн. Для анализа свойств этих механизмов рассмотрим некоторые особенности динамического спектра всплеска радиоизлучения 15 марта 2013 г, сопровождавшего оптическую вспышку класса M1.2, произошедшую в активной области 1692. Оптическая вспышка началась в 05:52, достигла максимума в 06:50 UT и закончилась в 07:30 UT. Наблюдался выброс корональной массы (СМЕ), направленный к Земле. На волне 10 см всплеск начался 06:31 UT, достиг максимума величиной 150 SFU в 06:49 UT и закончился в 06:51 UT. На метровых волнах (рис.7) наблюдалось продолжительное излучение IV типа, связанное с выбросом корональной массы, начавшееся в 06:15 и продолжавшееся до 08:09 UT.

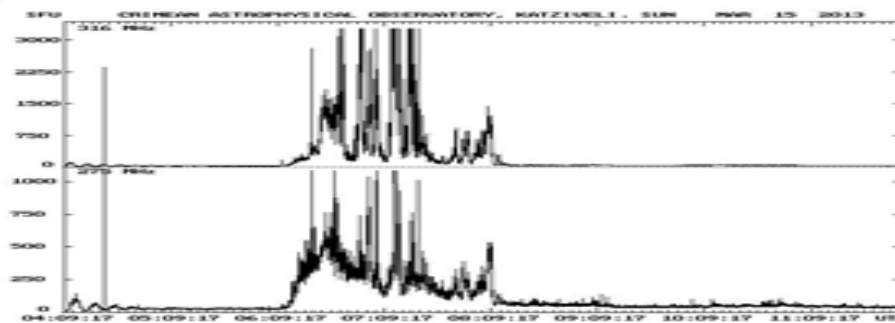


Рис.7. Общий вид радиовсплеска 15 марта 2013 г на фиксированных частотах 275 и 316 МГц.

Fig.7. The general view of the radio burst on March 15, 2013 at fixed frequencies of 275 and 316 MHz.

Вариации интенсивности этого излучения сопровождались эпизодическим появлением быстрых флуктуаций, состоявших как из «всплесков излучения» (кратковременных увеличений сигнала), так и из «всплесков поглощения» (резких уменьшений сигнала относительно текущего среднего уровня). Почти одновременное появление и исчезновение флуктуаций на удаленных станциях свидетельствует о том, что флуктуации имели астрофизическое происхождение, а не являлись результатом действия локальных радиопомех, одновременное возникновения которых в Европе и Азии на одной и той же частоте мало вероятно. Влияние шумов аппаратуры на качество записей спектра было незначительным в связи с тем, что средняя интенсивность всплеска превышала $1000 \cdot 10^{-22} \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{Гц})$.

Время появления вспышки попадало в интервал наблюдений большинства станций сети e-CALLISTO. Это позволило провести сравнение тонкой структуры динамических спектров, полученных одновременно в удаленных пунктах.

4. Цифровой архив данных

Архив содержит электронную базу данных о радиоизлучении Солнца на дециметровых и метровых волнах за период с 1983 по 2017 год включительно, и программное обеспечение (СУБД-систему управления базой данных). Особенностью архива является представление данных не только в виде наглядных графиков, но и в виде цифровых массивов, что дает возможность производить необходимую математическую обработку данных

(вычисление спектров, функций взаимной корреляции, распределений и т.д.). Программа обзора архива позволяет выбирать события по признакам (дата, поток, тип и т.д.), просматривать их целиком или по частям на экране и выводить в буферный файл для дальнейшей обработки.

5. Заключение

Радиоастрономический диагностический комплекс, созданный на базе радиотелескопа РТ-22 и трех малых радиотелескопов, интегрирован во Всемирную Службу мониторинга солнечной активности, которая включает 14 наземных станций в кооперации с орбитальными обсерваториями. Это дало доступ к 24-часовому ежедневному объему информации в широком диапазоне длин волн о событиях, которые происходят на Солнце и влияют на земные процессы. Четыре робот-радиотелескопа КрАО, объединенные в Службу Солнца «KRIM», ведут наблюдения Солнца в режиме мониторинга и алертов. Данные радио мониторинга солнечной активности сохраняются в цифровом виде и выставляются на сайты мировой службы Солнца в реальном времени.

Регулярное текущее обслуживание и модернизация радиотелескопов, предназначенных для осуществления Службы Солнца в КрАО, а также ежедневные наблюдения Солнца позволили получить высококачественные данные о свойствах солнечной активности.

Список литературы

- [1] Юровский Ю.Ф. // Кинематика и физика небесных тел. 2013. Т. 29. № 6. С.68.
- [2] А.Е. Вольвач, Ю.Ф. Юровский, К.В. Самисько, С.А. Самисько, И.В. Якубовская Мониторинг солнечной активности в радиодиапазоне станциями Службы Солнца “KRIM” // Изв. Крымской Астрофиз. Obs. 112, № 2, 179–186 (2016).

References

- [1] Yurovsky Yu.F. // Kinematics and physics of celestial bodies. 2013. T. 29. № 6. P.68.
- [2] A.E. Volvach, Yu.F. Yurovsky, K.V. Samisko, S.A. Samisko, I.V. Yakubovskaya Monitoring of solar activity in the radio range by the Sun Service stations "KRIM" // Izv. Crimean Astrophys. Obs. 112, No. 2, 179-186 (2016).

The "Simeiz-Katsiveli" range - study of geodynamic phenomena

¹Volvach A.E., ¹Kurbasova G.S., ¹Dmitrotsa A.I., ¹Neyachenko D.I.

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
RAS, Yalta, Crimea
volvach@bk.ru

Abstract: The Simeiz-Katsiveli helium-geodynamic range has been developed with the following types of observational facilities: Simeiz VLBI station, two laser satellite range-finders (Simeiz-1873, Katsiveli-1893), two GPS / GLONASS stations and a sea level sensor. Modernized and integrated with the World Solar Monitoring Service, the radio-telescope radiodiostomic diagnostic complex "KRIM" expanded with new robotic telescopes, created on the basis of the radio telescope RT-22 and three small radio telescopes RT-2, RT-3, RT-M. Simultaneous observations on four instruments, covering the wavelength range from 8 mm to 1.07 m, will allow obtaining high-quality data on the properties of solar activity. The Simeiz-Katsiveli helium-geodynamic range participates in international projects to support space-time reference systems for monitoring global changes and for accurate navigation in space, in the analysis of satellite observations of changes in the solar and climatic characteristics of the Crimea.

Keywords: geodynamic, VLBI, laser station.

Полигон «Симеиз-Кацивели» - исследование геодинамических явлений

¹Вольвач А.Е., ¹Курбасова Г.С., ¹Дмитроца А.И., ¹Неяченко Д. И.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики, ФГБУН «Крымская Астрофизическая Обсерватория РАН», Ялта, Крым
volvach@bk.ru

Аннотация: Создан гелио-геодинамический полигон «Симеиз-Кацивели», имеющий следующие типы наблюдательных средств: РСДБ-станция «Симеиз», два лазерных спутниковых дальномеры (Simeiz-1873, Katsiveli-1893), две станции GPS/GLONASS и датчик уровня моря. Модернизирован и интегрирован к Всемирной Службе мониторинга солнечной активности, расширенный новыми робот-телескопами радиоастрономический диагностический комплекс «KRIM», созданный на базе радиотелескопа RT-22 и трех малых радиотелескопов RT-2, RT-3, RT-M. Одновременные наблюдения на четырех инструментах, перекрывающие диапазон длин волн от 8 мм до 1.07 м, позволят получать высококачественные данные о

свойствах солнечной активности. Гелио-геодинамический полигон «Симеиз-Кацивели» участвует в Международных проектах по поддержке пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе, в анализе спутниковых наблюдений за изменением солнечных и климатических характеристик Крыма.

Ключевые слова: геодинамика, РСДБ, лазерный дальномер

1. Введение

Крымский полуостров расположен вблизи границы Евразийской литосферной плиты. Деформации и движения этой плиты на длительном интервале времени оказывали и оказывают в настоящее время влияние на активизацию внутри земных процессов (землетрясения, вулканы, сели). Комплексное изучение планетарных, региональных и местных геодинамических процессов является необходимым условием прогноза любых катастрофических природных явлений.

Влияние внешних и внутри земных процессов на климат и экологию Крыма по-разному проявляется на различных масштабах времени. Поэтому описание долголетних изменений и прогноз геофизических и климатических характеристик полуострова возможен по непрерывным наземным наблюдениям в течение многих лет. В то же время, большинство метеостанций создано лишь недавно, а самые старые, где накоплены многолетние наблюдения, расположены в больших городах, где с развитием энергетики стал формироваться особый микроклимат, существенно отличающийся от климата окружающих территорий. С конца 1970-х годов на помощь климатологам пришли спутники. Однако и они не решают всех проблем. В частности, им недоступны скрытые сплошной облачностью территории. Кроме того, спутниковые измерения выполняются дистанционно косвенными методами, и на их точность влияет множество трудно учитываемых факторов — от поглощения света в атмосфере до ошибок в калибровке бортовых приемников излучения. Поэтому данные космического мониторинга надо постоянно сверять с наземными измерениями. Ещё большие трудности заключаются в сборе данных о магнитном поле, роли которого в формировании локальных климатических и геофизических характеристик в последнее время уделяется большое внимание. Решение проблемы прогноза локальных природных катастроф и экологически вредных техногенных факторов определяется работой сети непрерывно действующих локальных геодинамических полигонов оснащённых современным комплексным экспериментальным оборудованием.

2. Экспериментальная база геодинамических наблюдений.

С целью исследования геодинамических явлений и влияния физических параметров Солнца на состояние экосистемы Земли создан гелио-геодинамический полигон «Симеиз-Кацивели», имеющий следующие типы наблюдательных средств: РСДБ-станция на базе телескопа РТ-22 «Симеиз», два лазерных спутниковых дальнометры («Simeiz-1873», «Katsively-1893») и две станции GPS/GLONASS («GPS-CrAO», «Katsively»), а также станции мониторинга солнечной активности с помощью радиотелескопов РТ-2, РТ-3, РТ-М в составе международной сети Службы Солнца.

Радиотелескопы РТ-2 на длину волны 3 и 5 см, и РТ-3 на 10.2 и 12 см размещены под радио прозрачными куполами диаметром 6 м и представляют собой параллактические поворотные устройства с электрическим приводом по часовому углу, на которых укреплены параболические зеркала диаметром 2.5 и 3 м с совмещенными облучателями на эти волны. Для регистрации в метровом диапазоне создан радиоспектрограф CALLISTO, для которого разработана и изготовлена широкополосная антенна, являющаяся разновидностью синфазной решетки, состоящей из 116 диполей и имеющей полосу пропускания от 250 до 350 МГц - радиотелескоп РТ-М.

Все станции космической геодезии и геодинамики входят в состав соответствующих международных служб.

Определена абсолютная скорость движения геодинамической станции «Симеиз» в системе ITRF97 равная 32.8 ± 0.9 мм/год в северо-восточном направлении [1, 2]. Тектоническое движение в восточном Средиземноморье сложное; оно является результатом взаимодействия Евразийской, Африканской и Аравийской плит (рис.1).

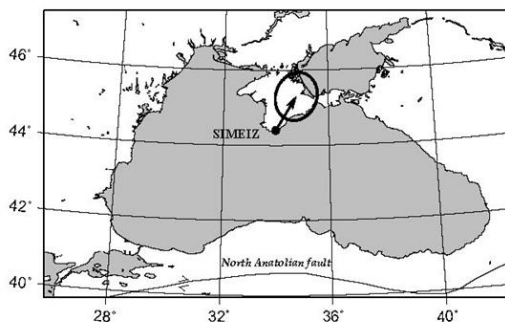


Рис.1. Изменения со временем горизонтальной компоненты координат станции Simeiz.

Fig.1. Changes in time with the horizontal component of the coordinates of the station Simeiz.

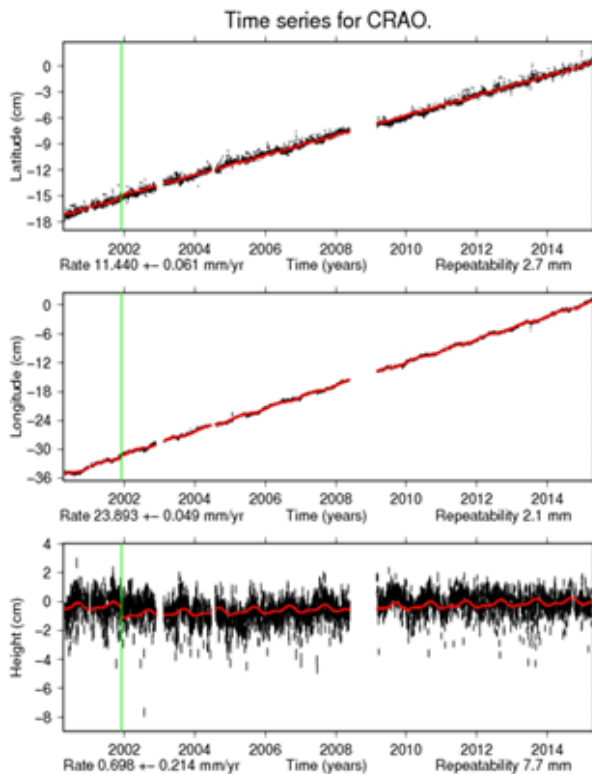


Рис.2. Изменения со временем северной, вертикальной и восточной компоненты координат станции GPS-CRAO

Fig.2. Changes with time of the northern, vertical and eastern components of coordinates of the GPS-CRAO station.

3. Международный проект DFG

РСДБ-станция «Симеиз» в Кацивели активно участвует в Международных проектах по поддержке пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе. Один из таких проектов разработан в отделе исследований DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft). Целью этого проекта является предоставление квазиинерциальной системы отсчета, реализованной согласованным положением квазара и земной системы отсчета на основе общего набора параметров и, в частности, на однородных геофизических моделях: «Океан», «Атмосфера», «Гидрология».

В 2015 году в центре внимания комбинационного центра (CC - Combination Centre) в DGFI-TUM (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) была реализация ITRS в виде DTRF2014. Для вычисления DTRF2014 предоставлены временные ряды данных на основе четырех космических геодезических методов GNSS, VLBI, SLR и DORIS. Эта реализация основана на одних и тех же входных данных, а именно ITRF2014 и JTRF2014. В настоящее время доступны шесть дополнительных лет наблюдений по сравнению с DTRF2008.

4. Глобальные геодинамические циклы в характеристиках климата Крыма.

Климатическая система Земли формируется при активном участии всех геосфер планеты: атмосферы, океаносферы, криосферы, поверхности континентов, литосферы, антропосферы. На формирование климатической системы влияют внешние силы: радиационные, приливные, гравитационные, электромагнитные. При этом наиболее изученным индикатором климатической изменчивости признана температура (приповерхностная температура воздуха и температура поверхности земли и океана).

В последнее время резко возросла актуальность изучения геодинамических процессов, происходящих в приповерхностных геологических структурах на локальных территориях, которые характерны для городов и зон расположения крупных инженерных сооружений. При этом особое внимание в составлении долгосрочных локальных прогнозов уделяется использованию спутниковых климатических параметров подверженных гелио геодинамическим воздействиям. Анализ изменений в структуре долгосрочных непрерывных рядов наблюдений устанавливает присутствие аномалий.

Любые энергетические изменения в глобальных гелио геодинамических циклах сказываются на атмосферных процессах и влияют на климатические параметры. В настоящей работе обсуждаются возможности установления этой связи методом частотно-временного непрерывного вейвлет-анализа.

Для анализа изменений локальных геофизических и климатических характеристик Крыма под влиянием глобальных и региональных геодинамических процессов нами использовался имеющийся в базе данных параметров наземной метеорологии и солнечной энергии (NASA, SSE - Surface meteorology and Solar Energy) 22- летний ряд климатологии (июль 1983 - июнь 2005), который обеспечивает глобальный охват по поверхности Земли

(на сетке один градус широты на один градус долготы) множества данных SSE [3].

Локальные геологические особенности, техногенные факторы, а также региональная и глобальная активность эндогенных процессов Земли способствуют неравномерному распределению инсоляции, падающей на поверхность земли Крыма. Авторы настоящей статьи ранее обнаружили по данным SSE аномальный рост инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг [3]. Наглядное представление о спектральном составе этих данных даёт рис.3. На этом графике по оси абсцисс отложены последовательные интервалы времени, соответствующие смещениям в непрерывном вейвлет-анализе. По оси ординат отложены величины периодов, вычисленные по алгоритму Паули устанавливающим соотношения между частотой (периодом) Фурье и масштабом в непрерывном вейвлет-преобразовании. Результаты анализа контурного графика устанавливают присутствие в спектре данных регулярных колебаний коррелирующих с основными геодинамическими колебаниями. В конце общего временного интервала (с 1999 года) подключается колебание неизвестной природы. Так как в других пунктах полуострова в данных об инсоляции земли подобное колебание не обнаружено, предположение о роли особой геологической структуры Кара-Дага, высказанное авторами в предыдущих публикациях [3], остаётся в силе.

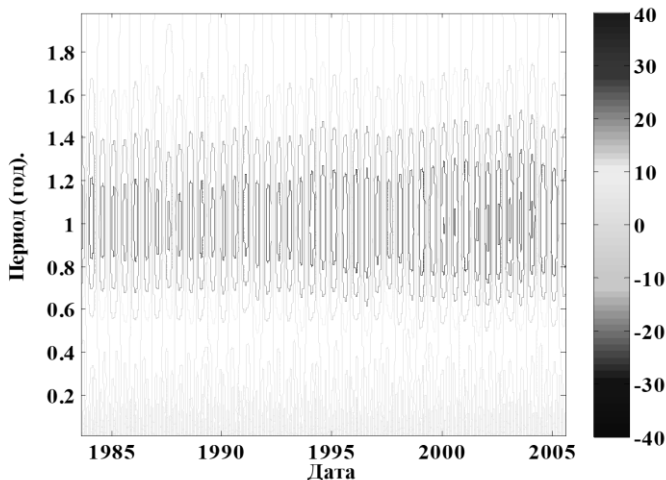


Рис.3. Частотно-временной непрерывный вейвлет-анализ данных об инсоляции поверхности земли в пункте Кара-Даг (вейвлеты 'paul'). Контурный график.

Fig.3. Time-frequency continuous wavelet analysis of the data on insolation of the surface of the earth at the point Kara-Dag (wavelets 'paul'). Contour schedule.

5. Заключение

1. Актуальность проблемы создания сети локальных геодинамических полигонов и единого центра обработки наземных и спутниковых наблюдений климатических, геодинамических и гелиогеофизических наблюдений необходимо, в связи с прогрессирующим нарастанием различного рода критических деформаций земной поверхности Крыма, а также сопровождающими эти деформации разрушениями различных объектов жизнеобеспечения людей и ухудшением экологической обстановки.

2. Комплексное изучение планетарных, региональных и местных геодинамических процессов является необходимым условием прогноза любых катастрофических природных явлений.

3. Граница тектонических плит связана с Северо-Анатолийским трансформным разломом. Анатолийский блок движется в западном направлении вдоль разлома. Его толкают в северном направлении Аравийская и Африканская плиты, что вызывает деформацию в южной части Евразийской плиты. Полученная горизонтальная скорость 2.8 ± 0.9 мм/год в направлении с азимутом 27° не противоречит этой модели.

Список литературы

- [1] L. Petrov, A. Volvach, N. Nesterov Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2001, 17, №5, P. 424-436.
- [2] A. E. Volvach, N. N. Gor'kavyi, A. I. Dmitrotsa, and L. S. Levitsky. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, 2009, 105, pp. 150–155.
- [3] Курбасова Г. С., Вольвач А. Е., Наука вчера, сегодня, завтра. № 5 (27). С.62-70. Часть I. Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2016. 136 с.

References

- [1] L. Petrov, A. Volvach, N. Nesterov Kinematics and Physics of Celestial Bodies. 2001, 17, №5, P. 424-436.
- [2] A. E. Volvach, N. N. Gor'kavyi, A. I. Dmitrotsa, and L. S. Levitsky. Bulletin of the Crimean Astrophysical Observatory, 2009, 105, pp. 150–155.
- [3] Kurbasova GS, Volvach AE, Science yesterday, today, tomorrow. No. 5 (27). P.62-70. Part I. Novosibirsk: Izd. ANS "SibAK", 2016. 136 p.

VLBI-Station "Simeiz": analysis of calculated additions to deformations of the Earth's surface

¹Volvach A.E., ¹Kurbasova G.S., ¹Strepka I.D., ¹Salamaschenko M.M.

¹ Radio Astronomy and Geodynamics Department, Crimean Astrophysical Observatory
RAS, Yalta, Crimea
volvach@bk.ru

Abstract: The radio telescope RT-22 in Katsively (VLBI-station "Simeiz") is actively participating in the International projects on the support of space-time reference systems for monitoring global changes and for accurate navigation in space. In this paper, we discuss the results of an analysis of the data on the variations in the corrections to the deformations of the Earth's surface at the point Katsively, calculated from the «Atmosphere» model of the DFG project (Deutsche Forschungsgemeinschaft) based on VLBI observations. The significant fluctuation with a period of 1 year in the eastern and vertical components was founded. In the northern component, there are no continuous periodic oscillations in the frequency interval under consideration. In addition to the annual wave, the model for $n = 2$ and $n = 3$ contains oscillations with periods of about 370, 353, 182 days, which is supposedly related to the dynamics of the motion of the Moon and the Earth around the Sun.

Keywords: geodynamic, VLBI, laser station.

РСДБ-станции «Симеиз»: анализ вычисленных дополнений к деформациям поверхности Земли

¹Вольвач А.Е., ¹Курбасова Г.С., ¹Вольвач Л.Н.,

¹Стрепка И.Д., ¹Саламашенко М.М.

¹ Отдел радиоастрономии и геодинамики, ФГБУН «Крымская Астрофизическая
Обсерватория РАН», Ялта, Крым
volvach@bk.ru

Аннотация: Радиотелескоп RT-22 в Кацивели (РСДБ-станция «Симеиз») активно участвует в Международных проектах по поддержке пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе. В настоящей работе обсуждаются результаты анализа данных о вариациях поправок к деформациям поверхности Земли в пункте Кацивели, вычисленных по модели «Атмосфера» проекта DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) на основе РСДБ наблюдений. Обнаружено существенное

колебание с периодом 1 год в восточной и вертикальной составляющих. В северной составляющей отсутствуют непрерывные периодические колебания в рассматриваемом интервале частот. Кроме годовой волны, модель при $n=2$ и $n=3$ содержит колебания с периодами около 370, 353, 182 суток, что предположительно связано с динамикой движения Луны и Земли вокруг Солнца.

Ключевые слова: геодинамика, РСДБ, лазерный дальномер

1. Введение

Земля деформируется под действием приливных сил. Под действием приливных сил вертикальные смещения земной поверхности могут достигать 50 см (при положениях Луны и Солнца в зените или надире), а горизонтальные - 5 см.

Приливные изменения силы тяжести на экваторе достигают 0.25 мгал, изменения отвесной линии - 0.01", а изменения наклонов земной поверхности, т.е. угла между поверхностью земли и отвесом - 0.02", приливные растяжения и сжатия поверхностных слоев Земли - порядка 10^{-8} .

Приливообразующая сила, вызванная Солнцем, несмотря на значительно большую массу Солнца, в среднем в 2.16 раза меньше приливообразующей силы, вызываемой Луной.

Влияние приливов на изменения местоположения пунктов на земной поверхности известно давно. Вследствие суточного вращения Земли и движения Земли, Луны и Солнца по своим орбитам приливообразующая сила в каждой точке на поверхности Земли непрерывно меняется во времени, никогда точно не повторяясь. Земля не является абсолютно твердым телом: под действием внешних сил расстояние между двумя произвольными точками изменяется. Если действие внешних сил прекращается, то точки не возвращаются в первоначальное положение, т.е. Земля остается в деформированном состоянии.

Другим аспектом использования наблюдений, связанных с земными приливами, является изучение внутреннего строения Земли.

Для обеспечения возможности сравнения различных результатов наблюдений требуется общая система координат. В настоящее время принята Международная земная система отсчета (International Terrestrial Reference System - ITRS) и её практическая реализация - Международная земная отсчетная основа (International Terrestrial Reference Frame - ITRF) [14]. Она реализуется в виде координат и скоростей некоторого набора глобально распределенных станций. Наиболее точную реализацию этой системы предоставляет Международная служба вращения Земли и опорных

систем координат (International Earth Rotation and Reference Systems Service - IERS). Параметры этой системы вычисляются как комбинация многих глобальных и региональных решений, полученных с помощью различных методов космической геодезии: радио интерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ, Very Long Baseline Interferometry - VLBI), лунных и спутниковых лазерных измерений (ЛЛЛ и ЛЛС, Lunar and Satellite Laser Ranging - LLR and SLR), Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС, Global Navigation Satellite System - GNSS) и навигационной системы доплеровской орбитографии и спутниковой радиолокации (Дорис, Doppler Orbitography Radio-positioning Integrated by Satellite - DORIS).

Положение пункта наблюдения в ITRF схематически приведено на рис.1.

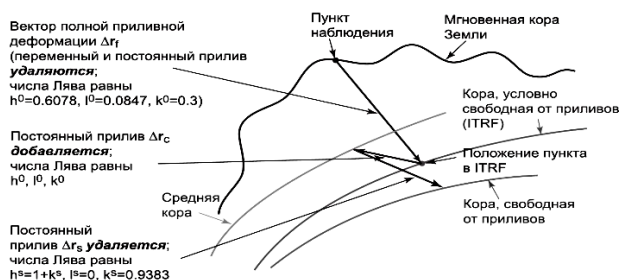


Рис. 1. Определение земной коры, "условно свободной от приливов", "свободной от приливов", и "средней" коры.

Fig. 1. Determination of the earth's crust, "conditionally free from tides," "free of tides," and "middle" crust.

Океаны оказывают значительное влияние на глобальные геофизические процессы Земли. Меняющееся распределение масс океанов вызывает изменение гравитационного поля Земли, что приводит к изменениям в системе центра масс океанов и, как следствие, приводит к изменениям в системе центра масс твердой Земли. Также изменяет нагрузку на океаническую кору, влияя тем самым как на вертикальное, так и горизонтальное положение наблюдательных станций, расположенных вблизи океана.

В атмосфере наряду с суточными колебаниями температуры воздуха существуют очень слабые суточные и сравнительно интенсивные полусуточные изменения приземного атмосферного давления. Выделение их затруднительно на фоне довольно интенсивных и беспорядочных погодных изменений. Амплитуда этих вариаций максимальна в тропической зоне

(около 1 мбар для полусуточной компоненты) и сильно уменьшается при удалении в область умеренных и высоких широт.

В гидросфере происходит постоянное перераспределение масс, связанное с изменениями уровня подземных вод, изменениями массы воды в реках и озёрах. Кроме того, существуют деформации земной поверхности, связанные с давлением на грунт, оказываемым жилыми зданиями и промышленными объектами, особенностями современного тектонического процесса, характерного для данного региона. Центр глобальных геофизических жидких оболочек Земли (Global Geophysical Fluid Center - GGFC) Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS) предоставляет сообществу данные о деформациях поверхности земли, связанные с региональной гидрологией. Деформации поверхности земли могут служить предвестниками экологических катастроф. Поэтому регулярные наблюдения за их изменениями и изучение характера этих изменений в локальном пункте необходимы для прогноза экстремальных событий.

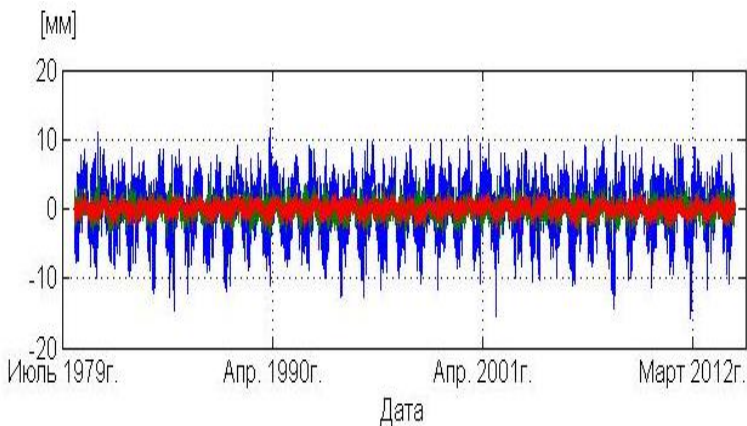


Рис. 2. Дополнения к деформациям (модель «Атмосфера») поверхности земли РСДБ – станции «Симеиз»: вертикальные (dUp) – синий цвет, северные (dN) – зелёный цвет, восточные (dE) – красный цвет.

Fig. 2. Additions to deformations (model "Atmosphere") of the surface of the earth VLBI - Stations "Simeiz": vertical (dUp) - blue, northern (dN) - green, eastern (dE) - red.

Наблюдения, полученные различными методами космической геодезии в межконтинентальных сетях, обрабатываются в центре глобальных геофизических жидких оболочек Земли (GGFC) Международной службы вращения Земли и опорных систем координат (IERS). GGFC предоставляет

сообществу модели геодезических эффектов (вращения Земли, силы тяжести и деформации) за счет временного перераспределения геофизических жидкостей Земли.

РСДБ-станция «Симеиз» в Кацивели активно участвует в Международных проектах по поддержке пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе [1,2]. Один из таких проектов разработан в отделе исследований DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft). Целью этого проекта является предоставление квазиинерциальной системы отсчета, реализованной согласованным положением квазара и земной системы отсчета на основе общего набора параметров и, в частности, на однородных геофизических моделях: «Океан», «Атмосфера», «Гидрология» [3,4].

