

## **Построение и анализ радиотехнических систем**

### **Исследование алгоритмов цифровой обработки сигналов в детальном режиме работы РСА космического базирования**

Стремительное развитие и внедрение радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА) позволяет конкурировать им с оптическими системами (ОС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Вместе с тем основной проблемой достижения тактико-технических характеристик РСА, сопоставимых с характеристиками ОС, является проблема получения высокого азимутального разрешения [1]. Наиболее известным методом обзора, позволяющим получить высокое разрешение по азимутальной координате, является прожекторный режим работы РСА. Однако реализация такого режима и обработка траекторного сигнала достаточно сложны, поэтому в реальных проектах систем ДЗЗ применяются более простые виды обзора земной поверхности, например, режим с протяжкой, режим двойного приема [2]. В любом случае увеличение времени синтезирования (времени когерентного накопления) позволяет сузить сжатый по азимуту сигнал.

В рассматриваемом детальном режиме работы увеличение времени когерентного накопления достигается за счет трехкратного просмотра заданного участка поверхности Земли. В простейшем случае предлагается использовать комбинацию из трех режимов маршрутного типа: нормальный боковой обзор (чисто маршрутный режим) и два скошенных режима (переднебоковой и заднебоковой). В отличие от метода двойного приема такой режим наблюдения предполагает обработку траекторного сигнала и формирование радиолокационного изображения (РЛИ) по кадрам. Использование скошенных режимов, несмотря на то, что угол скоса невелик, усложняет обработку траекторного сигнала. В рамках поставленной задачи разработана технология цифровой обработки сигнала и формирования РЛИ, основные этапы которой сводятся к следующему: прием трех радиоголограмм, сжатие сигнала по угломестной и азимутальной координатам, выравнивание фазы колебаний в полученных парциальных РЛИ, координатное совмещение полученных РЛИ, их когерентное суммирование и передача в буфер итогового РЛИ. Особое внимание уделено исследованию алгоритма формирования двумерной опорной функции при миграциях траекторного сигнала по каналам дальности. Показано, что по сравнению с предложенным алгоритмом известные алгоритмы устранения влияния миграции дают погрешности в фокусировке отклика точечной цели, но имеют меньшие вычислительные затраты.

На основании разработанной технологии синтезирования РЛИ при детальном режиме обзора разработан прототип программного обеспечения, который был использован при исследовании процесса обработки модели радиоголограммы. В качестве объекта исследования был взят низкоорбитальный спутник с высотой орбиты 550 км, на котором установлен РСА X-диапазона с эффективной полосой сигнала 200 МГц. Проведенный анализ показал, что рассмотренный метод съемки и предложенный алгоритм дают улучшение фокусировки изображения по азимутальной координате в 2,5...3 раза и повышают качество формирования радиолокационного изображения за счет снижения уровня боковых лепестков на 3...5 дБ.

#### **Литература**

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Карпов О.А., Толстов Е.Ф. Виды обзора земной поверхности в РСА авиационного и космического базирования // Радиотехника. 2009. №3. – С.46-51.

### **Исследование алгоритмов ЦОС в условиях миграции траекторного сигнала по каналам дальности**

В радиолокационных станциях с синтезированием апертуры антенны (РСА) и с высоким разрешением, применяемых при дистанционном зондировании Земли, при цифровой обработке наблюдается миграция сигналов по каналам дальности. При реализации бокового режима обзора максимум диаграммы направленности антенны совпадает с траверзом относительно маршрута движения носителя РСА. В этом случае доплеровское смещение частоты эхо-сигнала на траверзе равно нулю, а время задержки (изменение наклонной дальности) подчиняются квадратичному закону [1]. При наличии миграции эхо-сигналы распределяются по соседним каналам дальности, что вызывает снижение отношения сигнал-шум и в конечном итоге снижает качество РЛИ. Для устранения миграций используются различные алгоритмы, использующие квадратичную модель миграций. Однако в ряде режимов обзора, например прожекторном, скошенном, хотя они и основаны на маршрутном режиме, квадратичная закономерность миграций нарушается [2]. Целью доклада является исследование эффектов, вызванных миграциями в РСА высокого разрешения, оценка эффективности применения двумерной свертки и вобуляции для снижения уровня боковых лепестков.

К основным эффектам, возникающим в прожекторном, детальном и скошенных режимах и которые были выявлены в процессе исследований, относятся: нарушение симметрии огибающей пачки импульсов принимаемого сигнала; смещение спектра доплеровских частот; появление нелинейности в зависимости доплеровской частоты траекторного сигнала; нарушение симметрии закона миграции траекторного сигнала по каналам дальности.

Все экспериментальные исследования производились в высокодетальных режимах съемки и плоскости «наклонная дальность-доплеровская частота». Для примера рассматривался космический аппарат с высотой орбиты 550 км, РСА с фазированной антенной решеткой S-диапазона частот с размерами 3 м Ч 6 м, разрешение по наклонной дальности составляло 0,5 м. Разработана программа для моделирования двумерной обработки голограммы и отображения результатов расчетов в виде радиолокационного изображения. Результаты исследований показали, что 1) недостаточно полное устранение миграций приводит к существенному (на 4...5 дБ) снижению отношения сигнал-шум; 2) применение неразделимой двумерной обработки существенно улучшает качество изображения, например, по сравнению с разделимой обработкой она дает выигрыш в отношении сигнал-шум не менее 3,4 дБ; 3) использование для вобуляции 3-х периодов следования зондирующих импульсов дает снижение уровня боковых лепестков на 2...3 дБ.

Вместе с тем неразделимая двумерная цифровая обработка по дальности и азимуту требует значительных вычислительных ресурсов, имеет ограниченную область фокусировки. Вне этой области отклик от точечной цели начинает расплываться по азимутальной оси. Для устранения этого недостатка может быть использована секционированная двумерная свертка или последовательная коррекция азимутального спектра в процессе формирования РЛИ.

#### **Литература**

1. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Радиотехника, 2005. – 368 с.
2. Zhai Q., Wang W., Hu J., Zhang J. Azimuth Nonlinear Chirp Scaling Integrated with Range Chirp Scaling Algorithm for Highly Squinted SAR Imaging // Progress in Electromagnetics Research, 2013, Vol. 143. – P.165-185.