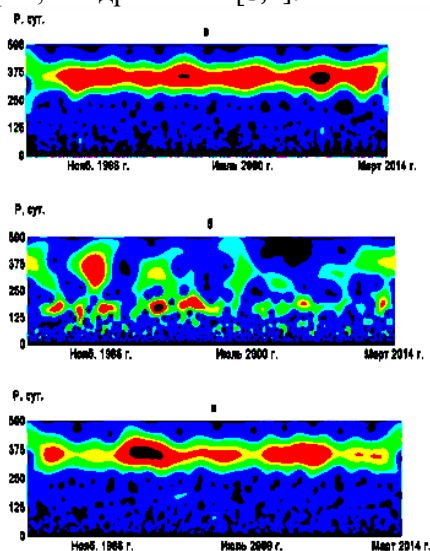


Рис. 3. Непрерывный частотно-временной вейвлет – анализ (вейвлеты 'morl') деформаций поверхности земли РСДБ – станции «Симеиз» (модель «Атмосфера»): а – вертикальные (dUp0), б – северные (dN0), в – восточные (dE0).

Fig. 3. Continuous frequency-time wavelet analysis (wavelet 'morl') of the surface deformations of the VLBI - Simeiz station (model Atmosphere): a - vertical (dUp0), b - northern (dN0), east - dE0).

В 2015 году в центре внимания комбинационного центра (CC - Combination Centre) в DGFI-TUM (Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut) была реализация ITRS в виде DTRF2014. Для вычисления DTRF2014 были предоставлены временные ряды данных на основе четырех космических

геодезических методов GNSS, VLBI, SLR и DORIS. Эта реализация основана на одних и тех же входных данных, а именно ITRF2014 и JTRF2014. В настоящее время доступны шесть дополнительных лет наблюдений по сравнению с DTRF2008.

2. Характеристики исходных данных и методы анализа

Нами использовались данные службы IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service: Geophysical fluids data) [5]. Исходные данные представлены в виде трёх временных рядов отклонений dUp (вертикальные), dN (северные), dE (восточные) с интервалами между отсчётами 0.25 суток. На рис. 2,3 приведены графики анализируемых данных.

Дальнейшее усложнение модели ($n=2,3$) вносит не существенные, в пределах точности исходных данных, поправки за счёт выявления дополнительных колебаний, физическая реальность существования которых связана с движением Земли и Луны.

3. Заключение

1. Международная земная опорная система (ITRF) представляет собой набор точек с их 3-мерными декартовыми координатами, которые реализуют идеальную систему отсчета. Однако в условиях все возрастающих возможностей для наблюдений, а также учитывая социальные и научные цели, необходима поддержка пространственно-временных справочных систем для мониторинга глобальных изменений и для точной навигации в космосе, которые должны соответствовать требуемому уровню точности, гарантирующему прочную основу для измерения эффектов глобальных изменений и для высокоточной навигации вблизи Земли и в глубоком космосе. Вклад различных научных организаций, исследующих проблемы в геодезических, астрономических и космических науках, позволяет организовать комплексную междисциплинарную поддержку справочных систем. Этот скоординированный подход позволяет добиться более глубокого понимания Земли как целостной системы.

2. Квази-инерциальная система отсчёта DTRS, реализованная в отделе исследований DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft), включает поправки к деформациям Земли, вычисленные с помощью однородных геофизических моделей: «Океан», «Атмосфера», «Гидрология». Анализ трёх временных рядов поправок к деформациям Земли станции РСДБ «Симеиз»,

вычисленных по модели «Атмосфера» за период 1980 – 2014 годы, обнаружил существенное колебание с периодом 1 год в восточной и вертикальной составляющих (см. рис.3а, 3б). Параметры этого колебания для каждой составляющей поправок устойчивы к изменению порядка n синусоидальной модели (см. таб. 2,3). Кроме годовой волны, модель (2) при $n=2$ и $n=3$ содержит колебания с периодами около 370, 353, 182 суток.

Список литературы

- [1].Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N. Simeiz 22-m radiotelescope as an IVS Network Station // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, edited by K. D. Baver, D. Behrend, and K. L. Armstrong, NASA/TP-2015-217522. – 2015. –P.160-163.
- [2].Volvach A.E., Kurbasova G.S., Dmitrosta A.I. Helio-geodynamic polygon "Simeiz-Katsively" for problems in astrophysics and geodynamics //CriMiCo2015 - 2015 25rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. Weber Publishing. –2015. –2.–P.1105-1109.
- [3].Seitz M., Bloßfeld M., Angermann D., et al. The new DGFI-TUM realization of the ITRS: DTRF2014 (data) // Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Munich, DOI:10.1594/PANGAEA.864046. –2016.
- [4].Seitz M., Kutterer H., Alkhatib H. Comparison of different combination strategies applied for the computation of terrestrial reference frames and geodetic parameter series // The first International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). International Association of Geodesy Symposia. –Springer. – 2015. –140. – P.57–64.
- [5]. <https://www.iers.org/ IERS/EN/ Organization/About/about.html>.

References

- [1].Volvach A.E., Kurbasova G.S., Volvach L.N. Simeiz 22-m radiotelescope as an IVS Network Station // International VLBI Service for Geodesy and Astrometry, edited by K. D. Baver, D. Behrend, and K. L. Armstrong, NASA/TP-2015-217522. – 2015. –P.160-163.
- [2].Volvach A.E., Kurbasova G.S., Dmitrosta A.I. Helio-geodynamic polygon "Simeiz-Katsively" for problems in astrophysics and geodynamics //CriMiCo2015 - 2015 25rd International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology, Conference Proceedings. Weber Publishing. –2015. –2.–P.1105-1109.
- [3].Seitz M., Bloßfeld M., Angermann D., et al. The new DGFI-TUM realization of the ITRS: DTRF2014 (data) // Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut, Munich, DOI:10.1594/PANGAEA.864046. –2016.
- [4].Seitz M., Kutterer H., Alkhatib H. Comparison of different combination strategies applied for the computation of terrestrial reference frames and geodetic parameter series // The first International Workshop on the Quality of Geodetic Observation and Monitoring Systems (QuGOMS'11). International Association of Geodesy Symposia. –Springer. – 2015. –140. – P.57–64.
- [5]. <https://www.iers.org/ IERS/EN/ Organization/About/about.html>.

4 × 4 method for calculating independent waves in an inhomogeneous ionospheric plasma

¹Moiseeva N.M., ²Moiseev A.V.

Volgograd State University
Volgograd, 400062, Russian Federation

¹moiseeva@volsu.ru

²anton_moiseev@volsu.ru

Abstract: The methods of classical electrodynamics in the IRI model consider the propagation of electromagnetic waves (EMW) in an inhomogeneous ionospheric gyrotopic plasma, for oblique incidence. The plane of incidence of the wave is oriented arbitrarily with respect to the direction of the magnetic field strength vector. A matrix WKB solution is obtained for the calculation of the projections of the electric and magnetic field strength vectors, the intrinsic waves of an anisotropic inhomogeneous plasma are obtained, the altitude-frequency characteristics for the ordinary and extraordinary waves are calculated with the angle between the EMW drop plane and the direction of the external magnetic field intensity vector.

Keywords: optical properties, wave propagation, mathematical methods in physics, inhomogeneous optical media, birefringence, plasma, IRI model.

Метод 4×4 расчёта независимых волн в неоднородной ионосферной плазме

¹Моисеева Н.М., ²Моисеев А.В.

Волгоградский государственный университет,
г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

¹moiseeva@volsu.ru

²anton_moiseev@volsu.ru

Аннотация: Методами классической электродинамики в модели IRI рассматривается распространение электромагнитных волн (ЭМВ) в неоднородной ионосферной гиротропной плазме, для наклонного падения. Плоскость падения волны ориентирована произвольным образом относительно направления вектора напряжённости магнитного поля. Получено матричное ВКБ решение для расчёта проекций векторов напряжённости электрического и магнитного полей, получены собственные волны анизотропной неоднородной плазмы, выполнен расчёт высотно-частотных характеристик для обыкновенной и необыкновенной волны

при изменении угла между плоскостью падения ЭМВ и направлением вектора напряжённости внешнего магнитного поля.

Ключевые слова: оптические свойства, распространение волн, математические методы в физике, неоднородные оптические среды, двулучепреломление, плазма, модель IRI.

1. Введение

В данной работе рассматривается распространение электромагнитной волны в неоднородной анизотропной ионосферной плазме. Профиль неоднородности определяется концентрацией электронов полученной с помощью модели IRI-2012.

2. Исследуемая модель

Рассмотрим наклонное падение плоской электромагнитной волны на слой ионосферной плазмы, который мы будем, приближенно, считать плоским. Плазма находится во внешнем магнитном поле $\vec{H}_{ext}$ и является гиротропной; угол χ между плоскостью падения и направлением вектора $\vec{H}_{ext}$ произвольный и не равен 90° . Тензор диэлектрической проницаемости неоднородной плазмы во внешнем магнитном поле имеет вид [1]:

$$\hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \sin^2 \chi + \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \cos^2 \chi & \frac{\omega_p^2}{2\omega^2 (\omega^2 - \omega_H^2)} \sin 2\chi & i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \sin \chi \\ \frac{\omega_p^2}{2\omega^2 (\omega^2 - \omega_H^2)} \sin 2\chi & 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \cos^2 \chi + \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \sin^2 \chi & -i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \cos \chi \\ -i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \sin \chi & i \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \cos \chi & 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - \omega_H^2} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Здесь $\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N_e(z)}{m}}$ – плазменная частота, $\omega_H = \frac{eH_{ext}}{mc}$ – гироскопическая частота. Функция профиля $N_e(z)$ определяет зависимость плазменной частоты от высоты $\omega_p(z)$. При некотором значении высоты концентрация электронов достигает максимума $N_{e,max}$. Ему соответствует частота плазменная $\omega_{p,max} = \sqrt{4\pi e^2 N_{e,max}} / m$. Изменение проекций векторов

$\vec{E}$ и $\vec{H}$ в среде, имеющей оптические свойства (1) будет определяться системой из четырёх ОДУ, которая следует из уравнений Максвелла:

$$\frac{d}{dz} \begin{pmatrix} E_y \\ H_x \\ H_y \\ E_x \end{pmatrix} = ik_0 \begin{pmatrix} 0 & -\mu & 0 & 0 \\ -\left(\varepsilon_{22} - \frac{\varepsilon_{23}\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} - \frac{\alpha^2}{\mu}\right) & 0 & \frac{\alpha\varepsilon_{23}}{\varepsilon_{33}} & -\left(\varepsilon_{21} - \frac{\varepsilon_{23}\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}}\right) \\ \left(\varepsilon_{12} - \frac{\varepsilon_{13}\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}}\right) & 0 & -\frac{\alpha\varepsilon_{13}}{\varepsilon_{33}} & \left(\varepsilon_{11} - \frac{\varepsilon_{13}\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}}\right) \\ -\frac{\alpha\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{33}} & 0 & \mu - \frac{\alpha^2}{\varepsilon_{33}} & -\frac{\alpha\varepsilon_{31}}{\varepsilon_{33}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_y \\ H_x \\ H_y \\ E_x \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Или
$$\frac{d\vec{Q}}{dz} = ik_0 \hat{A}(z) \vec{Q}. \quad (3)$$

Параметр $\alpha = \frac{k_{\parallel}}{k_0} = n_{\text{воз}}(z) \sin \theta(z) = \text{const}$; $k_{\parallel}$ - проекция волнового вектора на плоскость неоднородного слоя, параллельного поверхности Земли. Величина α постоянна, это следует из закона Снеллиуса. Компоненты $\varepsilon_{ij}(z)$ зависят от ω , z , от концентрации электронов N_e , а также от абсолютного значения вектора $\vec{H}_{\text{ext}}$. Матрицу $\hat{A}(z)$ запишем в виде:

$$\hat{A}(z) = \begin{pmatrix} 0 & -b & 0 & 0 \\ -c & 0 & g & -h \\ h & 0 & -d & e \\ g & 0 & f & d \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Параметры b, c, d, e, f, h, g в (4) являются функциями высоты z . Матрица $\hat{A}(z)$ имеет четыре собственных значения p_i :

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{d^2 + ef + bc + \sqrt{(d^2 + ef - bc)^2 + 4bh(fh - dg) - 4bg(dh + eg)}}{2}}, \quad (5a)$$

$$p_{3,4} = \pm \sqrt{\frac{d^2 + ef + bc - \sqrt{(d^2 + ef - bc)^2 + 4bh(fh - dg) - 4bg(dh + eg)}}{2}}. \quad (5b)$$

Все p_i - функции z . Этим значениям соответствуют 4 волны, вида:

$$\begin{pmatrix} E_{y,i} & H_{x,i} & H_{y,i} & E_{x,i} \end{pmatrix}^T e^{ik_0 \int_0^z p_i(\xi) d\xi}, \quad (6)$$

причём собственные значения $p_{1,3}$ соответствуют волнам, распространяющимся вверх, а $p_{2,4}$ - отражённым ионосферой волнам, распространяющимся к поверхности Земли. Волны, соответствующие $p_{1,2}$ являются необыкновенными, а волны, соответствующие $p_{3,4}$ - обыкновенными. В том случае, когда угол χ между вектором $\vec{H}_{ext}$ и плоскостью падения равен 90° собственные значения принимают вид: $p_{1,2} = \pm \sqrt{d^2 + ef}$, $p_{3,4} = \pm \sqrt{bc}$, а решения (6) – это волны ТЕ и ТМ. ВКБ-решение для ТЕ и ТМ волн в неоднородной анизотропной плазме было получено в работе [2]. Из четырёх функций, вида (6) и уравнений системы (1) следует фундаментальная матрица решения $\hat{Y}(z)$, вида [3]:

$$\hat{Y}(z) = \hat{F} \cdot \text{diag} \left[e^{ik_0 \int_0^z p_i(\xi) d\xi} \right]. \quad (7)$$

и матрица Коши: $\hat{N}(z, z_0) = \hat{Y}(z) \hat{Y}^{-1}(z_0)$ [4]. Матричная сшивка граничных условий: $\vec{Q}^{(t)}(z) = \hat{N}(z, 0) (\vec{Q}^{(i)}(0) + \vec{Q}^{(r)}(0))$ позволяет рассчитать амплитудные матрицы отражения и пропускания для волн произвольной поляризации. Для расчета амплитуд волн s- и p- поляризаций при любом значении z воспользуемся матрицей амплитудных коэффициентов для прошедшей волны [4]:

$$\begin{pmatrix} E_s^{(t)}(z) \\ E_p^{(t)}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{ss} & T_{sp} \\ T_{ps} & T_{pp} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_s^{(i)}(0) \\ E_p^{(i)}(0) \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Если падающая волна (при $z=0$) поляризована линейно и $\psi = 45^\circ$, тогда энергетические коэффициенты пропускания имеют вид:

$$\mathfrak{T}_s = (T_{ss} + T_{sp}) (T_{ss} + T_{sp})^* \frac{p_n}{p_0}, \quad (9)$$

$$\mathfrak{I}_p = (T_{ps} + T_{pp})(T_{ps} + T_{pp})^* \frac{p_n}{p_0}. \quad (10)$$

Здесь $p_0 = \frac{k_z(0)}{k_0}$, $p_n = \frac{k_z(z)}{k_0}$.

3. Результаты

По формулам (9) и (10) рассчитывались высотно-частотные характеристики при углах падения θ_i , принимающих значение 0° , 15° , 30° , 45° , угол $\chi = 75^\circ$. В качестве критерия остановки счёта использовался «машинный ноль».

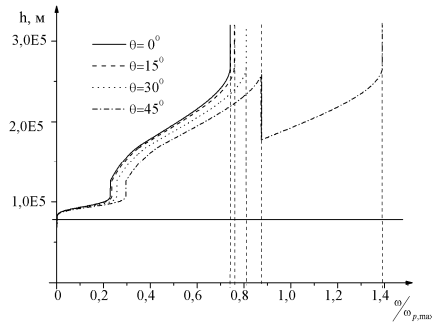


Рис. 1. Зависимость высоты максимума от частоты излучения для обыкновенной волны.

Fig. 1. The maximum height depending on the radiation frequency for the ordinary wave.

Графики $h(\omega)$ для «обыкновенной», соответствующей собственным значениям $p_{3,4}$, волны представлены на рис. 1. При малых θ_i частота отсечки оказывается меньше $\omega_{p,\max}$, а при $\theta_i = 45^\circ$ у зависимости появляется разрыв, а вертикальная асимптота смещается в сторону коротких длин волн: $\omega = \omega_{p,\max} / \sqrt{1 - n_{\text{гозо}}^2 \sin^2 \theta}$. Для случая «необыкновенной» волны, соответствующей собственным значениям $p_{1,2}$, высотно-частотные характеристики представлены на рис. 2. Графики расположены «ниже», чем в случае волны ТМ, а при $\theta_i = 45^\circ$ изменяется характер зависимости.

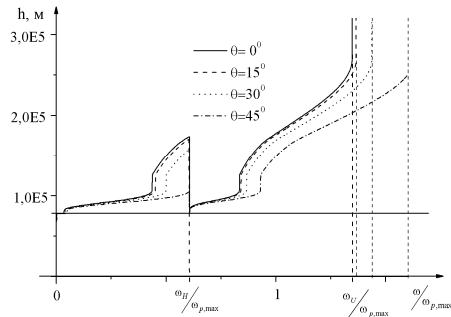


Рис. 2. Зависимость высоты максимума от частоты излучения для необыкновенной волны.

Fig. 2. The maximum height depending on the radiation frequency for the extraordinary wave.

4. Заключение

Получено матричное ВКБ- решение для ЭМВ, распространяющихся в неоднородной анизотропной среде, для произвольной ориентации оптической оси. Данный метод применен к гиротропной неоднородной ионосферной плазме в модели IRI2012. Получены высотно-частотные характеристики для двух типов собственных волн гиротропной среды.

Список литературы

- [1] Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П. Теория волн. – М. : Наука, 1979. -384 с.
- [2] Моисеева Н.М., Моисеев А.В. Применение метода ВКБ к расчёту векторов полей ТЕ и ТМ электромагнитных волн в анизотропной неоднородной плазме // 26-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2016)/ Материалы конференции. В 13 томах. 2016. С. 2584-2590.
- [3] Вазов В. Асимптотические приближения в решении обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир. 1969. 463 с.
- [4] Моисеева Н.М., Яцышен В.В. Эллипсометрия неоднородно-слоистой киральной среды //Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т.13. №4. С. 38-45.

References

- [1] Vinogradova M. B., Rudenko O. V., Suhorukov A. P. Teorija voln. – M. : Nauka, 1979. -384 p. (In Russian).
- [2] Moiseeva N.M., Moiseev A.V. The application WKB method to calculation of vector fields TE and TM electromagnetic waves in an anisotropic inhomogeneous plasma. CriMiCo

2016 - 26th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2016. pp. 2584-2590. (In Russian).

[3] Wasow W.R. Asymptotic expansions for ordinary differential equations. Interscience Publishers, 1965. 362 p.

[4] Moiseeva N.M., Yatshishen V.V. The ellipsometry of non-homogeneous layered ciral environments // Physics of wave propagation and radio systems, 2010, vol.13. no 4, pp 38-45. (in Russian).

The matrix method for calculating electromagnetic waves reflected by a planar inhomogeneous medium

¹Moiseeva N.M., ²Moiseev A.V.

Volgograd State University
Volgograd, 400062, Russian Federation

[¹moiseeva@volsu.ru](mailto:moiseeva@volsu.ru)

[²anton_moiseev@volsu.ru](mailto:anton_moiseev@volsu.ru)

Abstract: We consider the oblique incidence of a plane electromagnetic wave on a flat non-uniform uniaxial anisotropic layer. The optical axis of the anisotropic medium is not in the plane of incidence and orientation arbitrary manner in relation to it. We used the WKB method to obtained 4×4 matrix solution for calculating the vectors of the electric and magnetic fields in a heterogeneous medium - Cauchy matrix for an inhomogeneous layer. The matrices of the amplitude coefficients of reflection and transmission was calculated, were expressed through the matrix of the layer, are calculated for different inhomogeneity profiles, with a change in the angle of incidence and the direction of the optical axis.

Keywords: Anisotropy, optical properties, uniaxial medium, inhomogeneous medium, planar structures, gradient structures, WKB method.

Матричный метод расчёта электромагнитных волн, отражённых плоской неоднородной средой

¹Моисеева Н.М., ²Моисеев А.В.

Волгоградский государственный университет,
г. Волгоград, 400062, Российская Федерация

[¹moiseeva@volsu.ru](mailto:moiseeva@volsu.ru)

[²anton_moiseev@volsu.ru](mailto:anton_moiseev@volsu.ru)

Аннотация: Рассматривается наклонное падение плоской электромагнитной волны на плоский неоднородный анизотропный одноосный слой. Оптическая ось анизотропной среды не лежит в плоскости падения и ориентирование произвольным образом по отношению к ней. Методом ВКБ получено матричное 4×4 решение для расчёта векторов напряжённости электрического и магнитного

полей в неоднородной среде – матрица Коши для неоднородного слоя. Выполнен расчёт матриц амплитудных коэффициентов отражения и пропускания, выражающихся через матрицу слоя, для различных профилей неоднородности, при изменении угла падения и направления оптической оси.

Ключевые слова: анизотропия, оптические свойства, одноосная среда, неоднородная среда, планарные структуры, градиентные структуры, метод ВКБ.

1. Введение

Прогресс методов оптики и фотоники за последние три десятилетия привел к созданию принципиально новых устройств: оптических интегральных схем, высоко-отражающих покрытий, преобразователей фазы, поляризаторов, линий задержки оптических сигналов, оптических мультиплексоров, VCSEL. Их разработка чаще всего ведется на основе планарных неоднородных или слоистых структур. Для новой элементной базы фотоники применяются искусственные и природные материалы с необычными характеристиками, например, неоднородные материалы с анизотропией оптических свойств. Проектирование режимов работы планарных неоднородных анизотропных структур предполагает развитие математического аппарата, описывающего изменение векторов полей электромагнитной волны в среде.

В настоящем докладе предлагается матричная 4×4 запись метода ВКБ для расчета полей электромагнитной волны в неоднородном анизотропном одноосном слое в случае произвольной переменной ориентации оптической оси.

2. Постановка задачи

Рассмотрим наклонное падение плоской электромагнитной волны на планарную градиентную анизотропную структуру. Угол падения равен θ_i , k_0 волновое число для падающей волны. Тензор диэлектрической проницаемости среды недиагональный, то есть все $\varepsilon_{ij} \neq 0$, за исключением конечного числа значений z , где функции $\varepsilon_{ij}(z)$ могут обратиться в ноль, плоскость падения произвольным образом ориентирована по отношению к оптической оси анизотропной неоднородной структуры. Оптическая ось анизотропной среды не лежит в плоскости падения и ориентирована произвольным образом по отношению к ней, может менять своё направление при изменении координаты z . При падении на плоский слой волны ТЕ бу-

дуг отражаться ТЕ и ТМ волны и, наоборот, при падении ТМ волны отражённой будет не только волна ТМ, но и волна ТЕ. Рассмотрим случай, когда среда – диэлектрик и $\mu = 1$ – скаляр. Проекция векторов полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$ в слое определяются системой из четырёх ОДУ с переменными коэффициентами, которая следует из уравнений Максвелла:

$$\frac{d\vec{Q}}{dz} = ik_0 \hat{A}(z) \vec{Q}, \quad (1)$$

где $\vec{Q}(z) = (E_y \ H_x \ H_y \ E_x)^T$. Матрица $\hat{A}(z)$ представлена в работе [1] формулой (3). Для дальнейшей записи решения понадобится её краткая запись:

$$\hat{A}(z) = \begin{pmatrix} 0 & -b & 0 & 0 \\ -c & 0 & g & -h \\ h & 0 & -d & e \\ g & 0 & f & d \end{pmatrix}. \quad (2)$$

Для описания явления распространения ЭМВ в неоднородной анизотропной среде важен выбор базисных волн. Если в качестве базисных волн выбрать волны ТЕ и ТМ, то между ними будет происходить взаимодействие. На самом деле в анизотропной среде могут распространяться две волны: обыкновенная и необыкновенная, они в каждой точке среды независимы друг от друга, однако по причине неоднородности среды, поскольку все компоненты диэлектрического тензора зависят от координаты z , при каждом $z + \Delta z$, происходит двулучепреломление света. Обыкновенная волна преломляется на обыкновенную и необыкновенную, а необыкновенная также, аналогично, преломляется и порождает при изменении z две волны. При этом в каждой текущей точке z существует базис из двух независимых поляризаций. На практике это ведёт к рассеиванию света в неоднородной анизотропной среде. Базисные волнами записываются через

функции, вида: $S_j e^{ik_0 \int_0^z \lambda_j(\xi) d\xi}$ [2, с. 188]. При каждом z собственные значения находятся из характеристического уравнения: $\det(\hat{A}(z) - \lambda(z)\hat{I}) = 0$. Данное уравнение было сведено к уравнению:

$$(\lambda^2 + A\lambda + B)(\lambda^2 + C\lambda + D) = 0. \quad (3)$$

Для нахождения неизвестных A, B, C, D используем начальные приближения и поправки u, v, w :

$$\begin{aligned} A &= 0 + u, \\ B &= a^2 - b c + v, \\ C &= 2d - u, \\ D &= d^2 - e f + w. \end{aligned} \quad (4)$$

получим собственные значения системы (1):

$$\lambda_{1,2} = -\frac{u}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{u^2 + 4bc + 4v}, \quad (5.1)$$

$$\lambda_{3,4} = -\left(d - \frac{u}{2}\right) \pm \frac{1}{2} \sqrt{-4ud + u^2 + 4ef + 4w}. \quad (5.2)$$

В (5.1) и (5.2) u, v, w вычисляются по формулам:

$$u = -2 \frac{d f h^2 + b c h g + 3 d^2 h g - e f h g + d e g^2}{b^2 c^2 + 2 b c d^2 - 3 d^4 - 2 b c e f + 2 d^2 e f + e^2 f^2}, \quad (6.1)$$

$$v = \frac{h g}{d} + \frac{(3d^2 + ef - bc)(d f h^2 + b c h g + 3 d^2 h g - e f h g + d e g^2)}{d(b^2 c^2 + 2 b c d^2 - 3 d^4 - 2 b c e f + 2 d^2 e f + e^2 f^2)}, \quad (6.2)$$

$$w = -\frac{h g}{d} + \frac{(d^2 + ef - bc)(d f h^2 + b c h g + 3 d^2 h g - e f h g + d e g^2)}{d(b^2 c^2 + 2 b c d^2 - 3 d^4 - 2 b c e f + 2 d^2 e f + e^2 f^2)}. \quad (6.3)$$

Через функции $S_j e^{ik_0 \int_0^z \lambda_j(\xi) d\xi}$ проекции H_x и E_x , записываются в виде:

$$H_x = S_1 e^{ik_0 \int_0^z \lambda_1(\xi) d\xi} + S_2 e^{ik_0 \int_0^z \lambda_2(\xi) d\xi}, \quad (7.1)$$

$$E_x = S_3 e^{ik_0 \int_0^z \lambda_3(\xi) d\xi} + S_4 e^{ik_0 \int_0^z \lambda_4(\xi) d\xi}. \quad (7.2)$$

3. Амплитудные матрицы отражения и пропускания

Используя систему ОДУ (1), получили выражения для E_y и H_y , а также фундаментальную матрицу решения (ФМР) $\hat{Y}(z)$ для анизотропного неоднородного слоя. Матрица Коши $\hat{N}(z, 0)$ рассчитывается по ФМР по формуле: $\hat{N}(z, 0) = \hat{Y}(z)\hat{Y}(0)$ [3]. Расчёт проекций векторов $\vec{E}$ и $\vec{H}$ выполняется матричным методом: в любой плоскости $z = \text{const}$, вектор $\vec{Q}(z)$, составленный из проекций полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$, рассчитывается по формуле: $\vec{Q}(z) = \hat{N}(z, 0)\vec{Q}(0)$. Матрица отражения имеет вид:

$$\hat{R} = \hat{X}^{-1}\hat{S} = \begin{pmatrix} R_{ss} & R_{sp} \\ R_{ps} & R_{pp} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $\hat{S}$ и $\hat{X}$ выражаются через коэффициенты матрицы Коши по формулам:

$$\hat{S} = \begin{pmatrix} p_n(n_{11} + p_1 n_{12}) - (n_{21} + p_1 n_{22}) & \sqrt{\varepsilon_1}(p_n(n_{13} + q_1 n_{14}) - (n_{23} + q_1 n_{24})) \\ \sqrt{\varepsilon_n}(q_n(n_{31} + p_1 n_{32}) - (n_{41} + p_1 n_{42})) & \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_n}(q_n(n_{33} + q_1 n_{34}) - (n_{43} + q_1 n_{44})) \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$\hat{X} = \begin{pmatrix} -(p_n(n_{11} - p_1 n_{12}) - (n_{21} - p_1 n_{22})) & -\sqrt{\varepsilon_1}(p_n(n_{13} - q_1 n_{14}) - (n_{23} - q_1 n_{24})) \\ -\sqrt{\varepsilon_n}(q_n(n_{31} - p_1 n_{32}) + (n_{41} - p_1 n_{42})) & -\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_n}(q_n(n_{33} - q_1 n_{34}) - (n_{43} - q_1 n_{44})) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Символы p_1 , p_n , q_1 , q_n в (9) и (10) соответствуют обозначениям в [4, с. 73]. По формуле (8) был выполнен расчёт модулей амплитудных коэффициентов R_{ss} , R_{sp} , R_{ps} , R_{pp} для анизотропной искусственной среды с $\varepsilon_0 = 2$, $\varepsilon_e = 3$, $d = 10\lambda_0$. Оптическая ось составляет угол $\varphi = 45^\circ$ с осью OZ , и разветнута на угол χ . Угол χ меняет свое направление от $\chi = -45^\circ$ до $\chi = +45^\circ$, изменяясь линейно: $\chi = -\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2d}z$. Матрица амплитудных коэффициентов пропускания имеет вид:

$$\begin{pmatrix} T_{ss} & T_{sp} \\ T_{ps} & T_{pp} \end{pmatrix} = \frac{1}{2\cos\theta_n} \left(\hat{U}(\hat{R} + \hat{I}) + \hat{V}(\hat{R} - \hat{I}) \right), \quad (11)$$

где $\hat{I}$ -единичная матрица. $\hat{U}$ и $\hat{V}$ в (11) рассчитываются по формулам:

$$\hat{U} = \begin{pmatrix} (p_n n_{11} - n_{21}) & \sqrt{\varepsilon_1} (p_n n_{13} - n_{23}) \\ \sqrt{\varepsilon_n} (n_{31} q_n + n_{41}) & \sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_n} (n_{33} q_n + n_{43}) \end{pmatrix}, \quad (12)$$

$$\hat{V} = \begin{pmatrix} p_1 (p_n n_{12} - n_{22}) & -\sqrt{\varepsilon_1} q_1 (p_n n_{14} - n_{24}) \\ \sqrt{\varepsilon_n} p_1 (n_{32} q_n + n_{42}) & -\sqrt{\varepsilon_1 \varepsilon_n} q_1 (n_{43} q_n + n_{44}) \end{pmatrix}. \quad (13)$$

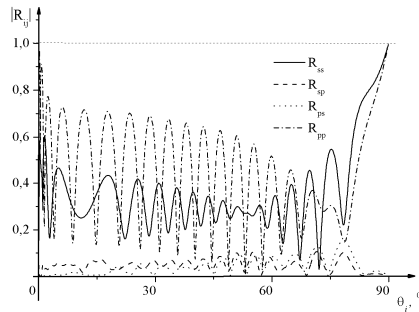


Рис. 1. Абсолютные значения амплитудных коэффициентов матрицы отражения (8).