Т.Г. Кострова, Н.Д. Комиссарова  
Муromский техникум радиоэлектронного приборостроения  
602267 г. Муром, Владимирская обл., ул. Комсомольская, 55  
Муromский институт Владимирского государственного университета  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: vvk@mit.ru

### **Исследование алгоритмов ЦОС в условиях маршрутного режима съемки РСА**

Ряд преимуществ радиолокаторов с синтезированием апертуры антенны РСА (всепогодность, возможность наблюдать неосвещенные или слабоосвещенные территории, например за полярным кругом) перед оптическими системами съемки привели к тому, что с каждым годом число решаемых с их помощью задач растет и в настоящее время составляет примерно 20% от общего количества задач. Маршрутный режим обзора до настоящего времени является наиболее востребованным при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) с помощью РСА космического базирования [1]. Его постоянно модифицируют, применяют новые сигналы, расширяют зону захвата за счет применения многолучевого обзора [2].

В докладе проводится исследование свойств и алгоритмов обработки сигналов при разделении апертуры антенны на две субапертуры по направлению движения космического аппарата. В отличие от [1] на период следования зондирующих импульсов не накладывается условие кратности числу сегментов.

В качестве примера рассмотрен РСА с фазированной антенной решеткой S-диапазона частот с размерами 3 м × 6 м и разрешением по наклонной дальности 0,5 м. Носителем РСА является спутник с высотой орбиты 550 км. Для выбранных параметров космического аппарата и РСА проведен расчет основных энергетических характеристик, геометрических и временных параметров режима съемки, включая размеры зоны захвата, задержку и длительность окна приемника, частоту повторения зондирующих импульсов, время синтезирования, пространственное разрешение. Данный расчет положен в основу организации цифровой обработки траекторного сигнала. Разработана программа для моделирования двумерной обработки радиоголограммы и отображения результатов расчетов в виде радиолокационного изображения (РЛИ). Рассмотрены особенности формирования опорного сигнала для ЦОС траекторного сигнала в РСА космического базирования при маршрутном режиме съемки. Результаты исследований показали, что:

1) необходимо тщательное воспроизведение миграций при цифровой обработке сигналов (ЦОС) обеих субапертур, при высоком разрешении законы миграций различаются, поэтому недостаточно полное устранение миграций приводит к существенному (на 4...5 дБ) снижению отношения сигнал-шум;

2) при ЦОС необходимо применять неразделимую двумерную обработку, в противном случае качество РЛИ существенно деградирует;

3) использование для цифровой обработки эхо-сигналов двух субапертур позволяет снизить уровень боковых лепестков по азимутальной координате на 2...2,5 дБ.

Проведенные исследования показали, что секционирование активной фазированной антенной решетки и организация приема сигналов с нескольких субапертур позволяет повысить качество формирования радиолокационных изображений.

### **Литература**

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Kim J.-H., Younis M., Moreira A., Wiesbeck W. A Novel OFDM Chirp Waveform Scheme for Use of Multiple Transmitters in SAR // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 10, No. 3, May 2013. – Pp.568-572.

Т.Г. Кострова, С.О. Лепешов  
Муromский техникум радиоэлектронного приборостроения  
602267 г. Муром, Владимирская обл., ул. Комсомольская, 55  
Муromский институт Владимирского государственного университета  
602264, г. Муром, Владимирская обл., ул. Орловская, 23  
E-mail: vvk@mit.ru

### **Разработка энергетического обеспечения многофункционального радиолокационного комплекса космического базирования**

Для дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса широко используются многофункциональные радиолокационные комплексы (МФ РЛК), основу которого составляет радиолокационная станция с синтезированием апертуры антенны (РСА) [1]. Важнейшей системой комплекса является система энергоснабжения (СЭС), которая обеспечивает электропитанием другие системы. Использование МФ РЛК для решения различных задач требует от СЭС гибкой работы в автоматическом или управляемом режиме. Ярким примером такой работы является тандемный режим двух космических аппаратов (КА) из орбитальной группировки. Когда один из спутников выступает в качестве ведомого, то установленный на нем МФ РЛК работает в пассивном режиме и потребляет минимальную мощность. На другом, ведущем КА в это же время СЭС использует все энергетические ресурсы спутника.

Используемые в СЭС компоненты во многом определяют срок активного существования и массогабаритные характеристики космического аппарата, создают облик спутника. В случае возникновения на борту КА нештатных ситуаций производится специальное управление СЭС, целью которого является восстановление ориентации солнечных батарей на Солнце. Если этого не удастся сделать, то ресурс работы спутника будет ограничен возможностями вторичных бортовых источников электропитания, и за короткий интервал времени спутник будет потерян. Естественно, что к такой же ситуации приведёт выход из строя СЭС.

В докладе рассматриваются основные направления оптимизации требований, параметров и структуры СЭС. В основе энергетического обеспечения КА лежит выполнение целевой функции, которая возлагается на МФ РЛК космического базирования. С этой точки зрения рассматриваются два варианта использования МФ РЛК: 1) в составе системы ДЗЗ (например, океанографического космического комплекса); 2) в составе орбитальной группировки обнаружения воздушных объектов, в том числе потерявших связь с базой. Для решения данных задач разработано программное обеспечение, позволяющее оценить основные энергетические характеристики МФ БРЛК.

Определен состав вспомогательного оборудования [2], проведен анализ и даны оценки энергетических затрат служебным оборудованием КА (звездный датчик, солнечный датчик, приборы ориентации на Землю, приводы и электродвигатели управления, аппаратура радионавигации, система ориентации солнечных батарей, система обеспечения теплового режима, включая активные средства теплового регулирования). Отмечается, что кроме типичных приборов, которые обеспечивают стабилизацию КА в пространстве, решение задач 2-го класса требуется установки дополнительных датчиков ориентации на крупногабаритной полотно антенны. Рассмотрен пример эскизного расчета энергетического баланса СЭС для низкоорбитального малого космического аппарата ДЗЗ.

### **Литература**

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М.: Радиотехника, 2010. – 680 с.
2. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебное пособие / Бровкин А.Г., Бурдыгов Б.Г., Гордийко С.В. и др. Под ред. А.С. Сырова – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. – 304 с.