Fig. 1. Modules of the amplitude coefficients of the reflection matrix (8).

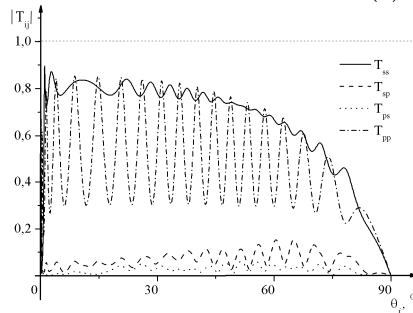


Рис. 2. Абсолютные значения амплитудных коэффициентов матрицы пропускания (10).

Fig. 2. Modules of the amplitude coefficients of the transmission matrix. (10).

Расчёт показывает, что изменение направления оптической оси относительно плоскости падения приводит к появлению кросс-поляризованных компонент, то есть, меняя угол между плоскостью падения ЭМВ и оптической осью, можно из волны ТЕ получать волну ТМ, и наоборот. Метод согласуется с законом сохранения энергии.

3. Практические результаты

Выполнен расчёт матриц амплитудных коэффициентов отражения и пропускания, выражающихся через матрицу Коши, для неоднородной анизотропной среды с переменным направлением оптической оси, при изменении угла падения.

4. Заключение

Полученный матричный метод позволяет рассчитывать оптические высокоотражающие и просветляющие покрытия, оптические модуляторы, фазовращатели, поляризаторы, и различные новые устройства на основе холестерических жидких кристаллов.

Список литературы

- [1] Моисеева Н.М., Моисеев А.В. Применение метода ВКБ к расчёту векторов полей ТЕ и ТМ электромагнитных волн в анизотропной неоднородной плазме // 26-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2016)/ Материалы конференции. В 13 томах. 2016. С. 2584-2590.
- [2] Вазов В. Асимптотические приближения в решении обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: Мир. 1969. 463 с.
- [3] Моисеева Н.М., Яцышен В.В. Эллипсометрия неоднородно-слоистой киральной среды // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т.13. №4. С. 38-45.
- [4] Born M., Wolf E. Principles of Optics (4th.ed.). Pergamon Press. 1970. 808 p.

References

- [1] Moiseeva N.M., Moiseev A.V. The application WKB method to calculation of vector fields TE and TM electromagnetic waves in an anisotropic inhomogeneous plasma. CriMiCo 2016 - 26th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2016. pp. 2584-2590. (In Russian).
- [2] Wasow W.R. Asymptotic expansions for ordinary differential equations. Interscience Publishers, 1965. 362 p.
- [3] Moiseeva N.M., Yatshishen V.V. The ellipsometry of non-homogeneous layered chiral environments // Physics of wave propagation and radio systems, 2010, vol.13. no 4, pp 38-45. (in Russian).
- [4] Born M., Wolf E. Principles of Optics (4th.ed.). Pergamon Press. 1970. 808 p.

Aerological ensuring the first launch of Soyuz-2.1a rocket from Vostochny spaceport

Plokhikh O.V., Ivanov V.E.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin
Ekaterinburg, 620002, Russian Federation
o.v.plohih@urfu.ru, v.e.ivanovpekt@gmail.com

Abstract: Information about structure and characteristics of upper-air sounding system of the Vostochny spaceport is provided in the report. This system is intended for meteorological ensuring of space rocket launches. Results of upper-air sounding for ensuring the "Soyuz-2.1a" rocket launching are discussed. These soundings are compared to calculations of average long-term aerological parameters from the reference atmosphere model. Possibilities of the upper-air sounding system and methods of different subsystem data integration are discussed. In conclusion the possible directions of development and improvement of the Vostochny spaceport upper-air sounding system are discussed.

Keywords: upper-air sounding systems, radiosonde, satellite radio navigational systems, GLONASS, GPS, space rocket.

Аэрологическое обеспечение первого пуска РН «Союз-2.1а» с космодрома «Восточный»

Плохих О.В., Иванов В.Э.

Уральский федеральный университет имени первого Президента
России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
o.v.plohih@urfu.ru, v.e.ivanovpekt@gmail.com

Аннотация: В докладе приведены сведения о составе и характеристиках системы аэрологического зондирования атмосферы космодрома «Восточный». Эта система предназначена для метеорологического обеспечения пусков ракет. Далее в докладе обсуждаются результаты зондирования для обеспечения пуска ракеты-носителя «Союз-2.1а». Данные зондирования сравниваются с расчетами средних многолетних значений метеопараметров по справочной модели атмосферы. Обсуждаются возможности системы зондирования и методы комплексирования данных разных подсистем. В заключение обсуждаются возможные

направления развития и совершенствования системы аэрологического зондирования атмосферы космодрома «Восточный».

Ключевые слова: *системы радиозондирования атмосферы, радиозонд, спутниковые радионавигационные системы, ГЛОНАСС, GPS, ракета космического назначения.*

1. Введение

28 апреля 2016 года был выполнен первый пуск ракеты космического назначения (РКН) «Союз-2.1а» с космодрома «Восточный». Получение необходимой для пуска информации о состоянии атмосферы обеспечивала разработанная для космодрома комплексная система аэрологического зондирования атмосферы (САЗА) [1, 2]. Наиболее точные результаты определения вертикальных профилей температуры, влажности, скорости и направлении ветра, давления воздуха и других параметров обеспечивают системы радиозондирования (СР) определяющие параметры атмосферы путем контактных измерений с помощью аэрологических радиозондов (АРЗ) запускаемых различными методами доставки в свободную атмосферу [3]. В России наибольшее распространение получили СР радиолокационного (угломерно-дальномерного) типа. За рубежом широко применяют навигационные СР, измеряющие координаты и скорость АРЗ по сигналам спутниковой навигационной системы GPS. В РФ разработана аналогичная отечественная СР «Полус», использующая сигналы ГЛОНАСС, GPS или Beidou.

2. Структура САЗА

В состав САЗА были включены несколько измерительных СР атмосферы разного типа (радиолокационного и навигационного), но метеорологическая площадка в 2016 еще не была построена, поэтому на космодроме по временной схеме была смонтирована одна из двух стационарных навигационных СР «Полус-С», поставлен мобильный аэрологический комплекс (МАК) и комплект оборудования и расходных материалов для запуска АРЗ. МАК – это полностью автономный комплекс на базе шасси КАМАЗ-43114 оснащенный навигационной СР «Полус-М» (мобильное исполнение), оборудованием для подготовки и запуска АРЗ, включая разборный эллинг для шаров-баллонов, средствами цифровой радиосвязи, дизельным электрогенератором, метеостанцией WS500 UMB с пневматическим подъёмником, а также системами жизнеобеспечения (система отопления, фильтрации воздуха и кондиционирования). Эти три компо-

ненты САЗА и обеспечивали оперативный контроль параметров атмосферы перед пуском РКН.

МАК позволяет выполнять выпуски АРЗ и зондирование практически с любой открытой площадки космодрома. Время зондирования до высоты 20 км составляет немногим более 1 часа. Каждое измерение (скорости ветра, температуры, влажности, давления и плотности воздуха) синхронизировано (всемирное координированное время) со шкалой времени UTC непосредственно в радиозонде с помощью приемника сигналов ГЛОНАСС. Темп обновления данных равен 2 секундам. Благодаря мобильности МАК можно планировать траекторию полёта АРЗ, так, чтобы она проходила в плоскости пускового комплекса на интересующих потребителя высотах в заданной зоне.



Рис. 1. Мобильный аэрологический комплекс в развернутом положении

Fig. 1. The mobile aerological complex in the deployed state

Специально для обеспечения пусков РКН были разработаны форматы формирования выходных данных с высоким разрешением по высоте. Предельная дискретность исходных данных по высоте составляет 10-12 м, для РКН «Союз-2.1а» был разработан выходной формат данных с сеткой высот 100 м. Кроме этого программное обеспечение (ПО) СР «Полус» позволяет сохранять «сырые» (необработанные) данные измерений АРЗ в текстовом формате, что позволяет обрабатывать данные с помощью стороннего ПО. Во время разработки, модернизации СР «Полус» и обеспечения первого пуска на космодроме «Восточный» эти «сырые» данные ис-

пользовались для внешнего контроля систем, с помощью специально разработанного в среде LabView ПО.

Остальные компоненты САЗА будут смонтированы на космодроме после завершения строительства метеорологической площадки. Речь идет о двух модернизированных аэрологических радиолокационных вычислительных комплексах (АРВК) МАРЛ-А, второй стационарной СР «Полюс» с увеличенной рабочей дальностью и аппаратно-программном комплексе автоматизированной системы сбора, обработки и хранения данных (АПК АССОиХД или более кратко АПК). Модернизированный в процессе разработки САЗА АРВК МАРЛ отличается от серийного прототипа тем, что обеспечивает прием КТИ радиолокационного АРЗ МРЗ-3МК в пакетном режиме. Это существенно облегчает совместную обработку данных радиолокационного и навигационного зондирования. Данные от каждой СР будут оперативно поступать по каналам связи на серверы базы данных АПК САЗА и подсистемы сбора данных наблюдений.

3. АПК и направления развития САЗА

Программное обеспечение рабочего места аэролога САЗА, которое входит в состав АПК АССОиХД, предназначено для мониторинга, обработки и анализа данных, поступающих от подсистем САЗА. На этом уровне вся поступающая информация по степени обработки делится на «сырую», первичную и вторичную. Первичные данные – это выходная информация подсистем САЗА, т.е. обработанные ими «сырые» данные. Вторичные данные – это обработанная АПК первичная информация. Именно эта вторичная обработка в купе с автоматизацией сбора данных по каналам связи, в том числе от МАК, и собственной базой данных превращает САЗА из дорогостоящего набора независимых СР в уникальную систему аэрологического обеспечения нового типа.

Пока ПО АПК АССОиХД реализует самые простые алгоритмы и режимы вторичной обработки, которые в дальнейшем можно ощутимо развить и усовершенствовать. Общая концепция вторичной обработки, на базе которой построен АПК, следующая. Информация от всех подсистем САЗА оперативно поступает по каналам связи в базу данных (БД) АССОиХД. Любые первичные данные, находящиеся в БД, могут быть выбраны аэрологом САЗА в качестве исходных для вторичной обработки. Исходные данные делятся на «источники» и «индикаторы». Вторичные данные получают путем автоматизированного преобразования данных категории «источники» по некоторому алгоритму. Данные категории «ин-

дикаторы» используются для формирования дополнительной оценки правдоподобия данных «источников». В качестве «источников» обычно используются оперативные первичные данные подсистем САЗА. Для вторичной обработки может быть выбрано несколько «источников» и «индикаторов». «Индикаторы» используются для верификации данных «источников» или для их весовой обработки. Несмотря на простоту общей концепции, получение вторичной информации не является тривиальной задачей. Даже полученные от идентичных измерительных систем данные, вследствие ошибок измерения, воздействия помех, динамики атмосферы, сбоев и отказов аппаратуры, будут отличаться и содержать ошибки. При сведении таких данных уместно учитывать апертуру (интервал усреднения) и частоту дискретного преобразования.

Другим направлением усовершенствования ПО АПК САЗА является использование в расчётах в качестве «индикаторов» средних многолетних значений метеопараметров «Глобальной справочной модели атмосферы». В частности, сравнение данных справочной модели с данными зондирования перед пуском РКН «Союз-2.1а» с космодрома «Восточный» дало хорошее совпадение основных параметров (см. рис. 2), хотя в нижней 15-километровой зоне разница существенная благодаря более высокой изменчивости тропосферы.

Для повышения оперативности контроля перспективно включение в состав САЗА измерительных систем других типов, например, радиолокационного ветрового профайлера [4], доплеровского метеорологического радиолокатора. Возможна разработка новых образцов профайлеров, работающих в других диапазонах частот. Существуют методы повышения оперативности контроля радиозондовыми измерительными системами. Одна из стационарных СР «Полус» САЗА изготовлена в модификации с антенной с управляемой диаграммой направленности, что позволяет увеличить потенциал телеметрического радиоканала АРЗ и использовать технологию обратного зондирования для повторного измерения параметров, как во время подъема, так и во время падения радиозонда вплоть до поверхности Земли. Для этого между шаром и АРЗ обычно подвешивают замедляющий падение парашют. Отдельный интерес представляет зондирование с помощью радиозонда, сбрасываемого с самолёта или беспилотного летательного аппарата.

САЗА в полном составе позволяет вести одновременное зондирование четырьмя радиозондами. Запуская их с интервалом 15-30 минут можно организовать режим непрерывного конвейерного зондирования, при котором в каждом из четырех секторов интересующего нас диапазона вы-

сот всегда находится один из запущенных АРЗ. Сведение данных конвейерного зондирования в одну динамически пересчитываемую выходную таблицу позволит обновлять данные зондирования на выбранном интервале высот с периодом, равным интервалу между выпусками радиозондов.

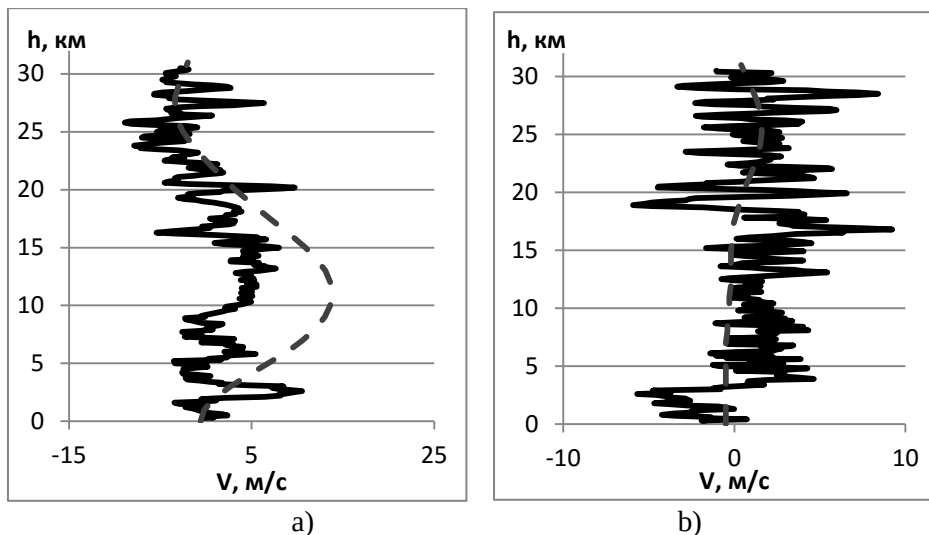


Рис. 2. Сравнение зональной (а) и меридиональной (б) составляющих ветра по данным зондирования на космодроме Восточный (сплошная линия) со средними многолетними значениями, полученными по «Глобальной справочной модели атмосферы» (пунктирная линия)

Fig. 2. Comparison of zonal (a) and meridional (b) wind components according to upper-air sounding at the Vostochny spaceport (continuous line) with the average long-term values from the Reference atmosphere model (dashed line)

5. Заключение

В 2013-2015 годах для КЦ «Восточный» ЦЭНКИ и УРФУ с привлечением предприятий-соисполнителей АО «Радий» (г. Касли, Челябинская обл.), АО «Вектор» (г. Екатеринбург) и АО «СЭМЗ» (г. Солнечногорск, Московская обл.) была разработана современная комплексная система аэрологического зондирования атмосферы. Часть подсистем САЗА успешно прошли испытания и использовались для обеспечения первого пуска РКН на космодроме. Доработка программного обеспечения АПК АССОиХД позволит создать новую, гибкую технологию получения и обработки данных о параметрах атмосферы для обеспечения пусков РКН.

Список литературы

[1] Ширшов Н.В., Ламзин П.А., Плохих О.В., Гусев А.В., Черных О.А., Кудинов С.И., Иванов В.Э. Система аэрологического радиозондирования атмосферы космодрома Восточный / Под общей редакцией М.М. Пенькова // Труды III Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды» СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2014. Т 2. С.192-197.

[2] Гусев А.В., Иванов В.Э., Плохих О.В., Ширшов Н.В. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы обеспечения пусков ракет космического назначения // Труды 4 ЦНИИ Минобороны России, вып. 124. Королёв: 4 ЦНИИ, 2015. С. 71-75.

[3] Иванов В.Э., Гусев А.В., Игнатков К.А., Кудинов С.И., Малыгин И.В., Носков В.Я., Плохих О.В., Рысев В.В., Черных О.А. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 9. С. 3–49.

[4] Горелик А.Г., Ермилов Д.В., Калмыков В.М., Кононов М.А., Куликовский К.В., Стерлядкин В.В., Хомяков А.В., Ширшов Н.В. Натурные измерения ветрового поля с помощью радиолокационных станций КА диапазона и интерпретация сложных сигналов / под ред. Ю.В. Кулешова // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 653. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды. СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2016. С.151-154.

References

[1] Shirshov N.V., Lamzin P.A., Plokhikh O.V., Gusev A.V., Chernyih O.A., Kudinov S.I., Ivanov V.E. [The upper-air radio sounding system of Vostochny spaceport] (ed. by M.M.Pen'kov). *Trudy III Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy»*. SPb.: VKA im. A.F.Mozhaiskogo, 2014, vol. 2, pp.192-197. (In Russian).

[2] Gusev A.V., Ivanov V.E., Plokhikh O.V., Shirshov N.V. [Current state and development prospects of upper-air sounding systems intended for meteorological ensuring of space rocket launches]. *Trudy 4 TsNII Minoborony Rossii*, vypusk 124. Korolev: 4 TsNII, 2015, pp. 71-75. (In Russian).

[3] Ivanov V.E., Gusev A.V., Ignatkov K.A., Kudinov S.I., Malyigin I.V., Noskov V.Ya., Plohih O.V., Ryisev V.V., Chernyih O.A. [Current Status and Development Prospects of Atmosphere Radio Sensing Systems in Russia]. *Uspеhi sovremennoy radioelektroniki [Successes of modern electronic engineering]*, 2013, no. 9, pp. 3–49. (In Russian).

[4] Gorelik A.G., Ermilov D.V., Kalmykov V.M., Kononov M.A., Kulikovskii K.V., Sterlyadkin V.V., Khomyakov A.V., Shirshov N.V. Wind field in-situ measurements by means of the Ka-range radar stations and interpretation of compound signals. *Trudy Voенno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo. Vypusk 653. Problemy voenno-prikladnoi geofiziki i kontrolya sostoyaniya prirodnoi sredy* (ed. by Yu.V. Kuleshova). SPb.: VKA im. A.F.Mozhaiskogo, 2016, pp.151-154. (In Russian).

Double polarization microwave radiometer for soil moisture measuring from unmanned helicopter board

Victor A. Plushchev¹, Igor A. Sidorov¹, Eugenij P. Novichikhin²

¹JSC Radio Engineering Corporation "VEGA"

34, Kutuzov ave., Moscow, 121170, Russian Federation

igor__sidorov@mail.ru

²IRE RAS n.a. V.A. Kotelnikov

1, Vvedensky sq, Frjazino, MD, 141190, Russian Federation

epnov@mail.ru

Abstract: The new double polarization microwave radiometer for remote soil moisture on depth about one meter measuring from unmanned helicopter schematic foundation is representing. Theoretical foundation L-band using for optimal depth sensing is shown. The results of nature experiment for scale calibration then soil moisture measuring on ground static position are representing. The microwave radiometer nature experiment specific conditions with soil probes getting from the soil surface and it depth in different points are describing. The analysis and comparison the soil moisture values from microwave radiometric measurements and the values from soil samples direct moisture measurements are representing. The natural experiment was made on April 2017 in Moscow region.

Keywords: microwave radiometr, hydrological monitoring, soil moisture, unmanned helicopter.

Двухполяризационный СВЧ-радиометр для измерения влажности почвы с борта беспилотного летательного аппарата

¹Плющев В.А., ¹Сидоров И.А., ²Новичихин Е.П.,

¹АО «Концерн «Вега»

Кутузовский проспект, 34, г. Москва, 121170, Российская Федерация

igor__sidorov@mail.ru

²«ИРЭ РАН им. академика В. А. Котельникова»

Площадь Введенского, 1, г. Фрязино МО, 141190, Российская Федерация

epnov@mail.ru

Аннотация: В докладе приводится обоснование облика нового двухполяризационного СВЧ-радиометрического приемника для измерения влажности почвы в слое до одного метра при использовании на борту малого беспилотного летательного аппарата. Обосновывается необходимость использования L-диапазона для достижения оптимальных показателей по глубине зондирования. Приводятся результаты натурного эксперимента по измерению влажности почвы в статическом состоянии с целью калибровки влажностной шкалы. Описывается методика проведения натурного эксперимента совместно с обеспечением взятия проб грунта с поверхности и с глубины в различных точках вдоль линии движения. Приводится сравнительный анализ значений влажности из отобранных проб грунта и значений влажности почвы, полученных в результате обработки накопленной в ходе эксперимента радиометрической информации. Натурный эксперимент проводился в апреле 2017 года на территории Московской области.

Ключевые слова: СВЧ-радиометр, гидрологический мониторинг, влагосодержание почвогрунтов, беспилотный вертолет.

1. Введение

СВЧ-радиометрия в настоящее время находит применение в различных областях науки и техники, в частности, в медицине [1-3] и при дистанционном зондировании земной и водной поверхности с бортов космических спутников, самолётов, беспилотных летательных аппаратов, наземных подвижных или стационарных платформ [4,5]. В 2016 году на территории Московской области проводился лётный эксперимент с целью измерения влажности почвы с помощью СВЧ-радиометра С-диапазона, установленного на борту беспилотного летательного аппарата – мультикоптера [6,7].

В качестве датчика использовался одноканальный трассовый СВЧ-радиометр серии «Ранет-05», разработанный специалистами Концерна радиостроения «ВЕГА». Беспилотный мультикоптер был предоставлен и обслуживался специалистами инновационной фирмы «ГИНУС», а обработкой радиометрической информации и пересчётом радиоярких температур во влажность почвы, с использованием методик, разработанных профессором А.М.Шутко [8,9], занимались специалисты ИРЭ РАН им. В.А.Котельникова.

В ходе лётного эксперимента были получены положительные результаты, однако были выявлены и некоторые недостатки, затрудняющие внедрение предложенной системы в повседневную практику. В частности, для вычисления влажности, в соответствии с известной методикой, требовалось трикратно пролететь по намеченному маршруту над одним и тем

же местом с установкой СВЧ-радиометра для визирования поверхности под углом 30 градусов к вертикали на горизонтальной и вертикальной поляризациях и при визировании в нади́р. Такой подход требует значительного времени на получение исходных данных и дальнейшую обработку результатов.

Следовательно, **актуальной** является задача разработки нового СВЧ-радиометра, способного накапливать всю необходимую информацию и вычислить влажность почвы в реальном времени за один пролёт над исследуемой территорией.

Целью настоящей статьи является обоснование облика нового СВЧ-радиометра, способного измерять влажность почвы в реальном масштабе времени и демонстрация результатов натурных испытаний СВЧ-влагомера.

2. Обоснование облика СВЧ-влагомера

Для расчетов влажности и температуры почвы используются формулы Френеля угловой зависимости коэффициентов отражения, имеющие следующий вид:

$$r_v = \frac{\left| \varepsilon \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)} \right|^2}{\left| \varepsilon \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)} \right|^2};$$

$$r_h = \frac{\left| \cos(\theta) - \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)} \right|^2}{\left| \cos(\theta) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta)} \right|^2};$$

$$T_v = T_0(1 - r_v) + T_s r_v;$$

$$T_h = T_0(1 - r_h) + T_s r_h;$$
(1)

где ε - комплексная диэлектрическая проницаемость,

r_v, r_h - коэффициенты отражения на вертикальной и горизонтальной поляризации,

T_v, T_h - соответствующие яркостные температуры поверхности,

T_0 - термодинамическая температура почвы,

T_s - реликтовая температура неба,

θ - угол наблюдения к нормали, в данном случае равный 30° .

Величины T_v и T_h должны измеряться СВЧ-радиометром, величины T_0 и T_s известны. Из системы уравнений (1) может быть получено значе-

ние комплексной диэлектрической проницаемости почвы, по которому вычисляются значения влагосодержания по известным зависимостям.

Таким образом, радиометрический СВЧ-влажномер должен иметь два канала измерения яркостных температур одновременно - на вертикальной и горизонтальной поляризациях. С учетом того, что СВЧ-влажномер предполагается использовать на борту беспилотного летательного аппарата, он должен быть максимально компактным, лёгким и экономичным. Этого можно достичь при использовании одного двухканального приёмника с двух опорной модуляцией и внутренней непрерывной калибровкой [5]. Приёмник должен иметь два входа - один для сигнала от антенны вертикальной поляризации и другой для антенны горизонтальной поляризации. При этом модулятор поочерёдно переключает на вход приёмника сигналы с первого и второго входов с частотой равной половине частоты модуляции. Антенну СВЧ-влажномера целесообразно реализовывать в виде решетки с двумя выходами для вертикальной и горизонтальной поляризаций.

Изображение, разработанной специалистами Концерна радиостроения «ВЕГА», антенны данного типа представлено на рисунке 1.

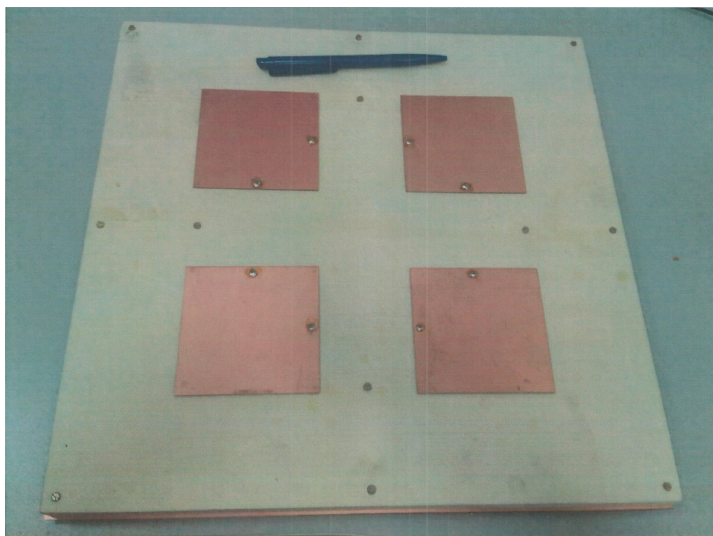


Рис. 1. Конструкция двухканального антенного устройства.

Fig. 1. Double polarization antenna design

Характеристики антенны представлены в таблице 1.

Табл. 1. Характеристики антенны.

Table 1. Antenna parameters

Наименование параметра	Величина
Диапазон рабочих частот, МГц.	1405±40
КСВН, не более	1,7
Развязка между входами, дБ, не менее	25,0
Ширина ДН в Е- и Н-плоскостях по уровню -3дБ, град., не более	37,0
Уровень боковых лепестков, дБ, не более	-14,0
Коэффициент усиления на центральной частоте, дБ, не менее	13,0
Коэффициент рассеяния, не более	0,15
Габаритные размеры, мм, не более	360x360x20
Масса, кг, не более	0,4

Для увеличения глубины зондирования и уменьшения влияния растительности на результаты измерения влажности почвы целесообразно перейти от С-диапазона в L-диапазон (см.Табл.1).

3. Результаты натурального эксперимента

Для уточнения характеристик антенны и радиометра, а также для калибровки влажностной шкалы, в Московской области был проведен натурный эксперимент. Антенна с радиометром устанавливались на экваториальной монтировке с возможностью сканирования по углу места от надира до 45 градусов, как показано на рисунке 2.



Рис. 2. Экспериментальная установка.

Fig. 2. Experimental setup

Антенна направлялась на открытый плоский участок земли, свободный от растительности, и снималась зависимость яркостной температуры от угла для вертикальной и горизонтальной поляризаций. Одновременно отбирались пробы грунта с различной глубины исследуемого участка с последующим измерением влажности отобранных образцов по методике ГОСТ 28268-89.

Результаты измерений совместно с рассчитанными по формулам (1) величинами температур представлены графически на рисунке 3.