### **Комплекс средств измерения параметров системы жидкостного охлаждения**

Комплекс средств измерения предназначен для осуществления измерения и контроля параметров систем жидкостного охлаждения, построенных с использованием центробежных герметичных электрических насосов серии ЭЦН 100-90, осевых вентиляторов серии ВО220-6-2 и теплообменников серии ВЖ. В соответствии с Техническим заданием, комплекс должен обеспечивать измерение:

- температуры охлаждающей жидкости в диапазоне минус 50...+90 °С с точностью не хуже  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- температуры воздуха в диапазоне минус 50...+60 °С с точностью не хуже  $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ;
- величины расхода охлаждающей жидкости в диапазоне 0,5...1,66 л/с с точностью не хуже  $\pm 10\%$ ;
- силы тока, потребляемого насосом, в диапазоне 0...22 А с точностью не хуже  $\pm 10\%$ ;
- силы тока, потребляемого парой вентиляторов, в диапазоне 0...7А с точностью не хуже  $\pm 10\%$ .

Электропитание насоса и вентиляторов трехфазное, частота сети 400 Гц, напряжение сети 220В. В системе установлены две пары вентиляторов. Комплекс должен обеспечивать отображение значения текущего измеряемого параметра на индикаторе. Измеренные значения должны передаваться в основной контроллер управления по запросу не чаще 1 раза в секунду по интерфейсу RS-422 одним пакетом. Питание комплекса осуществляется от бортовой сети +27В. Конструктивно комплекс должен обладать стойкостью к внешним воздействующим факторам в соответствии с ГОСТ РВ 20.39.304-98 группы 1.3, исполнение «О».

В соответствии с заданными параметрами был разработан комплекс средств измерения, состоящий из основного блока формирования и индикации, двух датчиков температуры, двух датчиков расхода жидкости и трех датчиков тока. В качестве температурных датчиков воздуха и жидкости были использованы датчики ТС-1288АВ производства НПП «Элемер» г. Зеленоград. Указанный датчик представляет собой платиновое термосопротивление и предназначен для измерения температуры жидких и газообразных сред в диапазоне от минус 50<sup>0</sup>С до плюс 250<sup>0</sup>С для класса точности АА. Для преобразования измеренных значений в цифровой код использовалась пара АЦП 1273ПВ8Р. В качестве датчиков расхода скорости потока жидкости применены полностью удовлетворяющие требованиям ТЗ датчики серии ДРх-100 разработки ОАО "МНИИРЭ «Альтаир». Для преобразования выходного синусоидального сигнала датчиков в меандр с целью подачи его на счетный вход микроконтроллера использовались компараторы 1481СА1Р. В качестве датчиков тока были использованы датчики Холла с введенными цепями термостабилизации и гальваническими развязками. Управление комплексом, опрос датчиков, преобразование измеренных величин, взаимодействие с основным контроллером управления осуществляется микроконтроллером 1986ВЕ92У. В качестве протокола взаимодействия был выбран и реализован протокол MODBUS.

Основной особенностью разработанного комплекса является использование исключительно отечественной элементной базы. Была разработана рабочая конструкторская документация, в соответствии с которой комплекс средств измерения был изготовлен. После проведения всех необходимых испытаний документации присвоена литера «О».

### **Программная библиотека математической модели функционирования многофункционального радиолокационного комплекса космического базирования**

«Стратегия развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу» определяет создание целевой аппаратуры, высоконадежных компонентов и систем бортовой радиоэлектронной аппаратуры, стойкой к воздействию факторов космического пространства, для космических аппаратов различного назначения в качестве прорывной технологии. Реализация данной технологии обеспечивает стратегическую независимость России в области информационного обеспечения результатами дистанционного зондирования Земли, которые эффективно используются для решения различных военных и социально-экономических задач.

Применение радиолокационных средств зондирования позволяет проводить наблюдения в любое время суток и вне зависимости от состояния атмосферы. Уникальным достоинством радиолокаторов с синтезированной апертурой является качественно более широкие, по сравнению со средствами наблюдения оптического диапазона, возможности адаптации аппаратуры к специфике задач. В зависимости от той или иной задачи, решаемой в данный момент времени, можно осуществить "размен" одних целевых характеристик на другие. Например, параметр пространственного разрешения можно разменять на радиометрическое разрешение, на радиометрическую чувствительность, на ширину полосы беспропускного захвата контролируемой поверхности. При этом выбор режима работы и установка требуемых характеристик осуществляется по командам с Земли.

Для обеспечения возможности быстрого расчета характеристик землеобзора в различных режимах, а также с целью моделирования основных этапов обработки радиолокационной информации, была разработана соответствующая математическая модель функционирования многофункционального радиолокационного комплекса космического базирования, реализованная в виде программной библиотеки.

В состав библиотеки входят следующие основные функции:

- базовые функции:
  - быстрое преобразование Фурье;
  - обратное быстрое преобразование Фурье;
  - поэлементное комплексное умножение двух векторов;
  - перестановка комплексных элементов вектора;
  - взвешивание окном Хеннинга;
  - взвешивание окном Хемминга;
  - взвешивание окном Гаусса;
  - взвешивание окном Кайзера;
  - некогерентное накопление пикселей первичного РЛИ;
- функции расчета характеристик МРЛК:
  - функция расчета геометрических и временных параметров;
  - функция расчета радиометрической чувствительности;
  - функция расчета радиометрической разрешающей способности;
  - функция расчета динамического диапазона воспроизводимых яркостей;
  - функция расчета времени синтеза апертуры;
  - функция расчета точности определения координат неподвижных и подвижных объектов в различных режимах съемки;
  - функция расчета точности определения скорости и направления движения движущихся объектов;
  - функция расчета точности оценки рельефа местности;

- функции первичной обработки данных;
- функции формирования опорных функций по дальностной координате;
- функции формирования опорных функций по азимутальной координате;
- функции формирования двумерных опорных функций;
- функции формирования моделей траекторных сигналов
- функции синтеза РЛИ в следующих режимах съемки:
  - прожекторный режим;
  - маршрутный режим;
  - многолучевой широкозахватный режим ScanSAR;
  - режим интерферометрической съемки;
  - режим скошенного обзора;
  - поляриметрический режим;
  - режим селекции движущихся целей;
- функции отображения и сжатия информации.