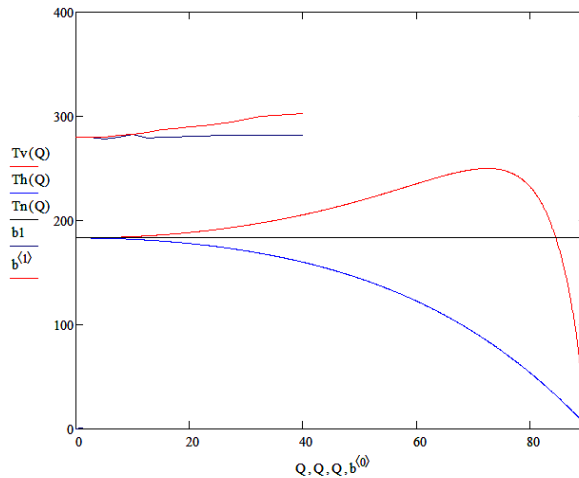


Рис. 3. График с экспериментальными и расчётными данными.
Вверху экспериментальные данные внизу расчётные.

Fig. 3. Experimental and calculated data chart.
Experimental data on the top calculated data down

На графике видно небольшое расхождение экспериментальных и расчётных данных, для интерпретации которого требуются дополнительные исследования.

В целом, сравнение радиометрических значений влажности и экспериментальных значений, полученных по методике ГОСТ 28268-89, дало удовлетворительные результаты.

4. Заключение

В результате проведённых исследований и экспериментов можно сделать следующие выводы:

- для повышения оперативности и точности дистанционного измерения влажности почвы с борта беспилотного летательного аппарата необходим двухканальный поляризационный портативный СВЧ-радиометр;
- для увеличения глубины зондирования и снижения влияния растительности на результаты измерения влажности почвы целесообразно перейти к работе в L-диапазоне;
- в результате проведенных натурных испытаний выявлено небольшое расхождение значений яркостных температур полученных расчётным путём и экспериментальных данных. Для интерпретации полученных результатов требуется продолжение теоретических и экспериментальных исследований.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по итогам НИР «Земледелие-Вега», проведенного по заказу ООО «ГИНУС» в рамках НИР «Земледелие» на основании Государственного контракта № 15411.214999.11.011 от 31 августа 2015 г. Минпромторга РФ.

Список литературы

- [1] Бобрихин А.Ф., Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Лось В.Ф., Порохов И.О., Сидоров И.А. Моделирование вибраторной, спиральной и резонаторно-щелевой антенн-аппликаторов для многоканальных медицинских радиотермографов. // В сборнике: «Кры-МиКо 2014» Материалы 24-Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 7-13 сентября 2014, Севастополь, Крым, Россия, Том 2, стр. 1047-1048
- [2] Бобрихин А.Ф., Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Лось В.Ф., Попов В.В., Порохов И.О., Сидоров И.А. Моделирование антенн-аппликаторов унифицированных антенных решеток для многоканальных систем радиотермокартирования. // «Антенны». 2014. № 2 (201). С. 17-26.
- [3] Бобрихин А.Ф., Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Лось В.Ф., Попов В.В., Порохов И.О., Сидоров И.А. Антенны-аппликаторы для систем радиотермокартирования. // Машиностроитель. 2014. № 8. С. 36-45.
- [4] Сидоров И.А., Плющев В.А., Солдатенко А.П., Гудков А.Г., Леушин В.Ю. Мониторинг очагов лесных и торфяных пожаров с помощью СВЧ-радиометрического зондирования. // «Машиностроитель». 2014. № 9. С. 32-35.
- [5] Сидоров И.А., Солдатенко А.П., Гудков А.Г., Леушин В.Ю., Новичихин Е.П. Результаты натурных экспериментов по мониторингу гидрологической обстановки вдоль автомобильных дорог многочастотной поляриметрической системой СВЧ-радиометров. // Машиностроитель, Том 84, Выпуск 12, 2015г., стр.46-55 ISSN 0025-4568
- [6] Шутко А.М., Новичихин Е.П., Маречек С.В., Плющев В.А., Сидоров И.А., Бирюков Е.Д., Решиков А.Д., Хаарбринк Р. Поляриметрическая система из двух СВЧ-радиометров типа «Ранет-21». // «Радиотехника». 2013. № 1. С. 123-126.
- [7] Сидоров И.А., Плющев В. А., Новичихин Е. П., Гудков А.Г. Результаты натурального эксперимента по измерению влажности почвы с помощью СВЧ-радиометрического

приемника с борта беспилотного летательного аппарата. // Материалы 26-Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 6-12 сентября 2016, Севастополь, Крым, Россия, Том 10, стр. 2301-2307.

[8] Шутко А.М СВЧ-радиометрия водной поверхности и почвогрунтов // М., «Наука». 1986 г. 286с.

[9] Шутко А.М., Сидоров И.А., Новичихин Е.П., Плюшев В.А. и др. СВЧ-радиометрия земной и водной поверхностей: от теории к практике // Академическое издательство имени проф. Марина Дринова, София, 2014, ISBN 978-954-322-708-2

References

[1] Bobrikhin A.F., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Los' V.F., Porokhov I.O., Sidorov I.A. Modeling of the dipole, helical and cavity-slot antennas applicators for multichannel medical radiothermographs. // «CriMiCo 2014» - 24th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. 2014. P. 1047-1048.

[2] Bobrikhin A.F., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Los' V.F., Popov V.V., Porokhov I.O., Sidorov I.A. Modeling of antennas-applicators of the unified antenna lattices for radiothermographing multichannel systems. // «Antennas». 2014. № 2 (201). P. 17-26.

[3] Bobrikhin A.F., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Los' V.F., Popov V.V., Porokhov I.O., Sidorov I.A. Antennas-applicators for radiothermographing systems. // Mashinostroitel. 2014. № 8. P. 36-45.

[4] Sidorov I.A., Plushchev V.A., Soldatenko A.P., Gudkov A.G., Leushin V.Yu., Monitoring of forest and peat-bog fires centers by means of microwave radiometer sounding. // Mashinostroitel, 2014. № 9. P. 32-35.

[5] Sidorov I.A., Soldatenko A.P., Gudkov A.G., Leushin V.Y., Novichikhin E.P. The results of nature experiments for soil moisture measuring along highways by means of multispectral polarimetric radiometric system. // Mashinostroitel, V.84, Issue 12, 2015 pp.46-55. ISSN 0025-4568.

[6] Shutko A.M., Novichikhin E.P., Marichek S.V., Plushchev V.A., Sidorov I.A., Birukov E.D., Reshchikov A.D., Haarbrink R. Polarimetric system of two microwave radiometers «Ranet-21» type. // «Radiotekhnika» (Radioengineering), 2013. № 1. P. 123-126.

[7] Sidorov I.A., Plushchev V.A., Novichikhin E.P., Gudkov A.G., The soil moisture measuring using microwave radiometer from unmanned helicopter scientific experiment results. // «CriMiCo 2016» - 26th International Crimean Conference Microwave and Telecommunication Technology Conference Proceedings. September 6-12, 2016, Vol 10, P. 2301-2307.

[8] Shutko A.M. Microwave radiometry of water surface and land. // Nauka, Moscow, 1986.

[9] Shutko A.M., Sidorov I.A., Novichikhin E.P., Plushchev V.A. and over. Microwave radiometry of land and water surfaces: from theory to practice // Academic publishing house name after professor Marin Drinov, Sofia, 2014, ISBN 978-954-322-708-2

Acknowledgements

This article based on the results of Scientific Research Work «Agriculture-Vega», made with JSC «GINUS» according to Scientific Research Work «Agriculture» based on State contract № 15411.214999.11.011 from August 31, 2015. with Ministry of Industry and Trade RF.

Подоптимальный фильтр сжатия ЛЧМ сигналов для когерентно-импульсных РЛС

Ершов Г.А., Мясников С.А., Сеницын Е.А., Фридман Л.Б.

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»)

г. С-Петербург, 199106, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru

Аннотация: Предлагается подоптимальный фильтр, обеспечивающий сжатие радиолокационных сигналов с линейной частотной модуляцией теоретически с нулевым уровнем боковых лепестков (обусловленным лишь вычислительной погрешностью). Выполняется оценка эффективности предлагаемого фильтра. При этом в качестве основной характеристики эффективности рассматривается энергетическая характеристика (снижение отношения сигнал/шум при подоптимальном сжатии по сравнению с согласованным сжатием). Для сигналов с различной величиной базы подбираются параметры предлагаемого фильтра, обеспечивающие наилучшую эффективность сжатия (с точки зрения минимизации снижения отношения сигнал/шум).

Ключевые слова: сигналы с линейной частотной манипуляцией, подоптимальный фильтр сжатия, отношение сигнал/шум, формирующий гауссов импульс, уровень боковых лепестков.

1. Введение

В радиолокационных станциях, работающих в импульсном режиме, в настоящее время широко используются длинные (до десятков микросекунд) сложные зондирующие радиоимпульсы с частотной модуляцией и последующей обработкой (сжатием) отраженных сигналов. Большая длительность импульса обеспечивает энергию сигнала, необходимую для обнаружения летательных аппаратов (ЛА), а внутриимпульсная частотная модуляция и сжатие - заданное разрешение по дальности [1]. Широкое распространение получило использование сигналов с линейной частотной манипуляцией (ЛЧМ сигналов) и последующим сжатием ЛЧМ сигнала при помощи согласованного фильтра [2]. Недостатком использования согласованного фильтра сжатия является появление боковых лепестков в сжатом сигнале, уровень которых в некоторых случаях оказывается недопустимо высоким. При этом боковые лепестки сильного отражённого сиг-

нала одного ЛА могут искажать или полностью маскировать основной пик слабого отражённого сигнала другого ЛА.

2. Подоптимальный фильтр сжатия ЛЧМ сигнала

Для подавления боковых лепестков сжатого ЛЧМ сигнала предлагается вместо согласованного фильтра использовать подоптимальный фильтр сжатия, импульсная характеристика которого имеет вид

$$\dot{S}_{\text{пф}}(t_n) = F_D^{-1} \left\{ \frac{F_D \{S_{\text{ГП}}(t_n)\}}{F_D \{\dot{S}_{\text{Эм}}(t_n)\}} \right\}, \quad (1)$$

где $t_n = n * T$, T - период дискретизации сигнала; n - номер отсчета; F_D и F_D^{-1} - операторы соответственно прямого и обратного дискретного преобразования Фурье; $S_{\text{ГП}}(t_n) = e^{-at_n^2}$ - формирующий Гауссов импульс; a - параметр формирующего Гауссова импульса; $\dot{S}_{\text{Эм}}(t_n)$ - эталонный ЛЧМ сигнал.

Как следует из (1), импульсная характеристика предлагаемого подоптимального фильтра строится с использованием эталонного сигнала (принимаемого ЛЧМ сигнала, на который рассчитан данный фильтр) и формирующего гауссова импульса. Ширина формирующего гауссова импульса (зависящая от значения его параметра a) определяет форму выходного сигнала предлагаемого фильтра, а также энергетические характеристики подоптимального сжатия. Значение параметра формирующего гауссова импульса выбирается, исходя из задачи повышения эффективности подоптимального сжатия.

3. Эффективность предлагаемого подоптимального фильтра

Оценка эффективности сжатия ЛЧМ сигналов была выполнена при помощи математического моделирования в программной среде “Matlab”. В качестве характеристик эффективности сжатия ЛЧМ сигнала рассматривались уровень боковых лепестков, выигрыш в отношении сигнал/шум на выходе фильтра сжатия и длительность его выходного импульса.

Как следует из рис. 1, подоптимальный фильтр обеспечивает сжатие ЛЧМ сигнала без боковых лепестков. При этом выходной сигнал фильтра соответствует формирующему гауссову импульсу.

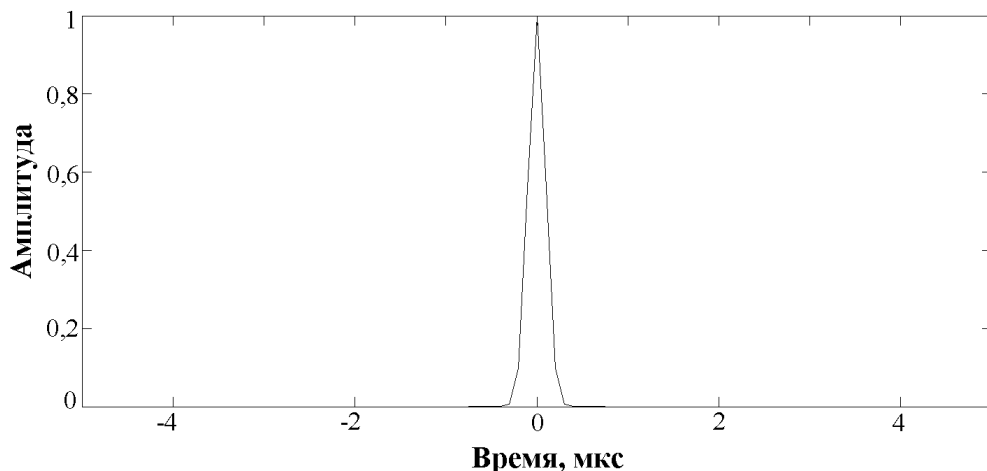


Рис. 1. Отклик подоптимального фильтра сжатия

В табл. 1 представлены характеристики эффективности подоптимального сжатия при различных значениях базы ЛЧМ сигнала. При этом величина параметра a подбиралась по критерию минимизации энергетических потерь (относительно согласованного сжатия).

Как следует из табл. 1, при рассмотренных величинах базы ЛЧМ сигнала энергетические потери подоптимального сжатия составляют $0,57 \div 1,06$ дБ. При этом наименьшие потери имеют место при сжатии сигнала с величиной базы, равной 8.

При увеличении базы ЛЧМ сигнала длительность импульса на выходе фильтра сжатия уменьшается. Следует заметить, что длительность импульса на выходе подоптимального фильтра соответствует длительности формирующего Гауссова импульса, используемого при реализации данного фильтра.

При подоптимальном и согласованном сжатии длительности импульсов на выходе фильтров оказались приблизительно равными.

Табл. 1. Характеристики эффективности сжатия ЛЧМ сигнала подоптимальным фильтром

База ЛЧМ сигнала	Параметр гауссова импульса a	Энергетические потери по сравнению с согласованным фильтром, дБ	Длительность выходного импульса подоптимального фильтра по уровню минус 6 дБ, мкс,	Длительность выходного импульса согласованного фильтра по уровню минус 6 дБ, мкс
4	0,10	0,89	0,53	0,60
5	0,12	0,86	0,49	0,48
6	0,17	0,76	0,40	0,40
7	0,22	0,69	0,36	0,34
8	0,27	0,57	0,32	0,30
9	0,35	0,74	0,29	0,27
10	0,40	0,77	0,27	0,24
11	0,48	0,90	0,25	0,22
12	0,51	1,00	0,24	0,20
13	0,54	0,96	0,24	0,17
14	0,60	1,06	0,22	0,16

4. Заключение

Предложенный подоптимальный фильтр обеспечивает сжатие сигналов с линейной частотной модуляцией теоретически с нулевым уровнем боковых лепестков (обусловленным лишь вычислительной погрешностью).

Энергетические потери при использовании предложенного подоптимального фильтра по сравнению с согласованной фильтрацией составляют $0,57 \div 1,06$ дБ (для рассмотренных сигналов с величиной базы $4 \div 14$). Наименьшие энергетические потери (0,57 дБ) имеют место при сжатии сигнала с величиной базы, равной 8.

Предлагаемый подоптимальный фильтр отличается также отсутствием расширения длительности выходного импульса (по сравнению с импульсом на выходе согласованного фильтра).

Список литературы

- [1] Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970 / Под ред. Ширмана Я. Д., 560 с.
- [2] Levanon N., Mozeson E.: 'Radar signals', John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, pp. 57–67.

Эффективность подоптимального фильтра сжатия ЛЧМ сигналов при наличии доплеровского сдвига частоты

Ершов Г.А., Мясников С.А., Сеницын Е.А., Фридман Л.Б.
Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт
радиоаппаратуры» (АО «ВНИИРА»)
г. С-Петербург, 199106, Российская Федерация
lenya2002@bk.ru

Аннотация: Выполняется оценка влияния доплеровского сдвига частоты на эффективность подоптимального фильтра сжатия радиолокационных сигналов с линейной частотной модуляцией. В качестве подоптимального фильтра рассматривается фильтр, при отсутствии доплеровского сдвига частоты обеспечивающий сжатие сигналов теоретически с нулевым уровнем боковых лепестков (обусловленным лишь вычислительной погрешностью). Выполняется сравнительный анализ эффективности подоптимального и стандартного согласованного сжатия сигналов с различной величиной базы (при учете доплеровского сдвига частоты).

Ключевые слова: линейная частотная модуляция, подоптимальный фильтр сжатия, согласованный фильтр сжатия, доплеровский сдвиг частоты, уровень боковых лепестков.

1. Введение

В настоящее время в современных радиолокационных станциях, работающих в импульсном режиме, широко применяются сложные зондирующие радиоимпульсы с линейной частотной модуляцией и последующей обработкой (сжатием) отраженных сигналов. При обработке таких сигналов решение проблемы обеспечения максимальной дальности действия радиолокатора (при сохранении разрешающей способности по дальности) является одной из наиболее важных задач.

Сжатие сигналов с линейной частотной манипуляцией (ЛЧМ сигналов) обычно осуществляется при помощи согласованного фильтра [1, 2]. Однако уровень боковых лепестков (УБЛ), возникающих на выходе согласованного фильтра, в некоторых случаях оказывается недопустимо высоким.

Использование подоптимальных фильтров позволяет снизить УБЛ при сжатии ЛЧМ сигналов. В данной работе рассматривается подоптимальный фильтр, импульсная характеристика которого имеет вид

$$\dot{S}_{\text{ПФ}}(t_n) = F_D^{-1} \left\{ \frac{F_D \{S_{\text{ГН}}(t_n)\}}{F_D \{\dot{S}_{\text{Эм}}(t_n)\}} \right\},$$

где $t_n = n * T$, T - период дискретизации сигнала; n - номер отсчета; F_D и F_D^{-1} - операторы соответственно прямого и обратного дискретного преобразования Фурье; $S_{\text{ГН}}(t_n) = e^{-at_n^2}$ - формирующий Гауссов импульс; a - параметр формирующего Гауссова импульса; $\dot{S}_{\text{Эм}}(t_n)$ - эталонный ЛЧМ сигнал.

В данной работе выполняется анализ влияния доплеровского сдвига частоты на характеристики эффективности подоптимального сжатия ЛЧМ сигналов. Также проводится сравнительный анализ эффективности подоптимального и стандартного согласованного сжатия ЛЧМ сигналов.

2. ЛЧМ сигналы при наличии доплеровского сдвига частоты

Доплеровский сдвиг частоты, возникающий в сигнале, отражённом от движущегося летательного аппарата (ЛА), приводит к искажению принимаемого сигнала. Искажение наиболее существенно при значительной длительности излучаемого сигнала и высокой радиальной скорости движения ЛА. Если фильтр сжатия рассчитан на сигнал без искажений, то его параметры не будут соответствовать принимаемому сигналу. В результате, будет иметь место снижение эффективности сжатия ЛЧМ сигнала, в частности, повышение УБЛ. Следует определить степень снижения эффективности сжатия в зависимости от радиальной скорости движения ЛА.

Комплексную огибающую ЛЧМ сигнала при наличии доплеровского сдвига частоты можно представить как

$$\dot{S}^D(t_n) = \dot{S}(t_n) \exp(2\pi j F_D n T), \quad (1)$$

где $\dot{S}(t_n)$ - комплексная огибающая ЛЧМ сигнала при отсутствии доплеровского сдвига; F_D - доплеровский сдвиг частоты; j - мнимая единица.

Доплеровский набег фазы за время $T_{\text{И}}$, равное длительности ЛЧМ импульса, определяется выражением $\Delta\varphi_D = 2\pi F_D T_{\text{И}}$. В связи с тем, что степень влияния доплеровского сдвига частоты на эффектив-

ность сжатия зависит от длительности излучаемого импульса, будем рассматривать зависимости характеристик эффективности сжатия от $\Delta\varphi_d$ (а не от F_d).

3. Оценка влияния доплеровского сдвига частоты на эффективность подоптимального сжатия ЛЧМ сигналов

Оценка эффективности сжатия ЛЧМ сигналов была выполнена при помощи математического моделирования в программной среде “Matlab”. При этом в качестве излучаемого сигнала рассматривался ЛЧМ сигнал длительностью 4 мкс.

Табл. 1. Характеристики эффективности подоптимального сжатия ЛЧМ сигнала при наличии доплеровского сдвига частоты (база ЛЧМ сигнала равна 8, $a = 0,27$)

Доплеровский набег фазы ¹ , град	Доплеровский сдвиг частоты ² , Гц	Радиальная скорость цели ³ , м/с	Пиковый УБЛ, дБ	Средний УБЛ, дБ
24,0	16700	250	-43,8	-64,8
19,2	13360	200	-45,8	-66,8
14,4	10020	150	-48,3	-69,2
9,62	6680	100	-51,8	-72,8
4,81	3340	50	-57,8	-78,8
2,40	1670	25	-63,9	-84,8
1,44	1002	15	-68,3	-89,3
0,96	668	10	-71,8	-92,8
0,48	334	5	-77,9	-98,8
0,10	67	1	-91,8	-112,8

1 - за время, равное длительности ЛЧМ импульса;

2 – при длительности ЛЧМ импульса, равной 4 мкс;

3 - при длине волны, равной 30 см и длительности ЛЧМ импульса, равной 4 мкс.

Табл. 2. Характеристики эффективности подоптимального сжатия ЛЧМ сигнала при доплеровском набеге фазы, равном 24 град

База ЛЧМ сигнала	Параметр гауссова импульса a	Пиковый УБЛ, дБ	Средний УБЛ, дБ
4	0,10	-39,4	-60,8
6	0,17	-41,7	-64,0
8	0,27	-43,8	-64,8
10	0,40	-44,9	-64,8
12	0,51	-45,3	-63,1
13	0,54	-45,4	-62,9
14	0,60	-45,4	-61,8

Как следует из табл. 1, наличие доплеровского сдвига частоты привело к образованию боковых лепестков на выходе подоптимального

фильтра сжатия. Однако их уровень оказался значительно (на 30 дБ и более) ниже, чем УБЛ на выходе согласованного фильтра при отсутствии доплеровского сдвига частоты [2].

Как следует из табл. 2, при увеличении базы ЛЧМ сигналов имеет место снижение пикового УБЛ (приблизительно на 6 дБ при увеличении базы с 4 до 14).

4. Заключение

Наличие доплеровского сдвига частоты приводит к образованию боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра сжатия. Однако при величинах доплеровского набега фазы (за время длительности ЛЧМ сигнала) не более 24 град уровень боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра значительно ниже, чем на выходе согласованного (не менее, чем на 30 дБ). В частности, для ЛЧМ сигнала с величиной базы, равной 8 при доплеровском набеге фазы, равном 24 град, пиковый и средний уровни боковых лепестков на выходе подоптимального фильтра составили соответственно не более минус 43 дБ и минус 64 дБ.

При увеличении базы ЛЧМ сигналов имеет место снижение пикового уровня боковых лепестков (приблизительно на 6 дБ при увеличении базы с 4 до 14).

Список литературы

- [1] Теоретические основы радиолокации. М.: Советское радио, 1970 / Под ред. Ширмана Я. Д., 560 с.
- [2] Levanon N., Mozeson E.: 'Radar signals', John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004, pp. 57–67.

АППАРАТНОЕ УСКОРЕНИЕ ОБРАБОТКИ ЦИФРОВЫХ РАДИОГОЛОГРАММ В РСА

Лобжанидзе Д.Т.

ОАО Радиотехнический институт имени академика А.Л. Минца

г. Москва, 127083, Российская Федерация

lobzhanidze.david.t@gmail.com

Аннотация: В работе приведены результаты применения средств распараллеливания вычислений, используемых на этапе фокусировки радиолокационных изображений. Предложена гибридная схема (графический процессор и центральный процессор) распараллеливания вычислений. Для оценки возможностей предложенной схемы проведено моделирование радиолокационного изображения с использованием алгоритмов фокусировки цифровых радиоголограмм (ЦРГ).

Ключевые слова: графический процессор, аппаратные средства ускорения, гибридная схема распараллеливания, цифровая радиоголограмма, РСА

1. Введение

При создании радиолокационных станций с синтезированием апертуры (РСА) важную роль играет правильный выбор вычислительных средств, позволяющих проводить формирование радиолокационных изображений (РЛИ) с высокой разрешающей способностью в реальном масштабе времени¹. Необходимость в создании реконфигурируемых и масштабируемых радиолокационных комплексов, имеющих возможность переключения в различные режимы работы в реальном времени и обладающих способностью одновременного выполнения нескольких режимов обзора на единой элементной базе, дало толчок к развитию технологии программно-определяемых радиосистем. Такие компоненты в зарубежной литературе именуются как Software Defined Radio (SDR) [1]. В качестве элементной базы в данной технологии применяются готовые программируемые модули и ячейки, разработанные по стандарту COTS (от англ. Commercially available Off-The-Shelf – готовый, имеющийся в продаже).

С постепенным усовершенствованием технологии SDR и повсеместным внедрением COTS компонентов разработчикам удалось миними-

¹ За обработку сигнала в реальном масштабе времени будем считать время, проведения фокусировки текущей ЦРГ, не превышающей длительности синтеза апертуры необходимой для формирования следующей ЦРГ.

зировать затраты на разработку и эксплуатацию радиотехнических систем и увеличить скорость создания готовых изделий. На сегодняшний день доступна следующая элементная база, изготовленная по технологии COTS: центральные процессоры общего назначения (ЦП), цифровые сигнальные процессоры (ЦСП), интегральные схемы специального назначения, программируемые интегральные логические схемы (ПЛИС) и графические процессоры (ГП). Каждая архитектура имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют область её применения в составе радиолокационной системы.

В то же время всё более востребованы системы РСА, способные формировать изображения во всё более короткие промежутки времени с возможностью совмещения различных режимов, например, режима РСА и режима селекции движущихся целей (СДЦ) [2]. Получение радиолокационных изображений (РЛИ) с высокой разрешающей способностью требует выполнения большого объема вычислений, которые должны быть осуществлены в отведённый промежуток времени. Реализовать данные требования позволяет применение аппаратных средств ускорения вычислений. Принимая во внимание, что обработка сигналов в РСА заключается в выполнении большого количества однотипных операций, подвергающихся распараллеливанию [3,4], можно сделать вывод, что использование в вычислительных средствах (ВС) РСА аппаратных средств ускорения вычислений на базе COTS-компонентов может приблизить скорость обработки сигналов к реальному масштабу времени. Целью исследования является проведение оптимизации методов обработки цифровых радиоголограмм в РСА с использованием гибридной схемы распараллеливания вычислений.

1. Математическая модель

Наблюдаемый объект представим в виде набора блестящих точек, тогда сигнал, отраженный от m -ой блестящей точки будет иметь вид:

$$S_m(t, \hat{t}) = AL\sigma_0 G_0(\theta, \varphi) \exp \left\{ 2\pi j \left(f_n \hat{t} + \frac{K}{2} \left(\hat{t} - \frac{2 \cdot R_m(t)}{c} \right)^2 - f_n \frac{2 \cdot R_m(t)}{c} + \varphi_0 \right) \right\} + \eta \left(\hat{t} - \frac{2 \cdot R_m(t)}{c} \right), \quad (1)$$

где t – медленно меняющееся время, $\hat{t}$ – быстроменяющееся время, A – амплитуда сигнала, L – коэффициент затухания в среде, σ_0 – комплексный коэффициент отражения, G_0 – диаграмма направленности антенны (в общем случае зависящая от углов наклона ДН), f_n – частота несущей, c – скорость света в вакууме, $R_m(t)$ – наклонная дальность до m -ой точки объекта, K – крутизна ЛЧМ сигнала, φ_0 – начальная фаза, $\eta(t)$ – шумовой

сигнал. В общем случае параметры A, L, σ_0 зависят от многих факторов (масштабов времени, частоты, поляризации и др.), но так как в РСА основной вклад вносит фаза сигнала в данной работе будем считать их постоянными и равными 1. В работе также предполагается, что помеховый сигнал скомпенсирован, и в результирующем сигнале будет присутствовать только шумовой сигнал. Подробный вывод (1) представлен в [5]. На сегодняшний день чаще всего в качестве алгоритмов фокусировки ЦРГ применяются два наиболее «простых» метода: алгоритм обработки сигнала в дальностно-доплеровской области [4] и алгоритм ЛЧМ-масштабирования [4].

2 Распараллеливания вычислений

На рис. 1 представлена методика проведения фокусировки РЛИ с использованием гибридной схемы распараллеливания вычислений на базе ГП и ЦП.

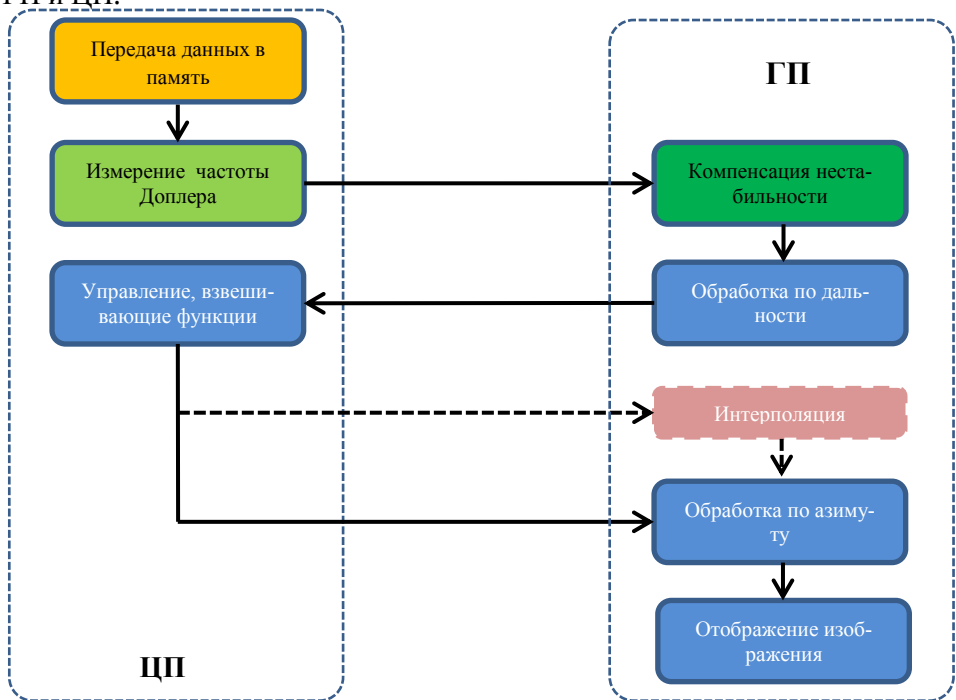


Рис. 1 Предлагаемый метод гибридного распараллеливания вычислений, интерполяция для алгоритма ЛЧМ-масштабирования не проводится.

Программную реализацию исходного кода осуществим средствами среды программирования MATLAB с применением технологии распараллеливания CUDA. В качестве ЦП использовался **Intel® Core™ i7-3770K**, а в качестве ГП использовалась **NVIDIA Quadro GPU 2000**. При проведении экспериментов проводилось моделирование процесса формирования изображения наблюдаемого объекта, задаваемого совокупностью блестящих точек. Первый вариант заключался в моделировании изображения объекта, с размерами 200 на 150 точек, второй вариант объекта имел размеры 600 на 450 точек.

А) Алгоритм обработки сигнала в области «дальность-скорость»

В таблице № 1 представлены результаты

	ЦП		ГП		ЦГ+ГП	
Размер ЦРГ	200x150	600x300	200x150	600x300	200x150	600x300
Время, затраченное на формирование РЛИ	1,5 с	2,0 с	0,37 с	0,42	0,35	0,39
Ускорение	-	-	4	4,76	4,28	5,128

Б) Алгоритм ЛЧМ-масштабирования

В таблице №2 представлены результаты

	ЦП		ГП		ЦГ+ГП	
Размер ЦРГ	200x150	600x300	200x150	600x300	200x150	600x300
Время, затраченное на формирование РЛИ	1,6 с	2,1 с	0,4 с	0,5	0,35	0,37
Ускорение	-	-	4	4,2	4,57	5,67

Применение графических процессоров в системах РСА обосновано и позволяет увеличить скорость вычислений в несколько раз (см. Таблицы №1 и №2). Применение гибридной схемы ускорения вычислений обосновано при фокусировании ЦРГ больших размеров.

Заметим, что скорость обработки сигналов зависит не только от характеристик используемой аппаратуры, но также и от подходов к разработке программного обеспечения. С использованием той же лабораторной установки при правильной оптимизации программы под используемую архитектуру можно было осуществить обработку сигналов с более высокой скоростью.

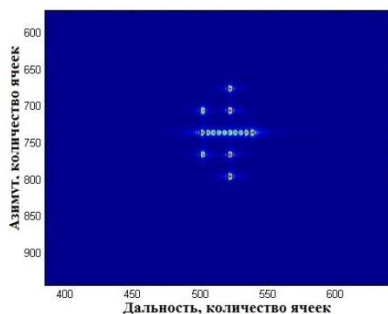


Рис. 1 Радиолокационное изображение объекта, полученное с использованием в РСА алгоритма обработки сигнала в области «дальность-скорость» (размер объекта 200 на 150)

Заключение

В работе показано, что наряду с центральным вычислителем в РСА необходимо использовать аппаратные средства ускорения вычислений. Показано, что использование ГП для аппаратного ускорения обосновано, причём, чем больше размер ЦРГ, тем выше ускорение. Показано, что применение гибридной схемы распараллеливания вычислений имеет свои преимущества для обработки ЦРГ большого размера.

Благодарности

Автор выражает благодарность и особую признательность за внимание к работе и ряд полезных советов ведущему научному сотруднику ОАО РТИ, дтн, заслуженному деятелю науки РФ - Сазонову В.В.

Список литературы

- [1] Debatty T. Software defined RADAR a state of the art / 2nd International Workshop on Cognitive Information Processing (CIP), 2010, p. 253-257.
- [2] Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005, 368с.
- [3] Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны под ред. Горяинова В.Т. М.: Радио и связь. 1988г., 304с.
- [4] Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation / I. G. Cumming, F. H. Wong. - London: Artech House, 2005, 625с.
- [5] Лобжанидзе Д.Т., Сазонов В.В. «Модификация классических алгоритмов формирования РЛИ при синтезировании апертуры для формирования изображений движущихся объектов», «Труды конференции: «Радиолокация, навигация, связь (RLNC*-2016)», Том 3, 2016г. с. 1082-1095.

Super resolution algorithm for inverse synthetic aperture radar imaging of space objects

¹Kazantsev A.A., ²Perov D.A., ¹Samorodov A.A., ¹Samorodov B.A.

¹Mozhaisky space military academy

Saint-Petersburg, 197198, Russian Federation

alexandralexandrkazantsev@gmail.com

²PAO «Radiofizika»

Moscow, 125363, Russian Federation

Abstract: the algorithm for inverse synthetic aperture radar imaging of space objects is presented. Proposed algorithm bases on different signal processing methods combination and allows to achieve better resolution both down and cross ranges compare with traditional Range-Doppler processing. Experimental results demonstrated quality of suggested algorithm.

Keywords: radar imaging, inverse synthetic aperture radar, super resolution, signal processing, anechoic chamber

Алгоритм формирования радиолокационных изображений космических объектов, основанный на комплексировании методов сверхразрешения

¹Казанцев А.А., ²Перов Д.А., ¹Самородов А.А., ¹Самородов Б.А.

¹Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского

г. Санкт-Петербург, 197198, Российская Федерация

alexandralexandrkazantsev@gmail.com

²ПАО «Радиофизика»

г. Москва, 125363, Российская Федерация

Аннотация: представлен алгоритм формирования радиолокационных изображений (РЛИ) космических объектов (КО), основанный на комплексировании методов цифровой обработки когерентных широкополосных (ШП) радиолокационных сигналов. Алгоритм позволяет повысить пространственное разрешение РЛИ КО как по продольной, так и по поперечной координате по сравнению с традиционной дальностно-доплеровской (ДД) обработкой. Приведены результаты экспериментальной отработки алгоритма.

Ключевые слова: радиовидение, инверсный синтез апертуры, сверхразрешение, цифровая обработка сигналов, радиолокационный измерительный комплекс.

1. Введение

Применение ШП когерентных РЛС для обзора околоземного космического пространства позволяет получать РЛИ низкоорбитальных КО. Детальность РЛИ определяется количеством элементов разрешения, приходящихся на радиолокационный образ наблюдаемого КО по координатам продольной и поперечной дальности. При реализации в рассматриваемых РЛС режима инверсного синтезирования апертуры в сочетании с традиционной ДД обработкой, пространственное разрешение формируемых ими РЛИ определяется выражением (1), согласно которому размер элемента разрешения по продольной дальности обратно пропорционален ширине полосы частот зондирующего импульса РЛС F , а по поперечной – обратно пропорционален величине инверсно синтезируемой апертуры Ψ :

$$\Delta x = \frac{c}{2F}, \quad \Delta y = \frac{\lambda_c}{2\Psi}, \quad (1)$$

где: λ_c – средняя длина волны РЛС; c – скорость распространения электромагнитной волны в свободном пространстве.

Технически реализуемая ширина полосы F составляет порядка 10% от средней частоты $F \approx 0.1f_c = 0.1c/\lambda_c$, а величина Ψ лимитирована условием миграции локальных центров рассеяния (ЛЦР) по элементам разрешения РЛИ [1] согласно выражению (2).

$$\Delta y^2 > \frac{\lambda_c X_{max}}{4}, \quad \Delta x \Delta y > \frac{\lambda_c Y_{max}}{4}, \quad (2)$$

где: X_{max} и Y_{max} – максимальные габаритные размеры КО в продольном и поперечном направлениях соответственно. Приведенные выражения описывают принципиальные ограничения пространственного разрешения РЛИ КО, обусловленные как спецификой ДД обработки, так и техническими характеристиками РЛС. Для их преодоления авторами был разработан алгоритм формирования РЛИ, основанный на комплексировании методов сверхразрешения и позволяющий синтезировать РЛИ с повышенным пространственным разрешением в сравнении с традиционной ДД обработкой.

2. Алгоритм

Этапу синтезирования РЛИ КО должен предшествовать ряд предварительных этапов сигнальной обработки: калибровка результатов измерений поляризационных ШП РЛХ КО; компенсация набегов фаз, обусловленных поступательным движением КО относительно РЛС; оценивание закона изменения ракурса наблюдения КО. Полагая, что предварительная обра-

ботка выполнена, примем, что на вход алгоритма поступает поляризационная матрица (ПМ) частотно-ракурсных характеристик (ЧРХ) КО – зависимость комплексного коэффициента рассеяния КО от поляризации на передачу и прием, частоты и ракурса локации:

$$\begin{bmatrix} \dot{S}_{VV}(f, \psi) & \dot{S}_{VH}(f, \psi) \\ \dot{S}_{HV}(f, \psi) & \dot{S}_{HH}(f, \psi) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

1) На первом этапе алгоритма производится поракурсная экстраполяция частотных характеристик (ЧХ) каждой поляризационной компоненты за пределы частотной полосы измерений $f \rightarrow f'$ в соответствии с заданным значением коэффициента экстраполяции $k_{extr} = F'/F$, где F' – требуемая ширина полосы частот. Экстраполяция выполняется за счет применения авторегрессионного (АР) параметрического метода спектрального оценивания Бёрга [2], достоинством которого является устойчивость к низким значениям отношения сигнал/шум (ОСШ) [3], а ключевым недостатком – игнорирование частотных зависимостей локальных центров рассеяния (ЛЦР), приводящее к ошибкам их спектрального оценивания и проявляющееся в ошибках экстраполяции. Установлено, что при $k_{extr} < 3$ ошибки оценивания амплитуд ЛЦР для различных механизмов рассеяния не превышают 15% при локальном ОСШ в 3 дБ. На основе полученных оценок параметров АР-модели $a[m]$, $m = \overline{1, p}$, где m – порядковый номер параметра, а p – порядок АР-модели, выполняется экстраполяция ЧХ посредством применения процедур линейного предсказания (Рис. 1).

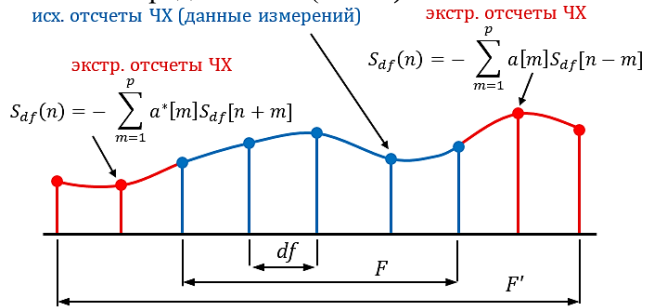


Рис. 1. Экстраполяция ЧХ КО за пределы полосы измерений

Fig. 1. Bandwidth extrapolation

На Рис. 1 $S_{df}[n]$ – дискретная ЧХ; n – номер отсчета ЧХ.

Таким образом, первый этап алгоритма позволяет улучшить разрешение РЛИ по координате радиальной дальности $\Delta x \rightarrow \Delta x'$ в соответствии с заданным значением k_{extr} : $\Delta x' = \Delta x / k_{extr}$, т.е. в k_{extr} раз.

2) На втором этапе алгоритма для каждой поляризационной компоненты экстраполированных ЧРХ КО применяется один из методов продолженной когерентной обработки (ПКО) – полярная обработка [1] (Рис. 2), устраняющая миграцию ЛЦР по элементам разрешения. Её суть заключается в интерполяции ЧРХ $\dot{S}(f, \psi)$, сформированной в координатах частота-ракурс, к характеристике рассеяния объекта, заданной в координатах компонент пространственной частоты $\dot{S}(k_x, k_y)$. Указанный переход $\dot{S}(f, \psi) \rightarrow \dot{S}(k_x, k_y)$ может быть выполнен посредством различных алгоритмов интерполяции: линейной, кубической, сплайн и т.д., выбираемых в зависимости от соотношения требуемой оперативности вычислений и качества интерполяции. К недостаткам любого из перечисленных алгоритмов интерполяции следует отнести шумы, приводящие к снижению локального ОСШ для ЛЦР.

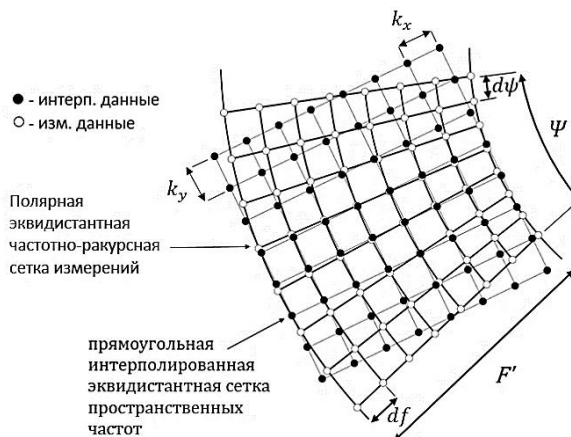


Рис. 2. Полярная обработка

Fig. 2. Polar formatting

Данный этап алгоритма позволяет синтезировать апертуру большего размера $\Psi \rightarrow \Psi'$, т.е. выбирать новое значение размера апертуры Ψ' исходя из условия $\Psi' = \lambda_c F' / c$, что в свою очередь обеспечивает получение РЛИ КО с поперечным разрешением, равным радиальному $\Delta y' = \Delta x'$.

3) На заключительном этапе алгоритма выполняется непосредственно синтезирование двумерного РЛИ КО посредством обращения $\dot{S}(k_x, k_y)$ оператором двумерного обратного быстрого преобразования Фурье (ОБПФ) вдоль компонент пространственной частоты.

3. Экспериментальная обработка алгоритма

Экспериментальная обработка предложенного алгоритма производилась на базе радиолокационного измерительного комплекса «Цунами-3» ВКА им. А.Ф.Можайского. Основными элементами РИК «Цунами-3» являются: безэховая экранированная камера (БЭК); антенный коллиматор; опорно-поворотное устройство (ОПУ) и измерительное оборудование. Схема электродинамического эксперимента представлена на Рис. 3.

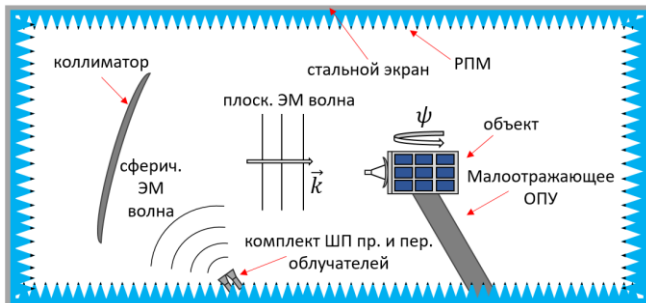


Рис. 3. Схема проведения эксперимента в БЭК

Fig. 3. Scheme of experiment in anechoic chamber

В качестве тестового КО был выбран КА дистанционного зондирования Земли SkySat-2, для которого была изготовлена полномасштабная электродинамическая модель. Внешний вид КА и размещение модели КА на ОПУ в БЭК показаны на Рис. 4.

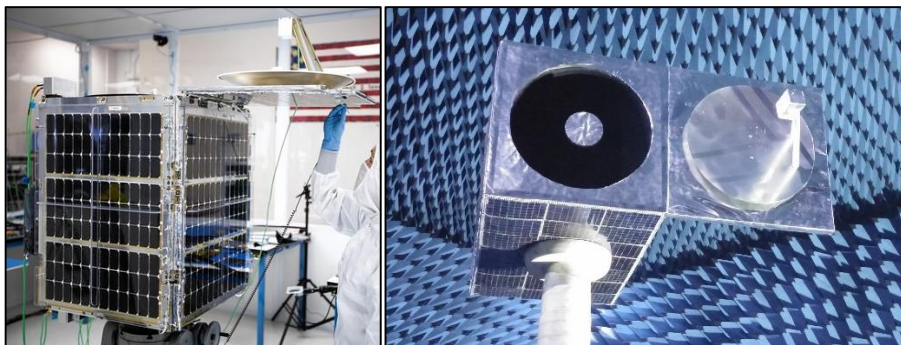


Рис. 4. КА SkySat-2 (слева) и его модель на ОПУ в БЭК (справа)

Fig. 4. – SkySat-2 (left) and full-size scale model on turntable in anechoic chamber (right)

Для обработки алгоритма были проведены измерения РЛХ модели КА в полосе частот $F = 4$ ГГц ($8 < f < 12$ ГГц), секторе ракурсов $\Psi = 0.4$

рад. ($-0.2 < \psi < 0.2$ рад.) в полном линейном ортогональном поляризационном базисе (VV, VH, HV, HH), ракурсу наблюдения $\psi = 0$ соответствовало направление, нормальное к плоскости объектива КА. Для компактности изложения материала далее рассмотрена только HH компонента ПМ ЧРХ. По данным измерений было сформировано две ЧРХ (Табл. 1.), представленные на Рис. 5 (а), (г) соответственно.

Табл. 1 ЧРХ, сформированные по результатам измерений РЛХ модели КА SkySat-2

Table. 1 Frequency-angular characteristics, constructed from measurements results

№ п/п	F , ГГц	f , ГГц	$\Psi(\Psi')$, рад.	$\psi(\psi')$, рад.
1	1.3	9.35...10.65	0.13	-0.075...0.075
2	3.9	8.05...11.95	0.39	-0.195...0.195

1) В соответствии с первым этапом изложенного алгоритма была сформирована ЧРХ в полосе частот $F = 1.3$ ГГц ($9.35 < f < 10.65$ ГГц) и секторе ракурсов $\Psi' = 0.39$ рад. ($-0.195 < \psi' < 0.195$ рад.). Далее она была экстраполирована вниз и вверх по частоте при $k_{extr} = 3$, новое значение полосы частот составило $F' = 3.9$ ГГц ($8.05 < f' < 11.95$ ГГц). Экстраполированная ЧРХ представлена на Рис. 5 (б).

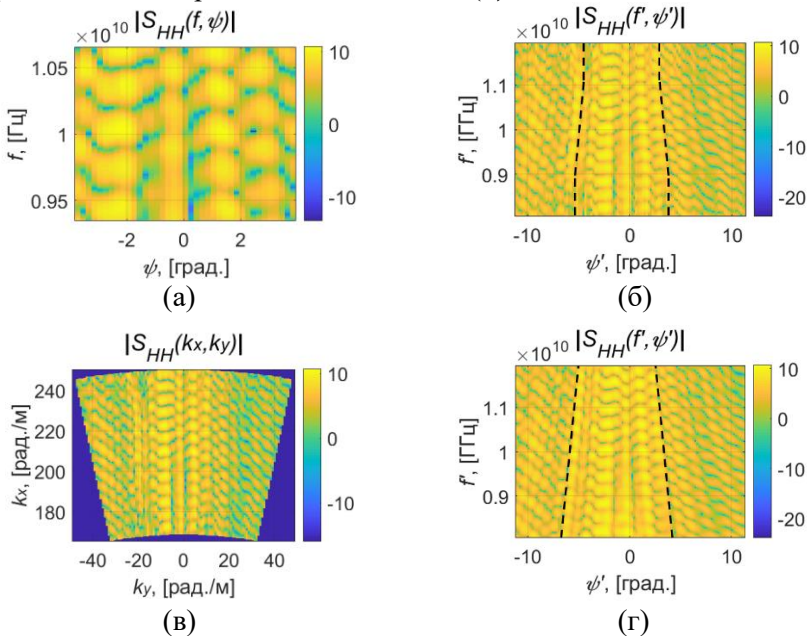


Рис. 5. РЛХ модели SkySat-2

Fig. 5. Backscattering radar characteristics of SkySat-2 model

Сравнение добавленных поверх ЧРХ пунктирных линий на Рис. 5 (б) и (г) показывает проявление характера ошибок экстраполяции, которое является следствием игнорирования частотных зависимостей ЛЦР.

2) Далее соответствии со вторым этапом разработанного алгоритма экстраполированная ЧРХ была интерполирована к сетке компонент пространственной частоты $S(f', \psi') \rightarrow S(k_x, k_y)$ (Рис. 5 (в)).

3) На заключительном этапе были сформированы РЛИ модели КА, представленные на Рис. 6: (а) – посредством ДД обработки по исходной ЧРХ, приведенной на Рис. 5 (а); (б) – посредством ДД обработки по экстраполированной в расширенном диапазоне ракурсов наблюдения ЧРХ, приведенной на Рис. 5 (б); (в) – посредством разработанного алгоритма по данным характеристики, приведенной на Рис. 5 (в); (г) – посредством численного интегрирования ЧРХ, сформированной по всему набору данных измерений и представленной на Рис. 5 (в). Таким образом, РЛИ на Рис. 6 расположены в порядке улучшения качества.

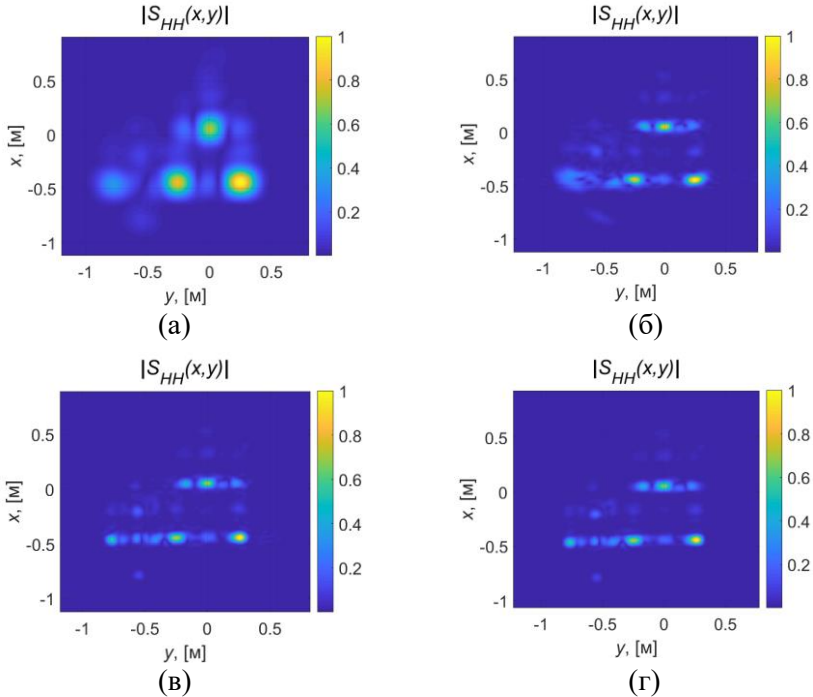


Рис. 6. РЛИ электродинамической модели КА SkySat-2

Fig. 6. SkySat-2 full size scale model radar images

Из Рис. 6 видно, что РЛИ (в), сформированное посредством разработанного алгоритма, наиболее полно соответствует эталонному РЛИ (г), позволяя достаточно достоверно оценить форму, продольный и поперечный размеры основных элементов конструкции КА, в отличие от РЛИ (а), полученного посредством традиционной ДД-обработки. РЛИ на Рис. 6 (б) демонстрирует необходимость применения алгоритмов ПКО после выполнения экстраполяции ЧХ, так как по нему нельзя достоверно оценить размеры тех или иных элементов конструкции КА в силу наличия эффекта миграции ЛЦР. Согласно выражению (2) для КА больших размеров указанный эффект будет проявляться сильнее, следовательно, возрастает необходимость комплексирования методов сверхразрешения.

4. Заключение

Предложенный алгоритм ориентирован на реализацию в перспективных РЛС радиовидения с инверсным синтезированием апертуры и позволяет существенно повысить их информационные возможности по наблюдению КО. Апробация алгоритма с использованием результатов полунатурного физического моделирования подтверждает его возможности по улучшению разрешения формируемого РЛИ при обработке ЧРХ КО, измеренных в ограниченной полосе частот.

Список литературы

- [1] Ausherman D.A., A.Kozma, J.L.Walker, H.M.Jones, E.C.Poggio. Developments in radar imaging, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, vol. 20, no. 4, pp. 363-400.
- [2] Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis. PhD thesis. Stanford University. 1975.
- [3] P.Stoica, R.Moses. Spectral Analysis of Signals. Pearson Education. 2005. P. 512

References

- [1] Ausherman D.A., A.Kozma, J.L.Walker, H.M.Jones, E.C.Poggio. Developments in radar imaging, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1984, vol. 20, no. 4, pp. 363-400.
- [2] Burg J.P. Maximum Entropy Spectral Analysis. PhD thesis. Stanford University. 1975.
- [3] P.Stoica, R.Moses. Spectral Analysis of Signals. Pearson Education. 2005. P. 512

Research of possibilities to obtain information about atmospheric turbulence by means of navigational upper-air sounding systems

Plokhikh O.V., Ivanov V.E., Kudinov S.I.

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin

Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

o.v.plohih@urfu.ru, v.e.ivanovekt@gmail.com, kudinoffs@mail.ru

Abstract: We study possibilities to obtain information about atmospheric turbulence by means of navigational upper-air sounding systems using signals of the GLONASS, GPS global navigation satellite systems. It is shown that the measurement accuracy of radio-sonde coordinates and the speed by the navigational upper-air sounding system gives new opportunities for measurement of wind thin structure and estimation of atmospheric turbulence. The sounding coordinate and telemetry data used in the research are obtained by the "POLYUS" domestic navigational upper-air sounding system.

Keywords: upper-air sounding systems, radiosonde, satellite radio navigational systems, GLONASS, GPS, atmospheric turbulence.

Исследование возможностей получения информации о турбулентности атмосферы навигационными системами радиозондирования

Плохих О.В., Иванов В.Э., Кудинов С.И.

Уральский федеральный университет имени первого Президента

России Б.Н. Ельцина

г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

o.v.plohih@urfu.ru, v.e.ivanovekt@gmail.com, kudinoffs@mail.ru

Аннотация: Исследуются возможности получения информации о турбулентности атмосферы навигационными системами радиозондирования, использующими сигналы глобальных спутниковых навигационных систем ГЛОНАСС, GPS. Показано, что точность измерения координат и скорости радиозонда навигационной системой радиозондирования предоставляет новые возможности для измерения тонкой структуры ветра и оценки турбулентности атмосферы. В исследовании

использованы координатно-телеметрические данные зондирований отечественной навигационной системой радиозондирования «Полюс».

Ключевые слова: *системы радиозондирования атмосферы, радиозонд, спутниковые радионавигационные системы, ГЛОНАСС, GPS, турбулентность атмосферы.*

1. Введение

Системы радиозондирования (СР) атмосферы, следящие за запускаемыми на газонаполненном шаре в свободную атмосферу аэрологическими радиозондами (АРЗ), являются основным средством получения точной аэрологической информации в слое до 30-40 км. Информация о состоянии атмосферы необходима широкому кругу потребителей. Она используется для составления прогнозов погоды и опасных атмосферных явлений, таких как ливни, грозы, град, а также для метеорологического обеспечения полетов авиации, пусков ракет и др. В мировой практике сформировались два основных типа СР, отличающихся методом измерения координат АРЗ [1]:

- радиолокационные (угломерно-дальномерные и угломерные),
- навигационные.

В угломерно-дальномерных СР, для измерения координат используется радиолокационная или радиопеленгационная станция (РЛС). Навигационные СР используют сигналы радионавигационных систем. Первые навигационные СР были разработаны за рубежом и использовали наземные системы «Лоран» и «Омега». В 90-х годах благодаря лучшим характеристикам их вытеснила глобальная спутниковая радионавигационная система позиционирования GPS. В России в настоящее время применяют в основном радиолокационные СР типа АВК, Вектор-М и МАРЛ-А, но в 2009 году был разработан и испытан макет [2], а в 2011 в РФ был испытан опытный образец отечественной СР, использующей сигналы ГЛОНАСС, GPS и получившей название «Полюс» [3].

Обычно СР выдают информацию о ветре в виде последовательности оценок среднего направления и скорости (либо средней зональной и меридиональной составляющих) горизонтального ветра в слоях некоторой толщины, распределенных по высоте зондирования. Радиолокационные СР вычисляют средний ветер по координатам в слое от 200 до 1000 м (в зависимости от удаления АРЗ). Навигационные СР способны получать удовлетворительные оценки в более тонких слоях, вычисляя среднюю скорость по координатам, или сглаживая данные измерений мгновенной скорости АРЗ, что эквивалентно усреднению [4]. Усреднение и сглаживание выполняют для обеспечения заданной точности измерений скорости и

фильтрации прецессии АРЗ. Радиолокационные СР типа Вектор-М способны различить эти колебания только вблизи локатора (не далее 2 км), а навигационные СР отслеживают их на протяжении всего полета, как по координатам, так и по скорости.

2. Получение измерений с высоким разрешением

Национальные и международные метеорологические сети обычно используют для моделирования и прогнозов сокращенные наборы данных аппроксимирующие измеренные СР поля распределения параметров по высоте. Поэтому измерение тонкой структуры поля ветра в этих сетях не ставится, хотя в последнее время в сетях замечена тенденция сбора данных о полях параметров атмосферы с повышенным разрешением по высоте [5].