Функции библиотеки принимают необходимые значения для расчета в качестве входных параметров. Осуществляется проверка корректности передаваемых значений.

Для создания библиотеки использовалась интегрированная среда разработки приложений Microsoft Visual C/C++ комплекта Microsoft Studio 2012. Библиотека является динамической (DLL) и предназначена для использования в операционной системе Microsoft Windows 7 x64.



### **Исследование способа построения мобильного метеокомплекса сверхкраткосрочного прогноза развития опасных метеоявлений**

Для решения задач метеорологии, связанных с мезомасштабным прогнозом целесообразно использовать оперативные методы получения информации о состоянии атмосферы, такие как методы радиолокации и СВЧ – радиометрии.

В настоящее время все более широко применяются региональные и локальные модели, способные воспроизводить мезомасштабные системы конвективного и орографического происхождения, с которыми бывают наиболее часто связаны опасные явления: сильные осадки, градобития, шквалистые ветры. Все более актуальным направлением становится также создание технологии слежения за текущей погодой и составление сверхкраткосрочных с заблаговременностью до 3 часов прогнозов опасных явлений на основе анализа наблюдений с высоким пространственно-временным разрешением, в первую очередь радиолокационных наблюдений и наблюдений с геостационарных спутников.

Одним из источников оперативных данных о параметрах атмосферы для решения такого рода задач могут использоваться наземные системы, оснащенные СВЧ - радиометрическими комплексами. Преимущества применения наземного СВЧ - радиометрического метода зондирования атмосферы в системе регионального, локального прогноза и наукастинга связаны с возможностью усвоения оперативной информации о параметрах атмосферы (профилях влажности, температуры, влагозапасе атмосферы и водозапасе облаков) в реальном времени в широком диапазоне метеословий.

Особенности городской застройки - такие как здания переменных высот и большие области проложенных улиц и стоянки, производят уникальную городскую погодную окружающую среду. Городская погода становится все более и более важной, чтобы защитить эти густозаселенные области от воздействий неблагоприятных погодных событий.

В настоящее время, разнообразные потребности пользователей метеорологических данных в городском округе, такие как чрезвычайные менеджеры и городские планировщики, не взаимодействуют с научным сообществом, главным образом из-за ограниченной коммуникации между этими двумя сообществами.

Ясный механизм, помощи городскому метеорологическому сообществу лучше идентифицировать пользовательские группы, коммуникации между ними, и данный диалог привел бы к лучшему городскому погодному прогнозу и планированию в будущем.

Например, города испытывают то, что известно как городской эффект острова высокой температуры, где сохранение высокой температуры зданиями и проложенными областями может привести к ночным поверхностным температурам до 10°C выше таковых из окружения сельских районов. Проложенные поверхности, движение, и высокие здания в городах могут также привести к городским событиям наводнения, изменениям в местных образцах осадения, поднятых концентрациях газообразных загрязнителей и аэрозолей, и канализирования ветра между зданиями. Высокая плотность людей и их зависимости от инфраструктуры делает городские области особенно уязвимыми для воздействий погодных событий как серьезные грозы, высокая температура и холодные волны, и зимние штормы с тяжелым льдом и снегом, который может разрушить движение и электроснабжение.

За прошлые десятилетия область городской метеорологии росла от простых наблюдений и прогнозов общей погоды для столичных областей к научным и технологическим прогнозам, которые позволяют контролировать широкий набор экологических параметров, такие как температура, концентрация аэрозоля, и осадение с относительно точным выбором времени и местоположением.

Поскольку эти способности улучшились, использование для городской погодной информации и ее ценности чрезвычайным менеджерам, градостроителям, чиновникам

национальной безопасности, и других пользователей увеличились. Несмотря на эти авансы, потребности многих пользователей в терминах точности в выборе времени или местоположении, своевременном доступе, или определенных переменных в настоящее время не достаточно.

Для полного решения поставленных целей необходимо решить следующие основные задачи:

1. Организация современной городской сети метеонаблюдений и передачи метеоинформации на базе и оборудовании университета, с применением современных информационных технологий (космические метеоспутники, автоматические метеостанции, сеть личных цифровых устройств, уникальную радиометеорологическую аппаратуру, разработанную в университете).

2. Разработка и построение локальной системы оперативного СВЧ - радиометрического контроля влагозапаса атмосферы и водозапаса облаков для решения задач текущего прогнозирования.

3. Построение интегрированной городской системы принятия решений в случае образования опасных метеорологических явлений (комбинация дополнительных подходов, с интеграцией навыков от пользователя и сообществ метеорологии, может помочь развить поддержку городским лицам, принимающим управленческие решения).

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-02-97507 -р\_центр\_а).*

### Определение трехмерных географических координат точечного источника излучений угломерным методом разнесенного приема

Согласно угломерному методу разнесенного приема измеряется азимут и угол места источника излучения относительно каждой приемной позиции, число которых случае измерений в трехмерном пространстве должно быть не менее трех. Следовательно, для определения географических координат источника излучения, то есть долготы, широты и высоты над уровнем моря, необходимо выразить каждую пару измеряемых углов через географические координаты источника и соответствующего приемника, а затем решить получившуюся систему нелинейных уравнений относительно неизвестных географических координат источника излучения.

Будем считать, что на рис. 1 приемник излучения находится в точке  $A'$ , а источник – в точке  $D$ . Проекции этих точек на поверхность Земли располагаются в точках  $A$  и  $E$  соответственно и имеют ту же долготу и широту, как и приемник с источником излучения. Поверхность Земли представляет собой сферу радиусом  $R_T$  с центром в точке  $P$ , следовательно  $\overline{AP} = \overline{EP} = R_T$ .