В некоторых случаях потребителей интересует более детальная картина распределения параметров по высотам. Например, для исследования вихрей и торнадо ученым необходимо метровое разрешение по высоте [6]. Для обеспечения пусков ракет космического назначения (РКН) и полетов авиации требуется информация о турбулентности атмосферы, сдвиги и градиенты ветра в слоях толщиной от 100 до 10 метров. Существующие радиолокационные СР не справляются с такими задачами. Навигационные СР обладают более высокой точностью измерений и разрешением, поэтому потенциально могут продвинуть нас в оценке поля ветра. Данная работа посвящена поиску и оценке возможностей получения информации о турбулентности атмосферы навигационными СР.

Темп обновления данных в навигационных СР составляет 1-2 с. Скорость подъема шара обычно 4-8 м/с. Поэтому теоретически достижимое разрешение по высоте составляет 5-10 м. Его можно ещё улучшить снижая скорость подъема шара до 1-2 м/с, но в этом случае ухудшается оперативность зондирования и значительно увеличивается дальность полета АРЗ. Для измерения тонкой структуры ветра важно минимизировать вес АРЗ, а для полей температуры и влажности – использовать датчики с малой постоянной времени [7].

Анализ данных зондирования СР «Полюс» показывает, что даже в обычном режиме измерений, не дифференциальном, среднеквадратическая ошибка измерения относительных координат во время зондирования около 1 м [8], поэтому по координатной информации, в принципе, можно оценивать ветер в тонких слоях толщиной вплоть до 10-20 м. Применение дифференциального режима измерений может еще повысить разрешение и

точность. Второй способ оценки поля ветра заключается в обработке навигационных данных о скорости движения АРЗ. Среднеквадратическая ошибка измерения скорости по данным производителей навигационных приемников порядка 0.05-0.1 м/с, что, в принципе, могло бы привести нас к получению еще более тонкой структуры поля ветра. В обоих случаях мешает помеха, возникающая из-за раскачивания АРЗ на фале шара-оболочки по мере подъема. Поэтому измеренные координаты и скорость необходимо предварительно фильтровать, что является отдельной проблемой при сохранении высокого разрешения по высоте [4].

3. Определение турбулентных участков

В теории турбулентности сформулированы ряд критериев, определяющих турбулентное состояние атмосферы. В качестве примера можно привести число Ричардсона [9]

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\frac{dT}{dz} + \gamma_a}{\left(\frac{dV}{dz}\right)^2} \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, T – средняя температура в слое, $\gamma_a = 0,01$ °C/м – адиабатический градиент температуры, z – высота. Турбулентность должна наблюдаться в тех слоях, где Ri не превышает некоторого критического значения. Для вычисления Ri по результатам температурно-ветрового зондирования требуется хорошее разрешение по высоте. Вычисление числа Ричардсона по данным радиолокационного зондирования не нашло широкого практического применения из-за больших ошибок его определения. Навигационные СР обеспечивают необходимое разрешение с запасом.

Тщательный анализ координатной информации зондирования СР «Полус» позволил нам предложить новый способ поиска зон с резким изменением скорости и направления ветра, характерных для турбулентных участков, завихрений и границы слоев среды с отличающимися динамическими характеристиками. Как было отмечено выше, АРЗ раскачивается на фале шара. Разрешение навигационной СР позволяет отслеживать прецессию (колебания) зонда, подвешенного к газонаполненной оболочке на расстоянии 10..20 м. Упрощенно систему шар-зонд можно представить в виде маятника с подвижной точкой подвеса, а колебания по осям трехмерной системы координат условно считать гармоническими с медленным затуханием. Трение оболочки с воздухом при подъеме приводит к возникно-

вению турбулентных завихрений в кильватере шара и флуктуациям точки привязки радиозонда. Когда шар-оболочка попадает в слой воздуха, скорость и направление которого движения существенно отличаются от предыдущего, фаза колебания зонда должна скачкообразно измениться.

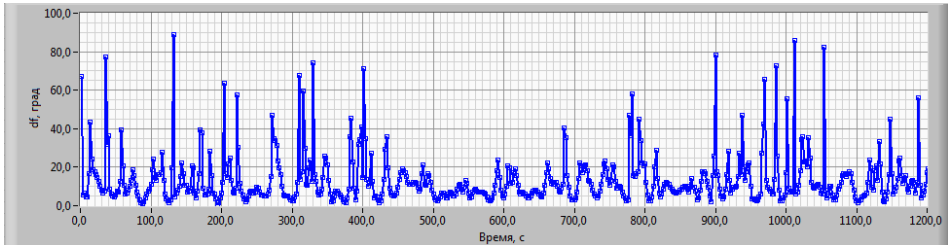


Рис. 1. Производная фазы колебаний радиозонда во время зондирования
Fig. 1. Phase derivative of radiosonde swing during sounding

Таким образом, модель движения АРЗ можно представить в виде траектории движения шара по ветру и гармонического сигнала в общем виде со случайной фазой и амплитудой. В области спокойного течения воздуха наблюдаются случайные скачки фазы в результате завихрений в кильватере шара, в зоне турбулентности и резкой смены ветра изменения фазы сопровождаются изменением амплитуды. Аналогичная ситуация наблюдается в канале скорости АРЗ. На рис. 1 приведен пример выделенного сигнала изменения фазы колебаний по одной координате. Поэтому выделение и анализ информации о фазе и амплитуде колебаний АРЗ.

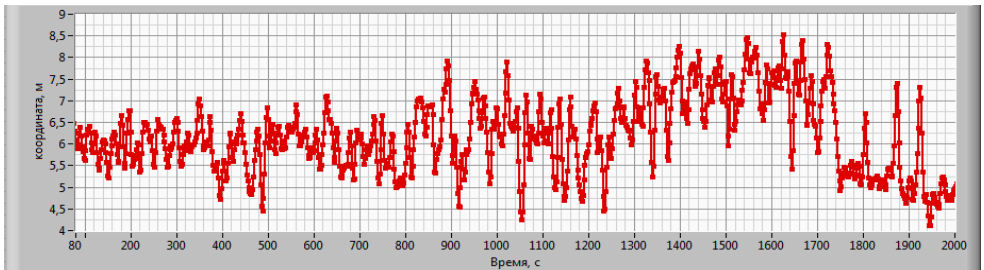


Рис. 2. Изменение скорости подъёма радиозонда во время полёта
Fig. 2. Changing of the radiosonde raising velocity during a flight

Выделяя и анализируя информацию о фазе и амплитуде колебаний АРЗ можно параллельно решать две смежные задачи: а) формировать новый индикатор для поиска зон турбулентности, б) адаптивно фильтровать координаты и скорость АРЗ. Успешное решение последней приводит с

снижению динамической ошибки измерения ветра и усиливает возможности оценки тонкой структуры поля ветра. Дополнительно можно оценивать скорость вертикального подъема АРЗ. Увеличение скорости подъема связано с наличием восходящих потоков воздуха, участвующих в механизме возникновения турбулентности (см. рис. 2).

4. Заключение

Таким образом, в работе исследованы возможности получения информации о турбулентности атмосферы и оценке тонкой структуры ветра навигационными системами радиозондирования. Показано, что точность и высокое разрешение навигационных СР на базе ГЛОНАСС/GPS позволяют получать такие оценки, но требуется разработать соответствующие алгоритмы провести комплексные испытания.

Список литературы

- [1] Иванов В.Э., Гусев А.В., Игнатков К.А., Кудинов С.И., Малыгин И.В., Носков В.Я., Плохих О.В., Рысев В.В., Черных О.А. Современное состояние и перспективы развития систем радиозондирования атмосферы в России // Успехи современной радиоэлектроники. 2015. № 9. С. 3–49.
- [2] Плохих О.В., Иванов В.Э. Некоторые результаты разработки системы радиозондирования атмосферы на основе спутниковых навигационных платформ GPS-ГЛОНАСС. // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. Санкт-Петербург: 2009, вып. 6 (тематический выпуск «Широкополосные сигналы и системы»). С. 66-74.
- [3] Плохих О.В., Иванов В.Э., Черных О.А., Сурков Д.В., Шишов Н.В. Система радиозондирования атмосферы с радионавигационным измерением координат по сигналам ГЛОНАСС/GPS // 23-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», Севастополь, 8-13 сентября 2013 г.: материалы конф. в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. С. 1132-1133.
- [4] Плохих О.В. Повышение эффективности оценки скорости ветра в системах радиозондирования атмосферы // 25-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2015), Севастополь, 6-12 сентября 2015 г.: Матер. конф. в 2 т. Севастополь, 2015. С. 1194–1195.
- [5] World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO-No8, 2008 edition, updated in 2010. - CH-1211 Geneva 2, Switzerland, 2012, 714 p.
- [6] Ben B. Balsley, Lakshmi Kantha, William Colgan. On the Use of Slow Ascent Meter-Scale Sampling (SAMS) Radiosondes for Observing Overturning Events in the Free Atmosphere // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, vol. 27:4, pp. 766-775.
- [7] Плохих О.В., Гусев А.В. Аэрологический радиозонд повышенной точности // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4-10 сентября 2016 г. : материалы конф. в 13 т. Москва ; Минск ; Севастополь, 2016. Т.10. С. 2228-2233.

[8] Плохих О.В., Иванов В.Э., Кудинов С.И. Результаты испытаний составных частей системы аэрологического радиозондирования атмосферы космодрома «Восточный» // 26-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2016). Севастополь, 4-10 сентября 2016 г. : материалы конф. в 13 т. - Москва ; Минск ; Севастополь, 2016. Т.10. С. 2166-2172.

[9] Обуков А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Ленинград: Гидрометеоздат, 1988. 413 с.

References

[1] Ivanov V.E., Gusev A.V., Ignatkov K.A., Kudinov S.I., Malyigin I.V., Noskov V.Ya., Plohih O.V., Ryisev V.V., Chernyih O.A. [Current Status and Development Prospects of Atmosphere Radio Sensing Systems in Russia]. *Uspehi sovremennoy radioelektroniki [Successes of modern electronic engineering]*, 2013, no. 9, pp. 3–49. (In Russian).

[2] Plokhikh O. V., Ivanov V. E. [Some results of development of the upper-air sounding system based on the satellite navigation GPS-GLONASS platforms]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij Rossii. Radioelektronika (tematicheskij vypusk «Shirokopolosnye signaly i sistemy»)*. Sankt-Peterburg: 2009, vol. 6, pp. 66-74. (In Russian).

[3] Plokhikh O. V., Ivanov V. Je., Chernyh O.A., Surkov D.V., Shirshov N.V. Upper-air sounding system with radio navigational measurement of coordinates by GLONASS/GPS signals. *23rd Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2013)*. Sevastopol, 2013, pp. 1132-1133. (In Russian).

[4] Plokhikh O. V. Efficiency increase of the wind velocity estimation in the upper-air sounding systems. *25th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2015)*. Sevastopol, 2015, pp. 1194–1195. (In Russian).

[5] World Meteorological Organization. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO-No8, 2008 edition, updated in 2010. - CH-1211 Geneva 2, Switzerland, 2012, 714 p.

[6] Ben B. Balsley, Lakshmi Kantha, William Colgan. On the Use of Slow Ascent Meter-Scale Sampling (SAMS) Radiosondes for Observing Overturning Events in the Free Atmosphere. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, vol. 27:4, pp. 766-775.

[7] Plokhikh O. V., Gusev A.V. The upper-air radiosonde increased accuracy. *26th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2016)*. Sevastopol, 2016, vol. 10, pp. 2228-2233. (In Russian).

[8] Plokhikh O.V., Ivanov V.E., Kudinov S.I. Test results of components of the «Vostochnyj» spaceport aerological upper-air radio sounding system. *26th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2016)*. Sevastopol, 2016, vol. 10, pp. 2166-2172. (In Russian).

[9] Obukhov A.M. [Turbulence and dynamics of the atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 413 p. (In Russian).

Алгоритм идентификации протяженных объектов подстилающей поверхности по сигналу импульсного радиовысотомера

Сорокин А.К., Важенин В.Г., Смертин А.Е.
Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
sorokinak@urfu.ru

Аннотация: Рассмотренный в статье алгоритм позволяет определить тип протяженного объекта подстилающей поверхности («полоса/граница») по критерию, основанному на сравнении площадей пересечения плотностей вероятности распределения амплитуды отраженного сигнала, одно из которых получено в процессе полета, а другое является эталонным, соответствующим известным типовым подстилающим поверхностям. По результатам сравнения выбирается та эталонная плотность распределения, которая обеспечивает наибольшую площадь пересечения. Выбор типа протяженного объекта («полоса/граница») основан на сравнении его ширины с диаметром пятна облучения.

Ключевые слова: радиолокация, навигация, импульсный радиовысотомер, протяженный объект, обработка сигнала.

1. Введение

При навигации на маршрутном участке необходимо обеспечивать коррекцию местоположения ЛА при навигации в автономном режиме. В качестве источника информации о местоположении ЛА предложено использовать протяженные объекты, как естественного (границы естественных поверхностей: вода/лес, поле/вода), так и искусственного происхождения (асфальтовая и грунтовая дорога) [1, 2]. В этом случае датчиком может быть импульсный радиовысотомер, фиксирующий максимальные значения амплитуды отраженного сигнала. Полученные значения амплитуды накапливаются и по ним строится плотность вероятности распределения амплитуды отраженного сигнала, которая является информационным параметром в алгоритме идентификации. Далее текущая плотность сравнивается с эталонными и выбирается максимально близкая, т.е. принимается решение о типе подстилающей поверхности. Рассмотренный в статье алгоритм отличается от алгоритмов на основе применения известных критериев согласия (Колмогорова-Смирнова, хи-квадрат, Мизеса-Смирнова и пр.) тем, что позволяет определить момент смены типа под-

стилающей поверхности, но не позволяет оценить уровень значимости. Физический смысл уровня значимости показывает с какой вероятностью можно доверять принятому решению (вероятность второго порядка). Оценка времени пересечения границы при равномерном прямолинейном движении позволяет оценить ширину протяженного объекта, что расширяет возможности коррекции местоположения летательного аппарата.

2. Описание алгоритма

Как было показано в предыдущем разделе, информационным параметром алгоритма является плотность вероятности распределения значений амплитуды отраженного сигнала. Для оценки вероятности совпадения эталонной и текущей плотности распределения применяется функционал сравнения следующего вида:

$$\Phi_{q,k} = P(f_q | f_k) = \sum_i \min(f_q(i); f_k(i)),$$

где i – номер отсчета гистограммы (плотности распределения),

$f_q(u)$ и $f_k(u)$ – текущая и эталонная плотности вероятности распределения амплитуды (u) отраженного сигнала соответственно; $P(f_q | f_k)$ – условная вероятность совпадения текущей и эталонной плотности вероятности.

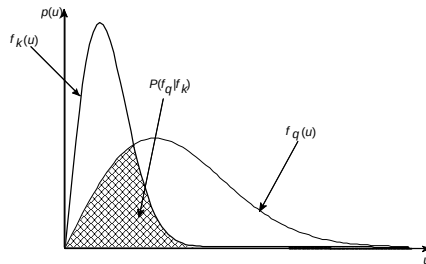


Рис. 1. Функционал сравнения

Вычисленное значение функционала сравнения сопоставляется с пороговым значением вероятности Υ_k и отбраковывается по следующему правилу:

$$H_k = \begin{cases} P(f_q | f_k), & P(f_q | f_k) > \Upsilon_k \\ 0, & P(f_q | f_k) < \Upsilon_k \end{cases},$$

H_k – при превышении порога Υ_k пропускает значение на входе, иначе 0;

Υ_k – порог для поверхности типа k , вычисляется экспериментально для каждого типа подстилающей поверхности.

Для принятия решения о типе подстилающей поверхности используется решающее правило:

$\Lambda(q) = \arg \max_k [\Phi_{q,k}]$ – решающее правило, выбирает эталон с наибольшим значением функционала сравнения.

Алгоритм идентификации типа подстилающей поверхности может быть представлен в виде следующей схемы:

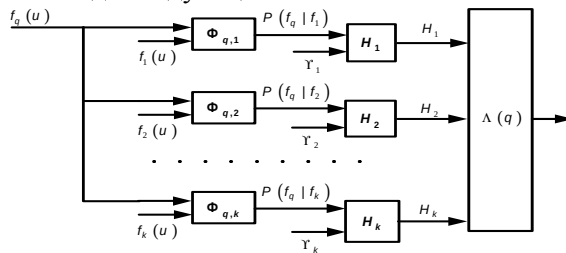


Рис. 2. Схема идентификации типа подстилающей поверхности

В процессе перемещения ЛА меняется вид текущей плотности вероятности, соответственно меняется принятое решение о типе подстилающей поверхности. Моменты смены решения фиксируются, как показано на рисунке.

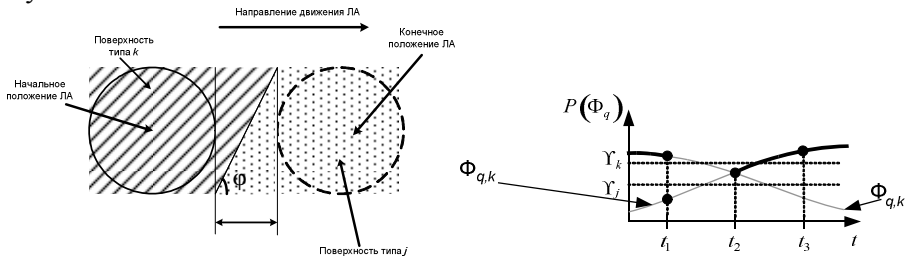


Рис. 3. Смена типа подстилающей поверхности

В процессе полета меняется тип подстилающей поверхности, (например, рис. 3). По моментам смены типа подстилающей поверхности оценивается ширина протяженного объекта и принимается решение о типе протяженного объекта по следующей формуле (движение полагается равномерным и прямолинейным, что позволяет связать время и перемещение):

$$\Gamma = \begin{cases} \mu, & \text{если } \Delta t \leq T_0 \\ \eta, & \text{если } \Delta t > T_0 \end{cases},$$

где Γ – решение о типе протяженного объекта; T_0 – время пролета пятна облучения; Δt – интервал времени, на котором принято решение Φ_k ; μ – решение о том, что обнаружена полоса; η – решение о том, что обнаружена граница.

Таким образом, алгоритм позволяет оценить тип подстилающей поверхности, местоположение протяженного объекта и его ширину, а также идентифицировать его тип «полоса/граница».

3. Сравнение разработанного критерия с критерием согласия Колмогорова-Смирнова

В ранних работах, например [3], приводилась информация о применении алгоритма в различных условиях, в том числе в случае доплеровской фильтрации, а также результаты обработки данных натурных испытаний. В данной статье приведен результат сравнения разработанного алгоритма с критерием Колмогорова-Смирнова.

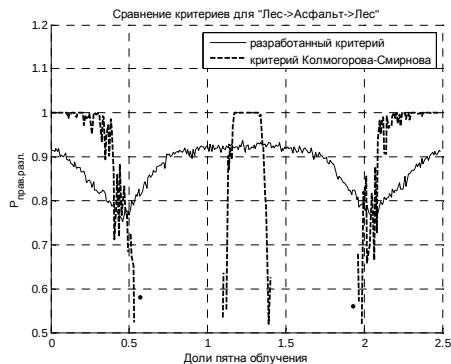


Рис. 4. Результаты сравнения с критерием согласия Колмогорова

В результате модельных испытаний на феноменологической факетной модели была получена функция максимума апостериорной вероятности, показывающая, где было принято решение о типе подстилающей поверхности и с какой вероятностью (см. рис. 3), на рис. 4 она отмечена тонкой линией. Минимумы этой функции показывают положение границ протяженного объекта. Местоположение минимумов функции апостериорной вероятности не совпадает с положением реальных границ, но ошибка

смещения может быть вычислена для каждого сочетания типовых подстилающих поверхностей.

Критерий Колмогорова-Смирнова также как и разработанный критерий работает с выборкой значений и позволяет принимать решение о принадлежности текущего распределения эталонной выборке. В отличие от предложенного алгоритма критерий Колмогорова-Смирнова позволяет задавать уровень значимости принятого решения. Далее оценивалось, какому уровню значимости критерия Колмогорова-Смирнова соответствует полученное расхождение оценок интегральных распределений вероятности, результаты показаны на рис. 4 пунктирной линией. Из рисунка следует, что критерий Колмогорова-Смирнова при увеличении расстояний между распределениями (смена типа подстилающей поверхности) очень быстро падает в минус бесконечность. В результате на протяженном участке полета решение вообще не принимается, что не позволяет определять местоположение границы раздела подстилающих поверхностей, аналогично ведут себя другие критерии, поскольку опираются на фиксированный уровень значимости.

4. Заключение

Таким образом, в работе предложен алгоритм идентификации протяженных объектов и показано, что разработанный алгоритм в отличие от известных алгоритмов, позволяет определять местоположение границы смены типа подстилающей поверхности.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.2538.2017/4.6).

Список литературы

- [1] Skolnik M. I., "Radar Handbook", Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008. 1351p.
- [2] Ulaby F. T. Handbook of Radar Scattering Statistics for Terrain. ARTECH HOUSE, 1989. 358p.
- [3] Sorokin, A. K. The application of pulse altimeter for linear references detection / A. K. Sorokin, V. G. Vazhenin, L. L. Lesnaya // 2nd International Symposium on Computer Vision and the Internet (VisionNet 2015) Proceeding. – India, aug. 10-13, 2015. – Procedia Computer Science. – Volume 58. – 2015. – Pp. 659-664.

Seminatural modeling of a radar signal propagation with compensation for digital inaccuracy of propagation delay

A.S. Bokov, V.G. Vazhenin, E.F. Zapolskikh
 Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N.Yeltsin
 Yekaterinburg, 620002, Russian Federation
 a.s.bokov@urfu.ru

Abstract: We study ways of develop of retransmission simulators for the propagation of radar signals based on digital radio frequency memory (DRFM). When various communication and radar systems are operating in the laboratory, a simulator of radar signals makes it possible to provide an end-to-end performance check of the system from the microwave path to signal processing algorithms. With variable broadband modulation parameters, to allow correct coherent and / or average statistical processing, the delayed signal should be formed with a delay of exactly the corresponding specified variable propagation range. The proposed method of synchronizing the operation of DRFM allows us to compensate for discreteness over the range of propagation when simulating variable delay and frequency shift.

Keywords: seminatural modeling, chirp, airborne altimeter, radar system, digital radio frequency memory (DRFM).

Полунатурное моделирование распространения радиолокационных сигналов с компенсацией дискрета по задержке распространения

Боков А.С., Важенин В.Г., Запольских Е.Ф.
 УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
 г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
 a.s.bokov@urfu.ru

Аннотация: В докладе рассмотрены пути построения ретрансляционных имитаторов распространения радиолокационных сигналов на основе цифровой радиочастотной памяти (DRFM). При работе различных связанных и радиолокационных систем в лабораторных условиях с имитатором радиолокационных сигналов имеется возможность провести сквозную проверку функционирования системы от СВЧ-тракта до алгоритмов обработки сигналов. При переменных

параметрах модуляции широкополосного сигнала, для возможности корректной когерентной и/или среднестатистической обработки, задержанный сигнал должен быть сформирован с задержкой точно соответствующей заданной переменной дальности распространения. Предложенный метод синхронизации работы DRFM позволяет компенсировать дискрет по дальности распространения при имитации переменных значениях задержки и доплеровского сдвига частоты.

Ключевые слова: полунатурное моделирование, линейная частотная модуляция, бортовой радиовысотомер, радиолокатор, цифровая радиочастотная память.

1. Введение

На пилотируемых и беспилотных летательных аппаратах (ЛА) применяются различные радиолокационные системы (РЛС), например, для всепогодного измерения высоты и скорости полета над поверхностью используют радиовысотомеры и радиовысотомерные системы (РВ и РВС), доплеровские и корреляционные измерители скорости и сноса. Для эффективной предполетной проверки функционирования различных бортовых РЛС, в том числе при взаимодействии с другим бортовым оборудованием, могут использоваться имитаторы отраженного эхо-сигнала.

Имитатор в составе комплекса полунатурного моделирования (ПНМ) в зависимости от радиолокационных задач РЛС может формировать сигнал учитывающий особенности многолучевого отражения от реальных целей, растительных, снежных, ледовых слоев подстилающей поверхности, наличие и величину доплеровского сдвига частоты, в том числе в форме сложных дальномерных и/или доплеровских портретов имитируемой фоноцелевой обстановки и т.д.

Системы с длительным или непрерывным зондирующим сигналом часто работают в так называемом следящем режиме, когда параметры излучаемого сигнала (период повторения, амплитуда, длительность импульса, крутизна модуляции) могут непредсказуемо меняться в каждом периоде модуляции.

Поэтому наиболее универсальные имитаторы работают путем преобразования зондирующего СВЧ-сигнала с антенны радиопередатчика РЛС в эквивалентный отраженный радиолокационный сигнал, подаваемый на антенну радиоприемника РЛС, с учетом имитации движения ЛА по заданной траектории над заданной поверхностью. Выполнение преобразования сигнала вместо генерирования, позволяет учесть неидеальности всех блоков и СВЧ тракта конкретного образца РЛС, сохраняется возможность последующей когерентной обработки сигнала в РЛС.

2. Типовая схема имитатора отраженных сигналов

Для проверки взаимодействия с другим бортовым оборудованием, для исследования точностных характеристик РЛС и РВС, радиолокационную цель (или поверхность) часто достаточно представить одним точечным отражателем с коэффициентом отражения соответствующим эффективной площади рассеяния (ЭПР) реальной цели. В этом случае программное обеспечение имитатора устанавливает требуемые значения ослабления, задержки и доплеровского сдвига частоты. Аппаратура выполняет эти преобразования зондирующего сигнала в произвольной последовательности для получения эхо-сигнала в реальном масштабе времени.

Рассмотрим вариант функциональной схемы ретрансляционного имитатора, см. рис. 1, для формирования отраженного сигнала $X(t)$ из входного (зондирующего) радиосигнала $A(t)$. Данная схема может работать с произвольными сигналами в полосе рабочих частот блоков цифровой обработки сигналов (ЦОС).

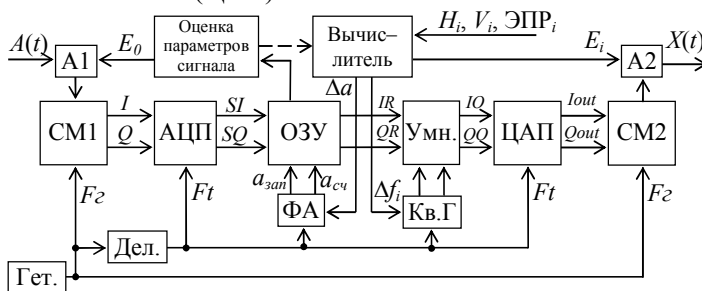


Рис. 1. Схема ретрансляционного имитатора для формирования эхо-сигнала

Fig. 1. Block diagram of the retransmitting simulator for echo-signal production

Значения имитируемой высоты для РВ (или дальности для РЛС) H_i , относительной скорости V_i , эффективной площади рассеяния $ЭПР_i$, поступают в вычислитель из управляющей ЭВМ и определяют текущие параметры i -й блестящей точки или facets поверхности для РВС (цели для РЛС): задержку τ_i , сдвиг частоты Δf_i и затухание E_i . Коэффициент E_0 , поступающий на вход аттенюатора A1, подбирается при ручной или автоматической калибровке в зависимости от мощности входного сигнала $A(t)$ для оптимального уровня сигнала на входе АЦП.

Зондирующий радиосигнал $A(t)$, поступающий с выхода передатчика РВ, предварительно ослабляется в аттенюаторе A1, в смесителе CM1 с использованием сигнала гетеродина частотой F_2 , переносится с несущей ча-

стоты на промежуточную с разложением на квадратурные составляющие I и Q , оцифровывается в двухканальном АЦП с частотой дискретизации $Ft = Fz/n$, где n – коэффициент деления делителя. Далее квадратурные составляющие сигнала SI и SQ запоминаются в ОЗУ, реализующем функцию линии задержки (ЛЗ), затем считываются с задержкой τ_i :

$$\tau_i = 2 H_i / c . \quad (1)$$

Для формирования этой задержки в вычислителе и в формирователе адресов (ФА) рассчитывается соответствующая требуемая разность циклических адресов записи $a_{зан}$ и считывания $a_{сч}$:

$$\Delta a = (a_{зан} - a_{сч}) = \tau_i \cdot Ft . \quad (2)$$

Для учета необходимого доплеровского сдвига частоты сигнала в цифровом умножителе происходит смещение сигнала по частоте [1] путём комплексного умножения квадратурных составляющих сигнала на квадратурный гармонический сигнал с частотой Δf_i от блока «Кв.Г». Этот сигнал может формироваться, например, типовым для ЦОС блоком – прямого цифрового синтеза (DDS), частота которого для длины волны излучения λ и скорости сближения V_i рассчитывается в вычислителе:

$$\Delta f_i = 2 V_i / \lambda . \quad (3)$$

Сформированный сигнал, соответствующий отраженному сигналу от подвижной по дальности цели (высоте ЛА над поверхностью), в смесителе СМ2 переносится на радиочастоту, ослабляется в аттенуаторе А2 на величину E_i (для имитации затухания, соответствующего дальности и ЭПР_{*i*}, блестящей точки), и излучается либо подается непосредственно на вход радиоприемника РВ/ РЛС при лабораторном тестировании.

Цифровая часть схемы рис. 1, от АЦП до ЦАП включительно, может быть реализована с использованием отдельных микросхем, либо с использованием комплексных решений – «систем на кристалле», например СБИС 1879ВМ3(DSM) [1]. В указанной специализированной СБИС имеются 8 параллельных «сигнальных каналов» для выполнения базовых функций ЦОС. Поэтому один сигнальный канал программируется на запись в ОЗУ и от 1 до 7 каналов работают на считывание для нескольких имитируемых блестящих точек [2].

Очевидно, что значения адресов $a_{зан}$ и $a_{сч}$ – целые числа, что является причиной дискретности такого способа изменения задержки сигнала.