Поскольку азимут источника излучения  $D$  измеряется относительно приемника  $A'$  в плоскости, касательной к поверхности сферы в точке  $A$ , будем вращать систему координат так, чтобы прямая  $\overline{AP}$  стала вертикальной осью новой системы координат. С этой целью декартовы координаты точки  $E$

$$\begin{aligned} x_E &= R_T \cos \alpha_E \cos \varphi_E, \\ y_E &= R_T \cos \alpha_E \sin \varphi_E, \\ z_E &= R_T \sin \alpha_E \end{aligned} \quad (1)$$

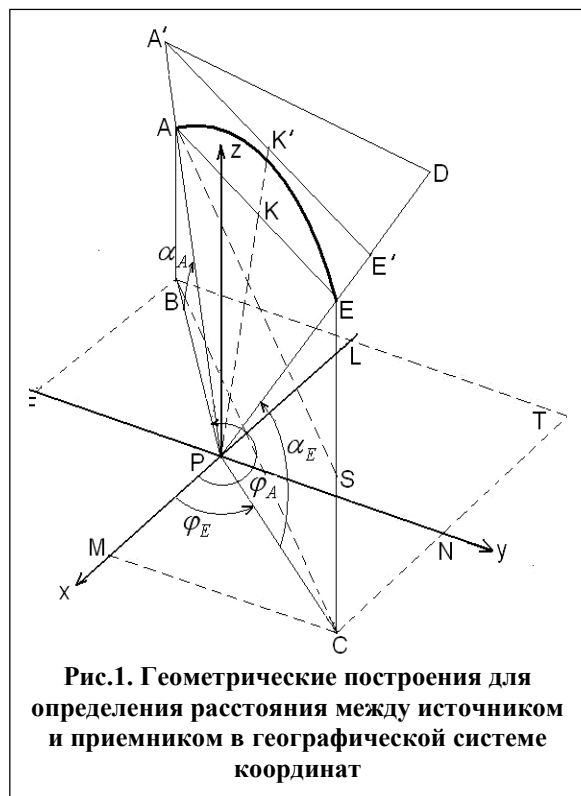
умножим сначала на матрицу поворота системы

координат относительно оси  $z$  на угол  $\varphi_A$ . В результате получаем:

$$\begin{pmatrix} \cos \varphi_A & \sin \varphi_A & 0 & 0 \\ -\sin \varphi_A & \cos \varphi_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_E \\ y_E \\ z_E \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_E \cos \varphi_A + y_E \sin \varphi_A \\ -x_E \sin \varphi_A + y_E \cos \varphi_A \\ z_E \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Умножая получившийся вектор на матрицу поворота системы координат относительно оси  $y$  на угол  $\alpha_A$ , находим вектор координат точки  $E$ :

$$\begin{pmatrix} \cos \alpha_A & 0 & \sin \alpha_A & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \alpha_A & 0 & \cos \alpha_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_E \cos \varphi_A + y_E \sin \varphi_A \\ -x_E \sin \varphi_A + y_E \cos \varphi_A \\ z_E \\ 1 \end{pmatrix} =$$



**Рис.1. Геометрические построения для определения расстояния между источником и приемником в географической системе координат**

$$= \begin{pmatrix} x_E \cos \alpha_A \cos \varphi_A + y_E \cos \alpha_A \sin \varphi_A + z_E \sin \alpha_A \\ -x_E \sin \varphi_A + y_E \cos \varphi_A \\ -x_E \sin \alpha_A \cos \varphi_A - y_E \sin \alpha_A \sin \varphi_A + z_E \cos \alpha_A \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Первая координата в полученном векторе –  $x$ , вторая –  $y$ , третья –  $z$ .

Для определения азимута потребуются только две координаты:  $y$  и  $z$ , причем ось  $y$  – это ось абсцисс, а ось  $z$  – ось ординат. Подставляя в полученный вектор  $x_E$ ,  $y_E$  и  $z_E$  из (1) получаем:

$$y = R_T \cos \alpha_E \sin(\varphi_E - \varphi_A) \quad (4)$$

$$z = R_T [\sin \alpha_E \cos \alpha_A - \cos \alpha_E \sin \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A)] \quad (5)$$

Поскольку азимут  $\nu_A$  отсчитывается от оси ординат против часовой стрелки, получаем уравнение, связывающее измеренный азимут  $\hat{\nu}_A$  с неизвестными географическими координатами источника излучения  $\varphi_E$  и  $\alpha_E$ , а также с известными координатами приемника  $\varphi_A$  и  $\alpha_A$ :

$$\hat{\nu}_A = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\sin \alpha_E \cos \alpha_A - \cos \alpha_E \sin \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A)}{\cos \alpha_E \sin(\varphi_E - \varphi_A)}. \quad (6)$$

При нахождении  $\operatorname{arctg}$  учитываются модули и знаки числителя и знаменателя. Если разность в (6) становится отрицательной, к азимуту добавляем  $2\pi$ .

Для нахождения угла места источника излучения следует перейти в плоскость треугольника  $A'PD$  рис. 1, стороны которого известны и связаны с неизвестным углом при вершине  $A'$  по теореме косинусов:

$$\overline{DP}^2 = \overline{A'D}^2 - 2 \overline{A'D} \overline{A'P} \cos \angle DA'P + \overline{A'P}^2. \quad (7)$$

Здесь  $\cos \angle DA'P = -\sin \hat{\gamma}_M$ ,  $\overline{DP} = R_T + h_E$ ,  $\overline{A'P} = R_T + h_A$ ,  $\overline{A'D} = \hat{R}_E$ , где  $\hat{\gamma}_M$  - измеренный угол места (угол между перпендикуляром к прямой  $\overline{A'P}$  и прямой  $\overline{A'D}$ ),  $h_E$  - неизвестная высота источника излучений над уровнем моря,  $h_A$  - известная высота приемника над уровнем моря,  $\hat{R}_E$  - расстояние между источником и приемником, которое получено в [1] и имеет вид:

$$\hat{R}_E = R_T \sqrt{2 \left(1 + \frac{h_E}{R_T}\right) \left(1 + \frac{h_A}{R_T}\right) [1 - \cos \alpha_E \cos \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A) - \sin \alpha_E \sin \alpha_A] + \left(\frac{h_E - h_A}{R_T}\right)^2}. \quad (8)$$

Решая уравнение (7) относительно измеренного угла места  $\hat{\gamma}_M$ , получаем:

$$\hat{\gamma}_M = \operatorname{arcsin} \frac{R_T}{2\hat{R}_E} \left[ \frac{\left(1 + \frac{h_E}{R_T}\right)^2 - \left(\frac{\hat{R}_E}{R_T}\right)^2}{1 + \frac{h_A}{R_T}} - \left(1 + \frac{h_A}{R_T}\right) \right]. \quad (9)$$