На практике, запись и считывание из ОЗУ могут выполняться блоками данных, а не одиночными отсчётами сигналов. По этой причине величина дискрета по задержке увеличивается в соответствующее число раз. Обозначим k – количество отсчётов в одном блоке данных, тогда для ми-

нимальной, но большей нуля разности ($a_{зан} - a_{сч}$) = k из (2), найдем значения дискретов по задержке $\Delta\tau$ и дальности ΔH :

$$\Delta\tau = k / Ft; \quad (\tau = 2H / c); \quad \Delta H = k \cdot c / (2 \cdot Ft). \quad (4)$$

Для примера, для СБИС 1879ВМ3 $k = 8$, т.к. при блочной потоковой обработке используются 128-и разрядные слова для двух квадратурных 8-и разрядных отсчетов. Тогда при $Ft = F_2/n = 4160 \text{ МГц} / 8 = 520 \text{ МГц}$, получим $\Delta\tau \approx 15,4 \text{ нс}$; $\Delta H \approx 2,3 \text{ м}$.

В рассмотренной схеме при изменении частоты гетеродина F_2 пропорционально меняется и дискрет установки имитируемой дальности. Это можно использовать для компенсации дискрета по задержке распространения. Например, для несущей частоты около 4200 МГц изменение частоты F_2 на 5 МГц, сдвинет задержки на 0,12%, т.е. для «соседних» значений высоты 1000 м и 1002,3 м при тех же значениях цифровых счетчиков адресов сигнальной памяти получим смещенные значения высот: 1001,2 м и 1003,5 м. Т.е. плавное изменение частоты будет сопровождаться плавным изменением имитируемой дальности. Этот подход неудобен при практической реализации, особенно для продолжительной имитации сложной фоноцелевой обстановки и рельефных подстилающих поверхностей.

3. Схема имитатора с двумя тактовыми частотами ЦОС

Для различных типов РВС и РЛС, для потенциальной возможности имитации более сложных условий отражения, была предложена структура имитатора с вариативным принципом формирования величины задержки сигнала [3] при котором используются две разные тактовые частоты для входных и выходных блоков ЦОС имитатора – см. DDS1 и DDS3 на рис. 2.

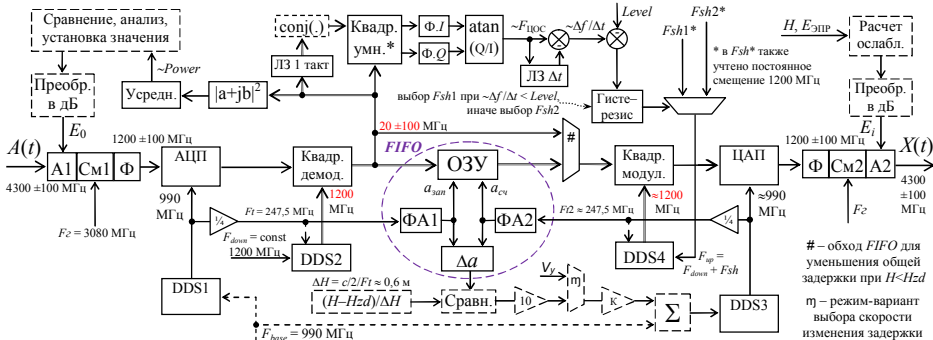


Рис. 2. Схема имитатора с вариативным принципом формирования эхо-сигнала

Fig. 2. Block diagram of the simulator with the variable principle of echo-signal production

Входной $A(t)$ и выходной $X(t)$ аналоговые сигналы проходят аттенюаторы А1, А2, смесители См1, См2 и полосовые фильтры Ф с полосой 1200 ± 100 МГц. Для уменьшения тактовой частоты ЦОС и для получения возможности квадратурной обработки, после АЦП в квадратурном демодуляторе применен сдвиг частоты на величину 1200 МГц. Обратное повышение частоты реализовано аналогично в квадратурном модуляторе. Также реализована возможность внести дополнительный переменный сдвиг частоты F_{sh} , корректируемый по результатам ЦОС в верхней части схемы на рис. 2, что используется для имитации малых высот [4] и для имитации доплеровского сдвига частоты: $F_{up} = F_{down} + F_{sh}$.

На схеме Δa – блок контроля работы *FIFO*, работающий в соответствии с (2), но так как здесь используются два различных формирователя адресов, то дискретная ошибка устраняется, несмотря на целочисленное значение разницы адресов записи $a_{зан}$ и считывания $a_{сч}$. Если в блоке сравнения $\Delta a = (a_{зан} - a_{сч})$ не соответствует $nDelay = \text{round}((H - Hzd)/\Delta H)$, где $\Delta H = c/2Ft \approx 0,6$ м, H – заданная высота, Hzd – минимальная задержка в имитаторе, то блок прямого цифрового синтеза DDS3 изменяет тактовую частоту работы блоков квадратурного модулятора и ЦАП.

Реализация такого имитатора выполнена на модуле «Деталь-ЦОС-B1», содержащего систему на кристалле XC7Z045 семейства *Zynq-7000 All-Programmable System on Chip (AP SoC)* включающую двух-ядерный процессор *ARM CORTEX A9* 1 ГГц и ПЛИС семейства *Kintex-7*.

Блоки, выделенные на рис. 2 штриховой линией, реализуются программно в процессоре *ARM CORTEX A9*. Более подробное описание схемы и алгоритма ЦОС для формирования эхосигнала приведено в [4].

4. Заключение

При разработке и реализации цифрового метода имитации задержки отраженных радиолокационных сигналов важно уменьшение дискрета по дальности, т.к. это позволит снизить методические ошибки имитации связанные с неопределенностью параметров РВ на всех высотах.

Для полной компенсации дискрета по задержке распространения в имитаторе отраженного сигнала предложено гибко управлять тактовыми частотами блоков ЦОС.

Рассмотренный вариативный метод синхронизации работы *DRFM* более прост в реализации и удобен для имитации как точечных, так и распределенных целей по сравнению с другими известными методами цифровой имитации задержки отраженных радиолокационных сигналов. При

этом возможна проверка всей аппаратуры во всех лётных режимах для типовых, граничных, а также для «запредельных» сочетаний параметров траектории и фоноцелевой обстановки. Все моделируемые условия можно многократно воссоздавать и повторять, что позволяет выполнять усовершенствование алгоритмов работы и взаимодействия бортовых систем ЛА.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по исследованиям, выполняемым в рамках проектов при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 8.2538.2017/4.6).

Список литературы

- [1] Процессор 1879BM3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://module.ru/upload/files/vm3.pdf> (проверен 17.07.2017).
- [2] Боков А.С., Важенин В.Г., Дядьков Н.А., Мухин В.В., Щербakov Д.Е., Пономарев Л.И. Патент 2568899 (РФ). Имитатор радиолокационной цели при зондировании преимущественно длительными сигналами. Опул. в Б. И., 2015. № 32. 10 с. Онлайн доступ: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=29&docid=2568899> (проверен 17.07.2017).
- [3] Имитатор сигнала радиолокатора с синтезированной апертурой. С.В. Валов, А.И. Сиротин, С.В. Щербakov. Патент РФ №2522502. Опул. в Б. И., 2014. № 20. 17 с.
- [4] Боков А.С., Важенин В.Г., Гусев А.В., Нагашибаев Д.Ж., Иофин А.А. Имитатор отраженного сигнала с адаптацией к параметрам излучаемого сигнала радиовысотомера с частотной модуляцией / «Надежность и качество: труды XXII Международного симпозиума» под. ред. Н.К. Юркова. Пенза : ПГУ, 2017. Том 2. С. 45-49.

References

- [1] Processor 1879BM3. Available at: <http://module.ru/upload/files/vm3.pdf> (accessed 17.07.2017). (In Russian).
- [2] Bokov A.S., Vazhenin V.G., Dyadkov N.A., Mukhin V.V., Shcherbakov D.E., Ponomarev, L.I. Patent 2568899 (RU). Radar target simulator when probing with primarily long signals. 2015, Bull. 32. 10 p. Available at: <http://www.fips.ru/cdfi/fips.dll?ty=29&docid=2568899> (accessed 17.07.2017). (In Russian).
- [3] Valov S.V., Sirotn A.I., Shcherbakov S.V. Patent 2522502 (RU). Synthetic aperture radar signal simulator. 2014, Bull. 20. 17 p. (In Russian).
- [4] Bokov A.S., Vazhenin V.G., Gusev A.V., Nagashibayev D.Zh., Iofin A.A. Simulator of reflected signal with adaptation to emitted signal parameters of a frequency modulation radio altimeter / *Nadezhnost i kachestvo: trudy XXII Mezhdunarodnogo simpoziuma* (Proceedings, ed. by N.K. YUrkov). Penza: PGU, 2017. vol. 2. pp. 45-49. (In Russian).

Acknowledgements

The paper is based on the research, which is conducted in the framework of grant of the Ministry of education and science of the Russian Federation (project № 8.2538.2017/4.6).

The scheme of the FMCW georadar direct coupling signal rejection

¹Kalmykov A.A., ¹Shaidurov K.D.

¹Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N.Yeltsin
Yekaterinburg, 620002, Russian Federation
k.d.shaidurov@ieee.org

Abstract: Digital simulation of the FMCW georadar direct coupling rejection is carried out. Functional model of circuit is created in AWR VSS with embedded MATLAB code. Calculation of the direct coupling signal frequency, modulation, demodulation and rejection of the coupling signal are demonstrated. There is achieved an increase in dynamic range of the analog-to-digital converter up to $25\div 30$ dB or 4-5 bits due to suppression of the high power coupling signal.

Keywords: ground penetrating radar, linear frequency modulation, digital processing

Схема подавления сигнала прямого прохождения в ЛЧМ георадаре

¹Калмыков А.А., ¹Шайдуров К.Д.

¹Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
k.d.shaidurov@ieee.org

Аннотация: Осуществляется цифровое моделирование схемы подавления сигнала межантенной связи в георадаре с ЛЧМ. Построена функциональная модель схемы в системе AWR VSS с вложенным кодом MATLAB. Показан процесс вычисления частоты сигнала прямого прохождения, демодуляции и режекции паразитного сигнала. За счёт подавления мощной помехи достигнуто увеличение используемого динамического диапазона АЦП на $25\div 30$ дБ или 4-5 бит разрядности.

Ключевые слова: подповерхностная радиолокация, линейная частотная модуляция, цифровая обработка

1. Введение

Одним из главных недостатков георадара с непрерывным излучением является сигнал прямого прохождения, или паразитная межантенная связь.

Из экспериментов с макетом георадара ОБЧ диапазона авторами установлено, что мощность отражения от хорошо проводящего объекта на небольшой дальности примерно на $25 \div 30$ дБ меньше мощности сигнала межантенной связи. Имея 16-битный АЦП и настраивая усилитель ПЧ по уровню межантенной связи, мы неэффективно используем участок ДД АЦП. По примерной оценке потеря разрядности составляет 4-5 бит.

Решение данной проблемы актуально для применения в ОБЧ георадаре с мобильной синтезируемой апертурой [1]. Авторами предлагается вариант устранения паразитного сигнала засветки, берущий начало в публикации [2]. Задача данной работы состоит в переходе от математической модели алгоритма (MATLAB) к функциональной модели (AWR VSS+MATLAB). Это позволяет задать многие реальные параметры элементов и узлов. При этом допускается упрощение, которое состоит в том, что вместо задержек принимаемых сигналов, формирующих дальностные сигналы биений осуществляется непосредственный сдвиг частоты принимаемого сигнала на соответствующую определённой дальности частоту.

2. Описание модели

Построенная схема была разбита на отдельные модули. Для реализации стадии цифровой обработки привлекается пакет MATLAB, вызываемый в реальном режиме времени. Общая схема изображена на рис.1. Здесь присутствуют следующие блоки:

- Блок S_1 “transmitted” – DDS, формирующий излучаемый ЛЧМ сигнал $\{F_H + f_{ЛЗ}, F_B + f_{ЛЗ}\}$. Модулирующая функция этого ЛЧМ содержит добавку $f_{ЛЗ}$.
- Блок A_1 – канал распространения в свободном пространстве. Содержит три канала: S_0, S_1, S_2 , где S_0 – канал межантенной связи, S_1 и S_2 – каналы отражённых сигналов. Каналы заданы затуханием A и сдвигом частоты f .
- Блок S_2 “basic_LO” – DDS, формирующий опорный ЛЧМ сигнал $\{F_H, F_B\}$. Блока аналогичен блоку S_1 , отличие заключается в отсутствии сдвига модулирующей функции $f_{ЛЗ}$, имитирующего линию задержки.
- Блок S_3 “IF_loop” – канал оценки частоты межантенной связи. Смесь сигналов после преобразования на ПЧ фильтруется от ВЧ составляющих фильтром F_1 и через АЦП попадает в суб-блок A_9 “MATLAB”. В этом суб-блоке имитируется работа DSP, вычисляющего ДПФ и оценивающего частоту сигнала межантенной связи $\hat{f}_0$.
- Блок S_4 “IF_signal” – канал оценки частот сигналов биений. Этот канал является “информационным”, результаты его оцифровки являются выходным сигналом аналоговой части ЛЧМ локатора. Данный блок состоит из

ФНЧ F_4 для устранения ВЧ-составляющих после смесителя и полосно-заграждающего фильтра-“пробки” F_7 , режектирующего сигнал межантенной связи на частоте F_0 .

- Блоки A_7 и A_8 являются смесителями с параметрами, соответствующими реально применяемым смесителям.

DDS блока S_1 формирует излучаемый ЛЧМ сигнал, включая частотную поправку $f_{ЛЗ}$, эквивалентную наличию линии задержки. Сигнал ЛЧМ с частотами $\{F_H + f_{ЛЗ}, F_B + f_{ЛЗ}\}$ проходит через канал распространения A_1 , в котором приобретает пропорциональные дальностным задержкам сдвиги частот f_0 , f_1 и f_2 , а также относительные затухания.

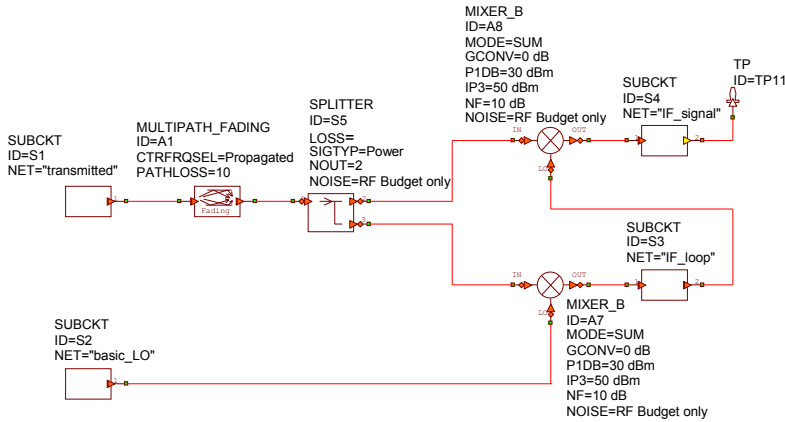


Рис. 1. Схема модели
Fig. 1. The scheme of the circuit

Далее, в смесителе A_7 происходит демодуляция принимаемого из канала A_1 сигнала с помощью опорного ЛЧМ из блока S_2 , не формирующего никаких задержек ($\{F_H, F_B\}$). Таким образом, область частот спектра сигналов биений, включая $\{f_0, f_1, f_2\}$, оказывается на ненулевой ПЧ $f_{ЛЗ}$. При этом сигнал межантенной связи, оказавшийся на частоте $f_{ЛЗ} + f_0$, по мощности значительно превосходит сигналы отражений. При этом частота f_0 “гуляет” в зависимости от расстояния между антеннами.

Далее, в канале оценки частоты межантенной связи происходит фильтрация и оцифровка узкополосного сигнала биений. Оценка частоты межантенной связи $\hat{f}_0$ осуществляется с помощью кратковременного ДПФ (STFT) [3], после чего переводится в управляющий код аккумулятора фазы

DDS и суммируется с модулирующей функцией. Генерируется второй опорный ЛЧМ с частотами $\{F_H + \hat{f}_0, F_B + \hat{f}_0\}$.

На последнем этапе происходит перемножение принимаемого и второго опорного сигналов, в результате чего сигнал межантенной связи «центрируется» на выбранной нами промежуточной частоте $f_{ЛЗ}$:

$$\tilde{f}_0 = (F_H + f_{ЛЗ} + f_0) - (F_H + \hat{f}_0) \approx f_{ЛЗ}. \quad (1)$$

При этом, соответственно, сигналы биений приобретают частоты:

$$\tilde{f}_i \approx f_{ЛЗ} + (f_i - \hat{f}_0), \quad (2)$$

где f_i – реальная частота i -го отражения, $\hat{f}_0$ – оценка частоты межантенной связи и $\tilde{f}_i$ – оцифрованная частота i -го отражения с учётом смещения к нулевой дальности по частоте межантенной связи.

3. Результаты моделирования

Каналы высокой частоты (RF)

Для моделирования заданы три канала распространения радиоволн $\{S_0, S_1, S_2\}$ с эквивалентными времени задержки частотами $\{0.4 \text{ MHz}, 1.07 \text{ MHz}, 1.53 \text{ MHz}\}$ и затуханием в канале $\{0 \text{ dB}, 25 \text{ dB}, 35 \text{ dB}\}$. Первый канал соответствует паразитной межантенной связи, второй и третий – сигналам биений от отражателей. Их частоты не кратны частоте дискретизации. Затухание в каналах сигналов биений выбрано 25 дБ и 35 дБ.

Также модуляция передаваемого ЛЧМ имеет добавку $f_{ЛЗ} = 10.7 \text{ МГц}$, что эквивалентно смещению спектра полезных сигналов на данную ПЧ. Частота 10.7 МГц выбрана как одна из стандартных частот, на которые производятся высокочастотные фильтры ПАВ и керамические фильтры.

Спектр принимаемого ЛЧМ сигнала с учётом добавки ПЧ и задержек в канале распространения показан на рис.2, розовая линия. Спектр опорного ЛЧМ (синяя линия) не содержит никаких частотных добавок и применяется для демодуляции сигнала в канал оценки частоты межантенной связи. Маркерами обозначены границы исходного ЛЧМ 50...140 МГц, получаемого из DDS.

Канал оценки частоты межантенной связи

На вход смесителя канала оценки частоты межантенной связи поступают опорный (несмещённый) ЛЧМ и принимаемый из свободного пространства (канала A_1) ЛЧМ. На выходе смесителя присутствуют результаты преобразования частоты вниз, а также ВЧ продукты перемножения ЛЧМ сигналов (рис.2, чёрная линия). После применения ФНЧ с полосой 20 МГц, устраняющего все высокочастотные составляющие спектра, получаем сиг-

нал со спектром рис.2, красная линия. Спектр ПЧ в узкой полосе после передискретизации изображён на рис.3, синяя линия. Маркер $m1$ обозначает максимальную спектральную составляющую сигнала межантенной связи с частотой 11.13 МГц, что примерно соответствует ожидаемой частоте $f_{лз} + f_0 = 10.74 + 0.4 = 11.14$ МГц. Следующие, сигнальные компоненты имеют частоты 11.82 МГц и 12.28 МГц при ожидаемых $f_{лз} + f_1 = 10.74 + 1.07 = 11.81$ МГц и $f_{лз} + f_2 = 10.74 + 1.53 = 11.27$ МГц.

Далее отфильтрованная смесь сигналов на частоте ПЧ поступает в блок MATLAB, осуществляющий вычисления в среде MATLAB через .m-файл. Оценка частоты $\hat{f}_0$ преобразуется в код фазы и поступает на сумматор модулирующей функции.

Канал оценки частоты биений

На вход смесителя канала оценки частот биений поступают опорный (адаптивный) ЛЧМ и принимаемый из свободного пространства (канала A_1) ЛЧМ. После фильтрации аналогичным ФНЧ с полосой 20 МГц получаем спектр, приведённый на рис.2, зелёная линия, и рис.3, зелёная линия. Отличия в спектре видно лишь на “низкочастотном” спектре рис.3. Наблюдается спектральный пик межантенной связи с частотой 10.73 МГц, маркер $m2$. Ожидаемая частота $f_{лз} + f_0 - \hat{f}_0 = 10.74 + 0.4 - 0.4 = 10.74$ МГц. Таким образом, можно заключить, что область спектра, содержащего биения и межантенную связь, сместился таким образом, что частотный пик межантенной связи установился в точку 10.74 МГц (10.7 МГц при идеальном DDS), что принимается за нулевую дальность при дальнейшей обработке сигналов биений.

Последним этапом сигнал фильтруется полосно-заграждающим фильтром 10 порядка с характеристикой Чебышева 1 типа с центральной частотой 10.7 МГц (рис.3, красная линия). Видно, что, несмотря на рассогласование, спектральный пик межантенной связи подавлен в значительной степени. Уверенно выделяются спектральные пики с частотами 11.4 МГц и 11.87 МГц (маркеры $m3$ и $m4$ соответственно). При этом ожидаемые частоты

$$\tilde{f}_1 \approx f_{лз} + (f_1 - \hat{f}_0) = 10.74 + (1.07 - 0.4) = 11.41 \text{ (МГц)}, \quad (3)$$

$$\tilde{f}_2 \approx f_{лз} + (f_2 - \hat{f}_0) = 10.74 + (1.53 - 0.4) = 11.87 \text{ (МГц)}. \quad (4)$$

Мощность амплитудных составляющих спектров биений составляет -64 дБм и -69 дБм соответственно (маркеры $m3$ и $m4$), тогда как мощность сигнала межантенной связи снизилась с -30 дБм (маркер $m1$) до уровня шума. Ослабление полезных сигналов составило не более 10 дБ, тогда как сигнал прямого прохождения подавился более чем на 100 дБ.

Также видно прошедшую до выхода схемы составляющую спектра с частотой 9.937 МГц (маркер *m5*), являющуюся продуктом преобразования в канале оценки частот биений. Данная составляющая легко может быть отфильтрована цифровым фильтром.

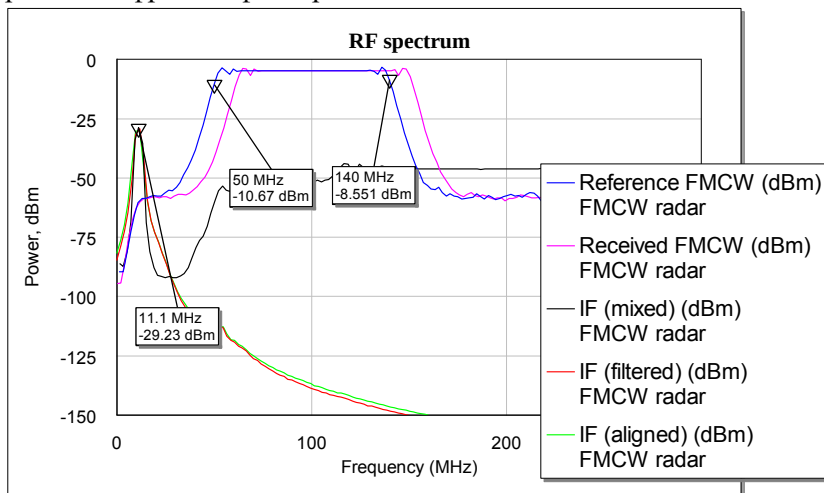


Рис. 2. ВЧ спектры сигналов

Fig. 2. HF spectrums

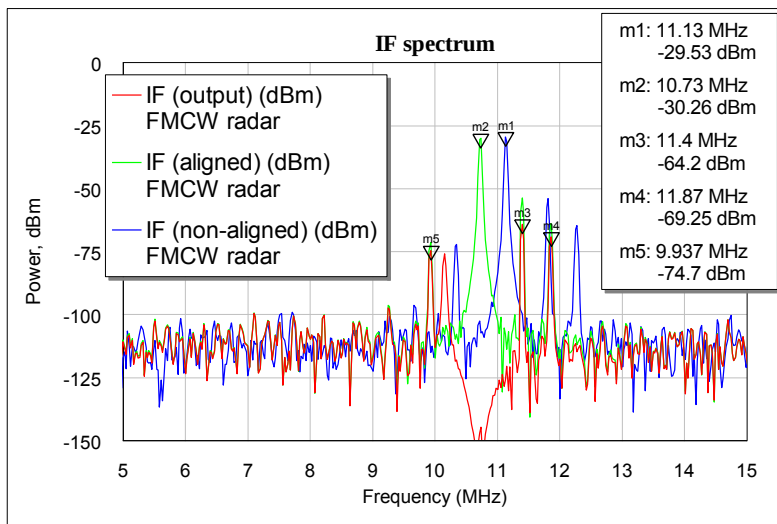


Рис. 3. ПЧ спектры сигналов

Fig. 3. IF spectrums

4. Заключение

В качестве краткого обсуждения результатов приведём следующие соображения. Функциональное моделирование позволило осуществить эксперимент по подавлению паразитного сигнала межантенной связи с априори неизвестной частотой. Представленные графики демонстрируют основные этапы демодуляции сигнала, его обработки, вычисления частоты сигнала межантенной связи и повторной демодуляции.

Важной особенностью рассматриваемой схемы является относительная простота реализации прототипа. В самом деле, модель построена из высококачественных, но, тем не менее, легкодоступных устройств-АЦП, DDS смесители. Все фильтры имеют постоянные параметры и могут реализовываться на основе элементов с сосредоточенными параметрами.

Построение схемы из функциональных блоков позволило гибко задавать множество параметров её узлов и модулей, приближая модель к реальности. Например, использование смесителя в AWR VSS в отличие от простой операции перемножения в MATLAB на стадии демодуляции значительно обогащает спектр продуктами преобразования, как видно по спектрам рис.3.

Список литературы

- [1] Калмыков А.А., Шайдуров К.Д. Оценка возможности построения подповерхностного радиолокатора ОБЧ диапазона на основе синтезированной ММО-апертуры // 25-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, 6-12 сентября 2015 г.: материалы конф. в 2 т. Севастополь, 2015. С. 505-506.
- [2] Калмыков А.А., Шайдуров К.Д. Особенности оконного спектрального анализа сигналов подповерхностного радиолокатора с ЛЧМ // 26-я Междунар. Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, 4-10 сентября 2016 г.: материалы конф. в 2 т. Севастополь, 2016. С. 2598-2604.

References

- [1] Kalmykov An. A. Shaidurov, K.D. Consideration of the possibility of creating subsurface VHF radar based on synthetic MIMO-aperture //25-th Int. Crimean Conference "Microwave equipment and telecommunication technologies», Sevastopol, September 6-12th, 2015. conference materials in 2 vol. Sevastopol, 2015. pp. 505-506.
- [2] Kalmykov A.A., Shaidurov K.D. Features of window spectral analysis of subsurface radar signals with LFM//26-th Int. Crimean Conference "Microwave equipment and telecommunication technologies», Sevastopol, September 4-10th, 2016. conference materials in 2 vol. Sevastopol, 2016. pp. 2598-2604.

Особенности интерферометрической обработки радиолокационных данных космических аппаратов SENTINEL-1

Сосновский А.В., Коберниченко В.Г., Хамидуллина С.Р.

*Уральский федеральный университет
им. первого Президента России Б.Н. Ельцина
г. Екатеринбург, 620002, Российская Федерация
vgkobern@mail.ru*

Аннотация: В докладе проведен обзор характеристик, режимов съемки и форматов представления данных радиолокатора с синтезированной апертурой, установленного на космических аппаратах Sentinel-1A/B. Проанализированы возможности программного комплекса SNAP для интерферометрической обработки радиолокационных данных Sentinel-1 (С-диапазона) в задачах построения карт смещений поверхности. Показано, что данные, полученные при малых перпендикулярных составляющих интерферометрической базы, имеют когерентность, достаточную для получения устойчивой интерференционной картины для большинства типов подстилающих поверхностей.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрическая съёмка, карты смещений рельефа, интерферометрическая когерентность, Sentinel-1, SNAP

1. Введение

В настоящее время построение цифровых моделей рельефа (ЦМР) и обнаружение подвижек рельефа стали основными задачами, решаемыми на основе обработки данных современных радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1,2]. Важной тенденцией последнего времени стало использование концепции «открытых данных» при распространении результатов радиолокационной космической съёмки. Проект Copernicus Европейского космического агентства [3], запущенный в середине 2010-х гг., позволил в режиме, близком к реальному времени, предоставлять открытый доступ к радиолокационным и многозональным оптическим данным, получаемым семейством космических аппаратов SENTINEL. Особый интерес среди них представляет тандем аппаратов SENTINEL-1 A/B. Целью настоящей работы является исследование особенностей интерферометрической обработки радиолокационных данных

этих аппаратов, а также оценка возможностей при построении карт изменений поверхности.

2. Особенности радиолокационных данных SENTINEL-1

Аппараты Sentinel-1 осуществляют радиолокационную съёмку в следующих режимах [3]:

1) маршрутный (stripmap, SM), который обеспечивает пространственное разрешение 5x5 м, ширине полосы захвата – 80 км при шести возможных положениях полосы захвата (от 18.3 до 46.8 градусов по углу съёмки). Данный режим используется в исключительных случаях – при наблюдении последствий стихийных бедствий;

2) интерферометрический широкозахватный (Interferometric wide swath, IW): разрешение (азимут – наклонная дальность) – 20x5 м, ширина полосы захвата – 250 км (29.1 – 40.0 градусов). Съёмка ведётся по технологии TOPSAR (Terrain observation with progressive scans – наблюдение с прогрессивным сканированием), которая от стандартной Скансар тем, что использует дополнительное электрическое сканирование луча по азимуту в направлении движения носителя в пределах каждой из трёх субполос, которые на границах имеют перекрытие величиной до 2 км. В азимутальном направлении в результате переключения лучей в каждой из полос формируются субкадры (до 9 на одну субполосу кадра). Этот режим съёмки является основным;

3) сверхширокозахватный (Extra wide swath, EW): схож с предыдущим, но полоса захвата составляет 400 км, используется 5 субполос, разрешение – 40x20 м. Используется для мониторинга ледовой обстановки и других задач мониторинга океана;

4) режим мониторинга волнений (wave mode, WM) – режим наблюдения, при котором формируется серия неперекрывающихся изображений, получаемых при двух разных углах обзора (23 и 36.5 градусов) и расположенных в шахматном порядке (leapfrog-последовательность); размер каждого кадра – 20x20 км, расстояние между центрами кадров внутри каждой субполосы – 100 км. Данный режим существовал и в предыдущих аппаратах Европейского космического агентства (ERS-1/2, ENVISAT) и применяется для мониторинга морских течений и выявления волн-убийц (freak-waves).