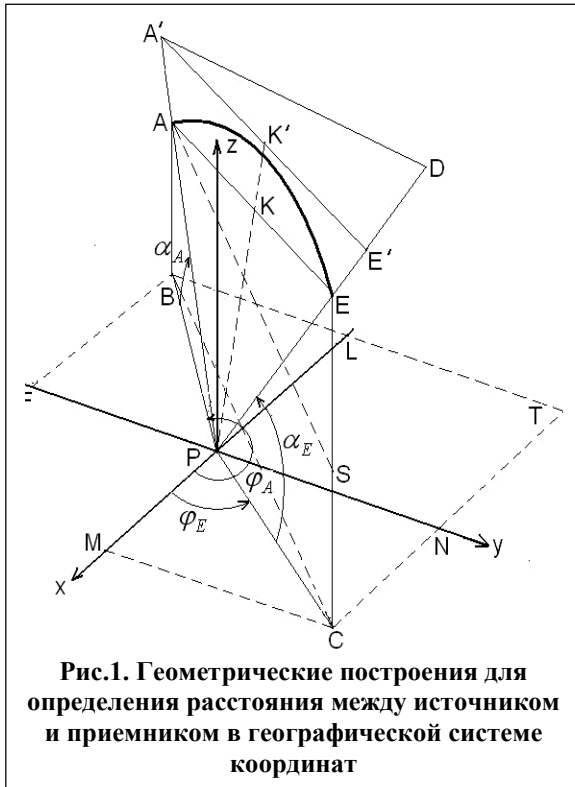
Для нахождения трех неизвестных географических координат источника излучения необходимо решить по три уравнения (6) и (9) для трех наборов различных географических координат приемников.

### Литература

1. Терсин В.В. Определение трехмерных географических координат точечного источника излучений разностно-дальномерным методом разнесенного приема. // Тезисы доклада (в настоящем сборнике).

### Определение трехмерных географических координат точечного источника излучений разностно-дальномерным методом разнесенного приема

Поскольку разностно-дальномерный алгоритм измеряет несколько разностей хода, равных разности расстояний от источника излучения до двух приемных позиций, то для определения географических координат источника излучения необходимо выразить через них расстояния от источника до каждого приемника.



**Рис.1. Геометрические построения для определения расстояния между источником и приемником в географической системе координат**

На рис.1 таким расстоянием будет длина отрезка  $\overline{A'D}$ . Поскольку при наземных измерениях приемник располагается ниже источника излучения, то будем считать, что источник излучения находится в точке  $D$ , а приемник – в точке  $A'$ . Проекции этих точек на поверхность Земли располагаются в точках  $E$  и  $A$  соответственно. Поверхность Земли представляет собой сферу радиусом  $R_T$  с центром в точке  $P$ , следовательно  $\overline{AP} = \overline{EP} = R_T$ .

С целью упрощения тригонометрических преобразований вместо непосредственного вычисления расстояния  $\overline{AD}$  определим сначала длину отрезка  $\overline{AE}$ , зависящую только от угловых координат, то есть долготы и широты как источника, так и приемника излучения. Преобразуя полярные координаты точек  $A$  и  $E$  в декартовы, получаем искомые значения координат:

$$x_A = \overline{LP} = \overline{BP} \cos \varphi_A = R_T \cos \alpha_A \cos \varphi_A,$$

$$y_A = \overline{FP} = \overline{BP} \sin \varphi_A = R_T \cos \alpha_A \sin \varphi_A,$$

$$z_A = \overline{AB} = R_T \sin \alpha_A,$$

для точки  $A$ , а также:

$$x_E = \overline{MP} = \overline{CP} \cos \varphi_E = R_T \cos \alpha_E \cos \varphi_E,$$

$$y_E = \overline{NP} = \overline{CP} \sin \varphi_E = R_T \cos \alpha_E \sin \varphi_E,$$

$$z_E = \overline{EC} = R_T \sin \alpha_E,$$

для точки  $E$ .

Здесь угол  $\varphi$  – долгота, угол  $\alpha$  – широта источника или приемника излучения, а

$$\overline{BP} = R_T \cos \alpha_A,$$

$$\overline{CP} = R_T \cos \alpha_E.$$

Вычисляя расстояние между точками  $A$  и  $E$  как евклидову норму в трехмерном пространстве, после тригонометрических преобразований получаем зависимость длины отрезка  $\overline{AE}$  от угловых координат источника и приемника излучения, представленную выражением (1):

$$\begin{aligned}\overline{AE} &= \sqrt{(\overline{MP} - \overline{LP})^2 + (\overline{NP} - \overline{FP})^2 + (\overline{EC} - \overline{AB})^2} = \\ &= \sqrt{2R_T \sqrt{1 - \cos \alpha_E \cos \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A) - \sin \alpha_E \sin \alpha_A}}\end{aligned}\quad (1)$$

Для нахождения расстояния между источником  $A'$  и приемником  $D$  излучения перейдем в плоскость треугольника  $A'PD$ . Здесь  $\overline{AA'} = \overline{EE'} = h_A$ ,  $\overline{ED} = h_E$ ,  $\overline{E'D} = h_E - h_A$ , где  $h_E$  - высота приемника (над уровнем моря) в точке  $E$ ,  $h_A$  - высота подъема источника излучения в точке  $A$ .

Отрезок  $\overline{A'E'}$  является стороной треугольника  $A'PE'$ , подобного треугольнику  $APE$  со стороной  $\overline{AE}$ , поэтому

$$\overline{A'E'} = \left(1 + \frac{h_A}{R_T}\right) \overline{AE}. \quad (2)$$

Расстояние между источником  $A'$  и приемником  $D$  излучения, определяется из треугольника  $A'DE'$  по теореме косинусов:

$$\overline{A'D}^2 = \overline{A'E'}^2 + \overline{E'D}^2 - 2 \cdot \overline{A'E'} \cdot \overline{E'D} \cdot \cos(\angle A'E'D), \quad (3)$$

где  $\overline{A'D}$ ,  $\overline{A'E'}$  и  $\overline{E'D}$  стороны треугольника, а

$$\cos(\angle A'E'D) = -\cos(\angle KEP) = -\frac{1}{2R_T} \overline{AE}.$$

Подставляя в (3) выражения для  $\overline{A'E'}$  и  $\overline{E'D}$ , а также  $\cos(\angle A'E'D)$ , получаем:

$$\begin{aligned}\overline{A'D} &= R_T \left\{ \left( \frac{h_E - h_A}{R_T} \right)^2 + 2 \left( 1 + \frac{h_E}{R_T} \right) \left( 1 + \frac{h_A}{R_T} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[ 1 - \cos \alpha_E \cos \alpha_A \cos(\varphi_E - \varphi_A) - \sin \alpha_E \sin \alpha_A \right] \right\}^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}\quad (4)$$

Рассуждая аналогично относительно расстояний от источника  $A'$  до каждой из  $n+1$ -ой приемных позиций  $D_0, D_1, \dots, D_n$ , получаем в итоге систему уравнений (5), связывающую результаты измерений каждой разности хода  $\Delta R_{ij}$  излученного сигнала до  $i$ -той и  $j$ -той приемных позиций, географические координаты  $\varphi_E^i, \alpha_E^i, h_E^i$  и  $\varphi_E^j, \alpha_E^j, h_E^j$  которых известны, с неизвестными географическими координатами источника излучений: долготой –  $\varphi_A$ , широтой –  $\alpha_A$  и высотой над уровнем моря –  $h_A$ .

$$\begin{aligned}\frac{\Delta R_{ij}}{R_T} &= \left\{ \left( \frac{h_E^i - h_A}{R_T} \right)^2 + 2 \left( 1 + \frac{h_E^i}{R_T} \right) \left( 1 + \frac{h_A}{R_T} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[ 1 - \cos \alpha_E^i \cos \alpha_A \cos(\varphi_E^i - \varphi_A) - \sin \alpha_E^i \sin \alpha_A \right] \right\}^{\frac{1}{2}} - \\ &\quad - \left\{ \left( \frac{h_E^j - h_A}{R_T} \right)^2 + 2 \left( 1 + \frac{h_E^j}{R_T} \right) \left( 1 + \frac{h_A}{R_T} \right) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[ 1 - \cos \alpha_E^j \cos \alpha_A \cos(\varphi_E^j - \varphi_A) - \sin \alpha_E^j \sin \alpha_A \right] \right\}^{\frac{1}{2}}.\end{aligned}\quad (5)$$

Система из  $n$  уравнений (5), полученных с помощью измерений разности хода относительно центральной позиции с номером 0, является трансцендентной и не решается аналитически. Для ее решения необходимо использовать численные методы, например, метод Ньютона.

### Результаты экспериментальной проверки эффективности компенсации фоновых шумов в двухканальной СВЧ радиотеплолокационной системе

Двухканальная СВЧ радиотеплолокационная система с дополнительным антенным каналом, формирующим сигнал компенсации помеховой составляющей входного сигнала системы, обусловленной приемом фонового излучения окружающего антенну пространства, дает возможность выполнять радиотеплолокационные измерения ради шумового излучения исследуемой области пространства независимо от условий проведения измерений и электрофизических характеристик исследуемых природных объектов [1].

В [2] предложена реализация двухканальной антенны в виде антенны с плоской апертурой (рупорная, зеркальная), в которой осуществляется прием на двух типах волн круглого волновода –  $H_{11}$  и  $E_{01}$ , в результате обеспечивается прием с требуемыми характеристиками направленности по двум антенным каналам.

Для проверки условий компенсации влияния фоновых шумов на результаты радиотеплолокационных исследований были выполнены натурные измерения ради шумового излучения атмосферы при введении дополнительного источника ради шумового сигнала в различные угловые области. На рис. 1 приведена схема эксперимента.

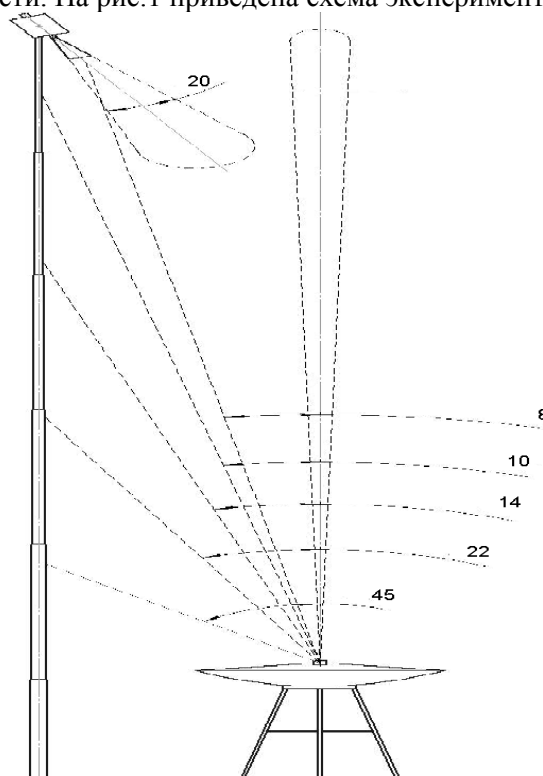
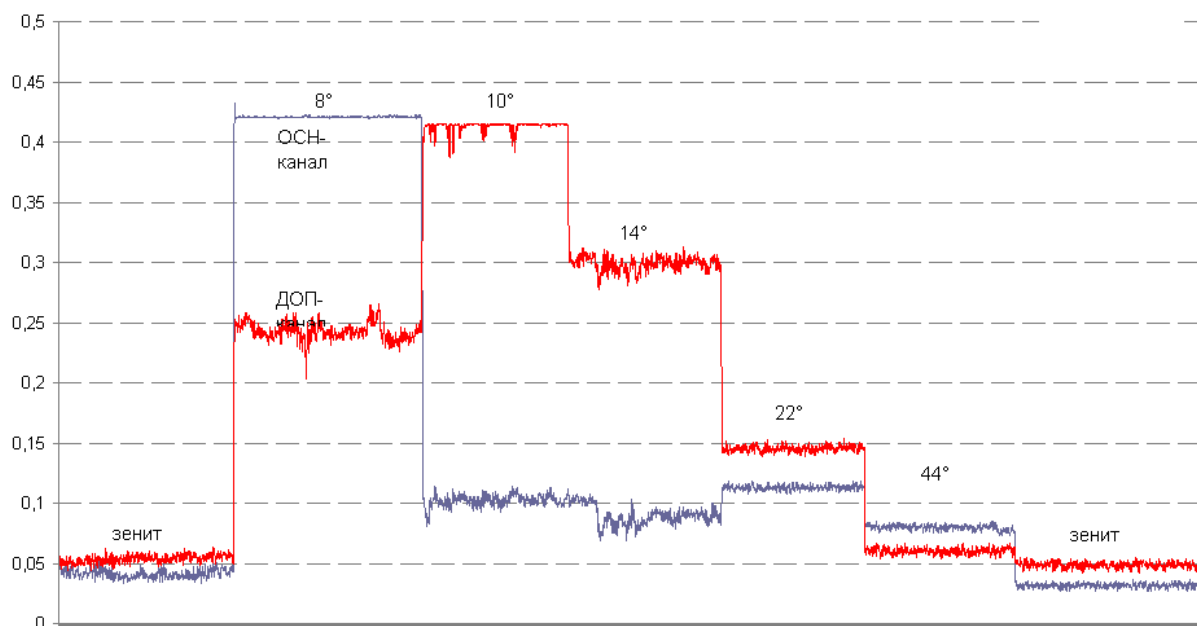