Для первых трёх режимов съёмка ведётся в режимах одной (ВВ, ГГ) или двух поляризаций (ВВ+ВГ или ГГ+ГВ), в режиме волнений – в одной. В подавляющем большинстве случаев используется поляризационный ре-

жим ВВ+ВГ; для территории России съёмка в ГГ- и ГГ+ГВ-поляризациях имеется только на территории островов Северного ледовитого океана.

3. Экспериментальная обработка данных SENTINEL-1

Для обработки данных ESA был разработан свободно распространяемый программный комплекс SNAP (Sentinel Application Platform [5,6]). В пакете реализованы многие типовые операции обработки и анализа радиолокационных данных. Процедуры обработки, специфичные для режима Sentinel-1 IW, реализованы отдельно в блоке Sentinel-1 TOPS. Вместе с тем, часть ключевых этапов интерферометрической обработки (развёртывание фазы и расчёт смещений по методу постоянных отражателей) непосредственно в пакете не реализованы, и для их выполнения требует взаимодействие со сторонним программным обеспечением. Так, для развёртывания фазы требуется использование свободно распространяемой утилиты SNAPHU Стэнфордского университета [7], реализующей метод минимальной стоимости потока [8]. Для анализа смещений в SNAP предусмотрен экспорт данных в формат пакета StaMPS [9], разработанного и свободно распространяемого Лидским Университетом.

Экспериментальная обработка данных SENTINEL-1 проводилась на дифференциальной интерферометрической паре SENTINEL-1B, полученной в осенне-зимний период с интервалом 36 суток. Перпендикулярная составляющая базы была равна 12,8 м (высота неоднозначности – 1228 м); исследуемая местность – всхолмлённая, с преобладанием крупной растительности.

Когерентность интерферометрической пары оценивалась двумя способами: классическим (по коэффициенту корреляции) и с демодуляцией пространственной частоты с помощью 2-БПФ [10]. На рис. 1 представлены функции распределения карт когерентности для участков, преимущественно свободных от лесной растительности. Из распределений можно сделать вывод, что получение интерференционной картины и проведение интерферометрии возможно только для открытых участков, которые имеют показатель когерентности 0,30..0,35 и выше. Когерентность участков, покрытых лесной растительностью, как правило, не превышает 0,10..0,15, что однако, вполне характерно для данных, полученных в С-диапазоне. Данных значений достаточно для получения устойчивой интерференционной картины для открытых участков местности (рис. 2).

Следует отметить, что технология получения карт смещений рельефа (или иных изменений поверхности) по результатам интерферометриче-

ской обработки в SNAP не предусматривает возможности расстановки опорных и контрольных точек с известными компонентами вектора смещения, из-за чего карта смещений имеет случайный постоянный сдвиг и небольшие тренды, обусловленные исключительно геометрией съёмки (рис. 2а), коррекция которых должна производиться дополнительно (рис. 2б).

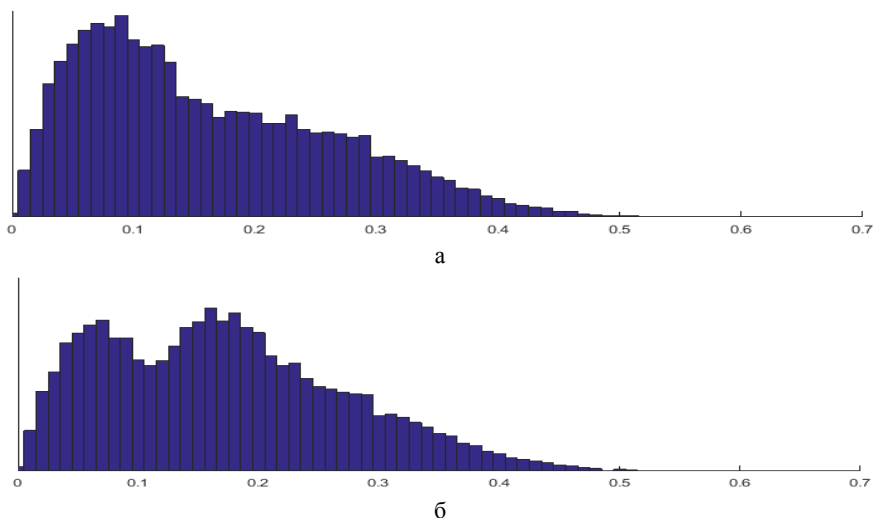


Рис. 1. Гистограммы распределения когерентностей: а) классическая оценка; б) оценка с 2-БПФ коррекцией локальных уклонов

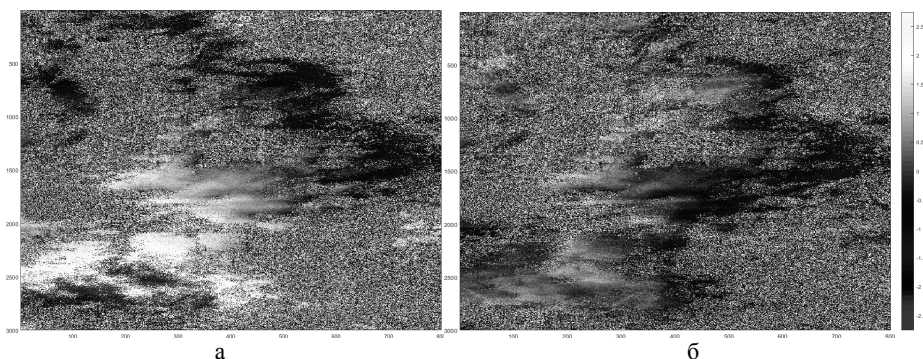


Рис. 2. Карты изменений поверхности (в сантиметрах), полученные по данным SENTINEL-1 с помощью SNAP: а) итоговая без коррекции; б) с 2-БПФ коррекцией

4. Заключение

Проанализированы возможности программного комплекса SNAP для интерферометрической обработки открыто распространяемых радиолокационных данных Sentinel-1B в задачах построения карт изменений поверхности. Показано, что для открытых участков местности достигается уровень когерентности 0,30..0,35 и выше, которого достаточно для получения устойчивой интерферометрической картины на таких участках.

Источники финансирования и выражение признательности

Доклад подготовлен по итогам исследования, проведенного в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (номер задания: 5.5901.2017/ИТР, номер для публикаций: 5.5901.2017/7.8).

Список литературы

- [1] И. В. Елизаветин, Е. А. Ксенофонов. Результаты экспериментального исследования возможности прецизионного измерения рельефа Земли интерференционным методом по данным космического PCA // Исследования Земли из космоса. 1996, N 1, стр. 75-90.
- [2] Hanssen R. F.: Radar Interferometry. Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht. Kluwer (2001).
- [3] European Space Agency: Copernicus Open Access Hub [Электронный ресурс]. – <https://scihub.copernicus.eu> (07.07.2017).
- [4] European Space Agency: SENTINEL-1. Acquisition modes [Электронный ресурс]. – URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes/interferometric-wide-swath> (07.07.2017).
- [5] European Space Agency: Sentinel Application Platform (SNAP) [Электронный ресурс]. – URL: <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/> (07.07.2017).
- [6] Luis Veci. Sentinel-1 Toolbox. Interferometry Tutorial [Электронный ресурс]. – URL: <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20Stripmap%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf> (07.07.2017).
- [7] SNAPHU: Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping [Электронный ресурс]. – URL: <http://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/> (15.07.2017).
- [8] C. W. Chen, H. A. Zebker. Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization, Journal of the Optical Society of America A, vol. 18, pp. 338-351 (2001)
- [9] Andy Hooper. STAMPS: A software package to extract ground displacements from time series of synthetic aperture radar (SAR) acquisitions. [Электронный ресурс]. – URL: <http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/> (15.07.2017).
- [10] V. G. Kobernichenko, A. V. Sosnovsky. Coherence estimation in interferometric SAR data processing. 2014 24th Int. Crimean Conf. "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo'2014). Sevastopol, 2014, pp. 1155-1156.

Прием служебных сигналов искусственных спутников Земли в Ку- и Ка– диапазонах

¹Дубина М.В., ²Афонин И.Л.

¹ Черноморское высшее военно-морское училище имени П.С. Нахимова
г. Севастополь, 299028, Российская Федерация
lmax89@rambler.ru

² Севастопольский государственный университет
г. Севастополь, 299053, Российская Федерация
igor_afonin@inbox.ru

Аннотация: Рассмотрена методика построения приемного тракта устройства для приема служебных сигналов геостационарных спутников в Ку- и Ка-диапазонах. Приведены результаты расчета энергетических характеристик приемного устройства и возможности использования полученных результатов измерений процессов, происходящих в ионосфере Земли.

Ключевые слова: геостационарные ИСЗ, SDR-приемник, СВЧ-приемник, радиомаяки, ионосфера, гидрометеоры.

1. Введение

Интенсивное развитие технологии «Непосредственного телевизионного вещания» (НТВ), подразумевавшее использование некоторого количества спутников — ретрансляторов, выведенных на геостационарную орбиту Земли, находящейся в плоскости экватора на высоте около 36000 километров, дало возможность не только удовлетворить потребности населения большей части нашей планеты качественным телевидением, но и способствовало развитию технологий удешевления абонентского оборудования. Большое количество спутников, находящихся в настоящее время на геостационарной орбите Земли ретранслируют не только передаваемые с наземных антенн телепрограммы в цифровом формате и данные Интернет, но и различные телеметрические данные о процессах на борту искусственных спутников Земли (ИСЗ), а также сигналы радиомаяков, которые представляют собой немодулированные колебания на нескольких несущих частотах (от 4 до 6) в Ку- и Ка-диапазонах. Стоит отметить, что востребованность НТВ-вещания и ограниченность количества спутников на геостационарной орбите (в настоящее время расстояние между спутниками на орбите Земли ограничивается всего 500 километрами, но в результате маневрирования для поддержания своего местоположения расстояние мо-

жет уменьшаться до 200 км, что грозит их столкновением на орбите) вынуждает производителей спутникового оборудования все более активно развивать Ка-диапазон (частоты выше 20 ГГц) и вводить более высокочастотные транспондеры в сетку вещания. Эти изменения коснулись и радиомаяков, так, например спутник Eutelsat W3A помимо 3 лучей вещания Ku-диапазона, обладает еще одним лучом Ка-диапазона направленным на Европу с сигналом радиомаяка на частоте 21404 МГц [1].

В работе рассмотрены возможности приема вышеупомянутых сигналов и методов их обработки, а также возможности их практического использования.

2. Исследуемая модель

Сигналы радиомаяков, находящихся на геостационарных спутниках, необходимы для позиционирования наземных передающих антенн точно на спутник. Позиционирование достигается поворотом антенны по максимальному уровню принимаемого сигнала радиомаяка. Суть проблемы в том, что для проведения исследований по приему немодулированных радиоволн сантиметрового диапазона (в зарубежной литературе часто встречается — миллиметрового), довольно не много доступных аппаратных средств. Конечно, в рассмотрение не берутся сложные радиоприемные устройства профессионального назначения стоимостью несколько тысяч долларов, а имеемые в распоряжении приемники спутникового телевидения, несмотря на дешевизну и гипотетическую возможность приема в этом диапазоне частот, были так конструктивно удешевлены, что приемный тракт целиком интегрирован со смесителем и квадратурным демодулятором фазоманипулированного сигнала, что не позволяет выделять немодулированные колебания, поступающие с выхода малошумящего конвертера (в иностранной литературе аббревиатура *LNB* — *Low Noise Block downconverter*) приемника спутникового телевидения.

Цель работы — показать возможность построения недорогого приемного тракта с использованием минимально необходимых аппаратных и программных средств на современной и доступной материальной базе.

Геостационарные спутники связи имеют до 60 транспондеров на борту, каждый из которых может излучать в направлении зоны обслуживания до 150 Вт электрической энергии, что эквивалентно эффективно изотропно излучаемой мощности (ЭИИМ) около 50 дБВт. Это позволяет создать в точке приема при использовании параболической антенны диаметром 1 метр сигнал силой -120 — -130 дБм (в зависимости от условий

приема) [2]. Сигналы радиомаяков Ку- и Ка- диапазонов европейского луча Hotbird 13° нормированы 19 дБВт для Ка- диапазона и 14 дБВт для Ку- диапазона соответственно [3].

Усиление параболической антенны рассчитывается по формуле:

$$G = \eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2, \quad (1)$$

где η — это эффективность антенны и, как правило, принимается равной 0,7

Таким образом, на частоте маяка Ку- диапазона усиление параболической антенны диаметром 1 метр составит около 39 дБ, и, соответственно 48 дБ на частоте маяка Ка- диапазона. Выигрыш в усилении антенны на частотах Ка- диапазона компенсируется точно таким же затуханием (конкретно в нашем случае) при распространении радиоволн в свободном пространстве, где потери обратно пропорциональны длине волны. То есть приемный тракт для обоих диапазонов будет иметь одинаковую мощность входного сигнала.

Построение приемного тракта предлагается по супергетеродинной схеме с двойным преобразованием частоты при использовании в качестве второго преобразователя *SDR* (*Software Defined Radio*) приемника. *SDR* приемники появились относительно недавно, но позволяют производить обработку радиосигнала непосредственно на программном уровне, для чего можно использовать звуковую карту персонального компьютера, либо специализированную программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС). Это дает большое преимущество при обработке и анализе полученной информации в результате измерений.

В описываемом варианте использован *SDR* приемник на базе микроконтроллера RTL2832U фирмы *Realtek* и тюнером R820T фирмы *Rafael Micro*. Тюнер обеспечивает перестройку принимаемых частот от 24 до 1766 МГц и имеет чувствительность около –90 дБм [4]. Контроллер RTL2832U имеет встроенный 8-битный АЦП и USB 2.0-выход, подключаемый к персональному компьютеру.

Таким образом, аналоговая часть приемного тракта сигналов радиомаяков сводится к преобразованию немодулированного сигнала 12 ГГц или 21 ГГц с мощностью –130 дБм в диапазон, определяемый только характеристиками *SDR* приемника и, в конкретном случае, около 30—1700 МГц с мощностью на входе более –90 дБм. Шумовые характеристики при-

емного устройства и его динамический диапазон более подробно описаны в [3] и приведены в таблице 1.

Табл. 1. Шумовые и динамические характеристики для разных частотных диапазонов

Hotbird 6	Ка- диапазон	Ku- диапазон
Принимаемая мощность на входе СВЧ конвертера	–125,4 дБм	–130 дБм
Спектральная плотность шума при ширине полосы 10 Гц	40,8 дБ	38,2 дБ
Динамический диапазон	30,8 дБ	28,2 дБ

3. Практические результаты

Поступающий со спутника немодулированный сигнал одного из диапазонов (Ка или Ku) и усиленный параболической антенной до уровня –130 дБм поступает на вход СВЧ преобразователя (Рисунок №1), где преобразуется в первую промежуточную частоту. Сразу оговоримся, что выходные характеристики Ка и Ku СВЧ преобразователей абсолютно идентичны, как по уровню выходного сигнала, так и по его шумовым характеристикам, т.е. выходная частота преобразователя лежит в диапазоне 950—1950 МГц и определяется частотами местного гетеродина, встроенного в конвертер. Первая промежуточная частота зависит от частоты гетеродина на микросхеме ADF4360-7. Микросхема представляет собой интегральный синтезатор частоты с ФАПЧ, управляемый от *LPT* порта персонального компьютера. Значение частоты опорного гетеродина на микросхеме ADF4360-7 выбрано около 1,5 ГГц. После преобразования спутникового сигнала Hotbird Ku- диапазона 12500 МГц в выходную частоту преобразователя 1,9 ГГц и смешивания с сигналом синтезатора 1,5 ГГц в балансном смесителе на AD8342, получим 2 комбинационные частоты — 3,4 ГГц и 400 МГц. Первая из этих частот не попадает в полосу пропускания тюнера на R820T, что позволяет исключить полосовые фильтры в последующей схеме, а частота 400 МГц может легко обрабатываться в тюнере под управлением контроллера RTL2832U с отображением на персональном компьютере.

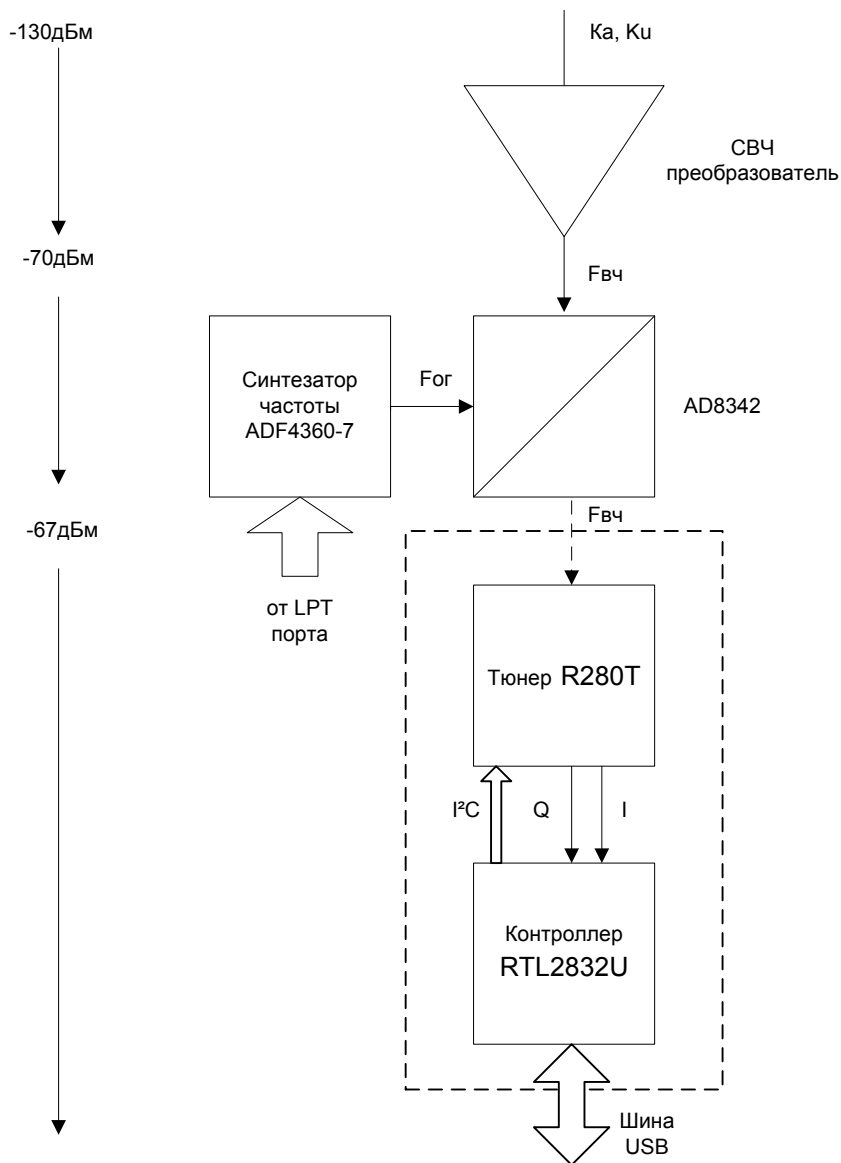


Рис. 1. Предлагаемая схема реализации приемного тракта
(пунктирной линией обозначен интегрированный SDR приемник)

4. Заключение

Описанный в статье приемник спутниковых радиомаяков не претендует на фундаментальность построения структурной схемы, но лишь показывает возможность получения достаточно несложного и точного инструмента для изучения ионосферы и неоднородностей атмосферы Земли. Запись результатов измерений и последующий их анализ могут показать новые зависимости (годовые, суточные), необходимые для всеобъемлющего изучения характера распространения радиоволн в околоземном пространстве.

Источники финансирования и выражение признательности

Авторы выражают признательность старшему преподавателю Иськиву В. М. кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» института Радиоэлектроники и информационной безопасности ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» за оказанную помощь в проведении измерений при постройке модели и ряд полезных советов.

Список литературы

- [1] <https://www.satbeams.com/satellites?norad=28187>
- [2] ERA report 2007 – 0106, LNB Performance study
- [3] F. Machado, E. Vilar. Radioengineering, vol.23, No.1, April 2014, P.155-157
- [4] Rafael Micro. R820T.High Performance Low Power Advanced Digital TV Silicon Tuner. Datsheet. © 2011. P.12

Modeling and verification of EW systems on the basis of a signal generator with fast frequency tuning

Shukalo D. M.

Sevastopol, Russian Federation
dmitry@tarkus.su

Abstract: The functionality of costly systems is often redundant for simple procedures of multiply integration and software-hardware testing. In most cases, for a test in a research laboratory, a group of tests is sufficient, the implementation of which reduces costs. The proposed solution, complementing the system based on an arbitrary signal generator, is based on the Keysight UXG signal generator with fast frequency tuning. In a standard configuration, UXG is a powerful component of a testing system that can be used as a scalable threat simulator or as a configurable heterodyne in a large system.

Keywords: simulation of radar signals, testing of EW systems, Keysight UXG, signal generator with fast frequency tuning.

Проектирование и проверка систем РЭБ на базе генератора сигналов с быстрой перестройкой частоты

Шукало Д. М.

г. Севастополь, Российская Федерация
dmitry@tarkus.su

Аннотация: Функциональность дорогих систем зачастую избыточна для простых многократных процедур интеграции системы и программно-аппаратного тестирования. В большинстве случаев для проведения испытаний в исследовательской лаборатории достаточно группы тестов, реализация которых позволяет сократить расходы. Предлагаемое решение, дополняющее систему на базе генератора сигналов произвольной формы, основано на генераторе сигналов с быстрой перестройкой частоты Keysight UXG. В стандартной конфигурации UXG представляет собой мощный компонент системы тестирования, который можно использовать в качестве масштабируемого имитатора угроз или в качестве перестраиваемого гетеродина в большой системе.

Ключевые слова: имитация сигналов РЛС, тестирование систем РЭБ, Keysight UXR, генератор сигналов с быстрой перестройкой частоты.

1. Введение

Моделирование электромагнитной обстановки является главной задачей тестирования и оценки различных типов систем радиоэлектронной борьбы. Применение моделирования на ранних этапах процесса разработки новой системы или перепрограммирования уже действующей значительно повышает вероятность успеха полномасштабного тестирования на специализированных испытательных системах [1].

Основной проблемой является достижение реализма испытаний, который позволяет точно воспроизводить как отдельные угрозы, так и моделировать несколько угроз одновременно. Достоверность имитации должна быть высокой, чтобы точность подаваемого сигнала превышала порог восприятия тестируемой системы. Ключевым показателем является фазовый шум и его характеристики, опирающиеся на полную калибровку.

В качестве дополнительных показателей включают управление амплитудой и точность. Точная имитация сигналов РЛС в испытаниях РЭБ требует учета расстояния до цели, углового положения цели и диаграммы направленности антенны. Аналогичным образом в процессе моделирования для оценки ошибки РЛС, необходимо точное представление расстояния до цели, углового положения цели и эффективной поверхности рассеяния. Для полного тестирования систем РЭБ могут понадобиться модели с несколькими излучателями, а для создания динамических моделей с движущимися целями и постановщиками помех может потребоваться функция непосредственного создания цифровых последовательностей.

Сценарии с несколькими излучателями можно создавать за счет скачкообразного изменения частоты, отслеживая фазы каждого импульса. Изменение частоты осуществляется с помощью генератора сигналов произвольной формы, если максимальный скачок частоты лежит в пределах его полосы, или с помощью приборов нового класса, генераторов с быстрой перестройкой частоты [2].

Одним из важных показателей является выходная мощность. Для того чтобы узнать, какая мощность и динамический диапазон потребуется для моделирования, нужно оценить необходимую минимальную и максимальную мощность. Данная оценка позволяет понять, какого типа решение наиболее подходит для управления мощностью: можно ли обойтись ступенчатыми аттенюаторами, или придется воспользоваться функциями динамического управления генератора сигналов произвольной формы.

Встроенные в быстроперестраиваемый генератор сигналов твердотельные аттенюаторы могут изменять амплитуду в широком диапазоне и с очень высокой скоростью.

2. Исследуемая модель

Система, построенная на основе быстроперестраиваемого генератора сигналов *UXG*, может точно моделировать следующие характеристики [3]:

- длинные импульсные сценарии;
- частоту следования импульсов и последовательности импульсов;
- импульсы с кодированием Баркера;
- частотные и спектральные характеристики;
- алгоритм сканирования антенны.

В его гетеродине используется прямой цифровой синтез, что позволяет формировать широкополосные ЛЧМ импульсы, полоса которых составляет 10—25% от частоты несущей [3]. Кроме того, *UXG* может создавать импульсы длительностью всего 10 нс с фронтами/спадами 3 нс и подавлением в паузе 90 дБ.

Поскольку *UXG* непосредственно понимает коды описания импульсов, появляется возможность изменять выходной сигнал с очень высокой скоростью. В режиме скоростной коммутации немодулированного сигнала *UXG* может перестраивать частоту за 370 нс, а с опциональным твердотельным аттенюатором может менять частоту, амплитуду и фазу за 700 нс. Твердотельный аттенюатор обеспечивает быстрое изменение ослабления в диапазоне 80 дБ, сохраняя при этом точные фазовые соотношения.

Другим ключевым показателем является воспроизводимость фазы. Если *UXG* настроен на частоту А и переключается на частоту Б, а затем снова возвращается на частоту А, он запоминает фазу сигнала и устанавливает фазу частоты А так, как будто он никогда не перестраивался с этой частоты. Способность отслеживать фазу постоянно и на всех частотах очень важна для имитации одновременной работы нескольких передатчиков условного противника.

По сравнению с решением на базе генератора сигналов произвольной формы, *UXG* обладает двумя недостатками: не может осуществлять сложную модуляцию импульсов, не может создавать импульсы сложной формы. Однако и без этих возможностей *UXG* отлично подходит для таких приложений, как имитация поворотных направленных антенн и обучение пеленгаторных приемников [4].

Следует также отметить, что *UXG* обладает некоторыми явными преимуществами по сравнению с системами на базе генератора сигналов произвольной формы. *UXG* может быстро перестраиваться в широком диапазоне частот до 40 ГГц. Кроме того, имеет диапазон быстрого изменения мощности до 90 дБ, в то время как у генератора сигналов произвольной формы этот диапазон равен 50 дБ [3].

Благодаря высокому уровню гибкости и производительности в сочетании с возможностью использования кодов описания импульсов, *UXG* ускоряет интеграцию новых интеллектуальных функций в современные сигнальные сценарии. В результате появляется возможность создания постоянно усложняющихся сценариев, максимально приближенных к реализму.

3. Заключение

Применение реалистичного моделирования ЭМ обстановки на ранних этапах разработки или перепрограммирования повышает вероятность успеха полномасштабных испытаний на больших специализированных системах. Чем раньше будет выявлена проблема, тем дешевле обойдется ее устранение.

Испытательный стенд РЭБ, укомплектованный серийно выпускаемым оборудованием и ПО, позволяет выполнять отдельные подгруппы тестов. По сравнению со специализированными системами, такой испытательный стенд обладает ограниченными возможностями, но зато имеет меньше размеры, меньшую сложность, меньшую стоимость и большую гибкость. Он может создавать сигнальную среду, содержащую комбинации сигналов РЛС и коммуникационных сигналов, и эти сигналы могут воспроизводиться из записи или формироваться с помощью такого ПО, как *SystemVue* и *Signal Studio*.

Кроме того, серийно выпускаемое оборудование может использоваться для тестирования и оценки широкого диапазона технологий, требующих применения широкополосных многоканальных решений для захвата и воспроизведения. Список приложений широк: адаптивные сигналы РЛС, активные и пассивные антенны РЛС, когнитивные радиосистемы, динамический доступ к спектру, распределение спектра, системы с несколькими входами и несколькими выходами, распределенные, многопозиционные пассивные РЛС, связь с малой задержкой, используемая в беспилотных летательных аппаратах или беспилотных системах.

Список литературы

- [1] Keysight Technologies. Испытание систем РЛС, радиоэлектронной борьбы (РЭБ) и радиотехнической разведки (ПТР): Общие проблемы испытаний // Keysight Technologies, 2014. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-7036RURU.pdf?id=2051240> (дата обращения 13.07.2017)
- [2] Keysight Technologies. Использование программного обеспечения SystemVue компании Keysight для создания реалистичных сценариев испытания систем РЛС и РЭБ // Keysight Technologies, 2014. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-7533RURU.pdf?id=2135378> (дата обращения 13.07.2017)
- [3] Keysight Technologies. UXG Agile Signal Generator N5193A // Keysight Technologies, 2015. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5992-0091EN.pdf?id=2514077> (дата обращения 13.07.2017)
- [4] Keysight Technologies. Руководство по выбору генераторов сигналов Keysight // Keysight Technologies, 2015. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-9956RURU.pdf?id=2163747> (дата обращения 13.07.2017)

Подписано в печать 11.11.2017
Формат 32×45/4. Условн. печ. л. 12,81
Уч.-изд. л. 12,6. Зак. 4566/7. Тир. 100

Отпечатано в типогр. Printex
ул. Кулакова, 59, оф. А, Севастополь, 299011
Тел.: +7 8692 464 744