Рис.1.

В области полного главного лепестка и ближней боковой области ДН антенны располагалась штанга с установленным на ней рупором, на вход которого подавался сигнал от генератора шума постоянной мощности. На выходе двухканальной радиотеплолокационной системы фиксировались два выходных сигнала основного и дополнительного канала. Пример временной записи таких сигналов приведен на рис. 2.



**Рис.2.**

Приведенные на рис.2 временные диаграммы выходных сигналов двухканальной радиотеплокационной системы позволяют сделать следующий вывод: при отсутствии дополнительной регулировки усиления в дополнительном канале полная компенсация обеспечивается для фоновых шумов, создаваемых окружающим антенну пространством, соответствующим угловой области за пределами полного главного лепестка ДН основного антенного канала.

Таким образом, полученные результаты подтвердили эффективность применения двухканальной радиотеплокационной системы в задачах компенсации влияния фоновых шумов при радиотеплокационных исследованиях природных сред.

### **Литература**

1. Патент на полезную модель № 91630 Радиометрическая система с компенсацией аддитивных внешних фоновых помех// Федосеева Е.В. Опубл.: 20.02.2010 Бюл. №5.
2. Патент РФ №2300831 Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна. // Федосеева Е.В., Росточкина Е.А., Росточкин И.Н. Опубл.: 10.06.2007 Бюл. №16.



### Анализ энергетических соотношений в двухмодовой двухканальной антенне СВЧ радиотеплолокационной системы

Двухмодовая двухканальная антенна, применяемая в радиотеплолокационной системе, обеспечивает формирование на выходе дополнительного антенного канала сигнала пропорционального помеховой составляющей входного сигнала основного антенного канала, которая обусловлена приемом фонового излучения окружающего антенну пространства через область рассеяния ДН основного антенного канала. Формирование в такой антенне двух ДН на одной апертуре происходит за счет осуществления раздельного приема на двух модах круглого волновода  $H_{11}$  и  $E_{01}$  при включении на выходе антенны специального модового разделителя [1,2].

Противофазность распределения поля по апертуре антенны на дополнительной волне  $E_{01}$  обеспечивает отсутствие приема по осевому направлению, что является первым основным требованием к направленным свойствам дополнительного канала радиотеплолокационной системы. Второе требование к направленным свойствам дополнительного канала – адекватный основному антенному каналу прием по области рассеяния ДН. Для проверки выполнения второго требования необходима проверка соотношения абсолютных величин принимаемых мощностей по двум каналам в указанной угловой области. Для решения данной задачи было выполнено моделирование диаграмм направленности двухканальных двухмодовых рупорных антенн с модовым разделителем в программе Microwave Studio.

На рис. 1 представлена модель антенны, а на рис. 2-3 диаграммы направленности антенны по полю (1 – основной канал, 2 – дополнительный канал), причем для дополнительного антенного канала выполнена нормировка по уровню поля в осевом направлении основного антенного канала.

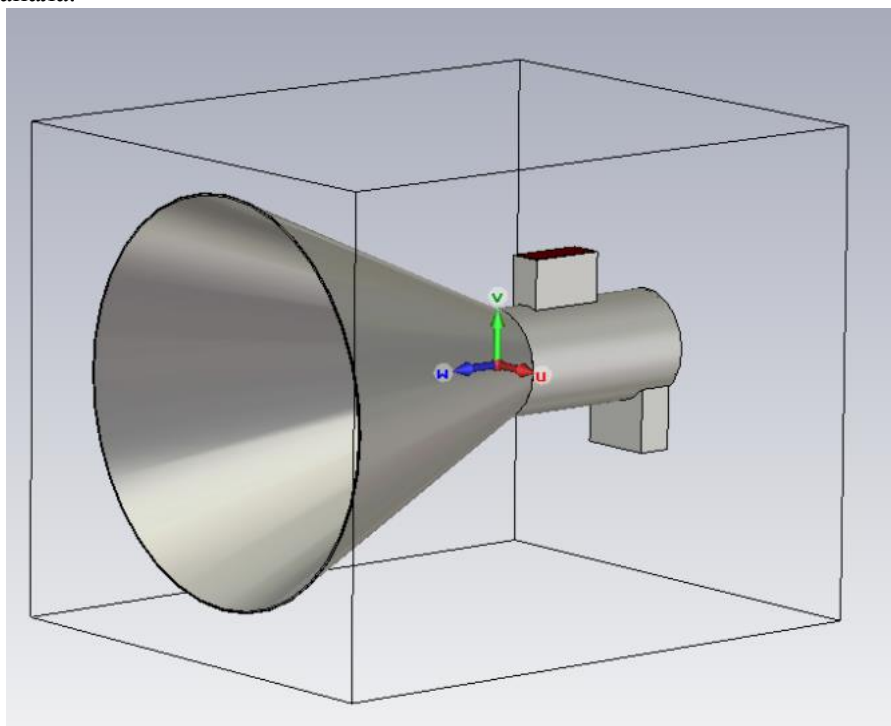
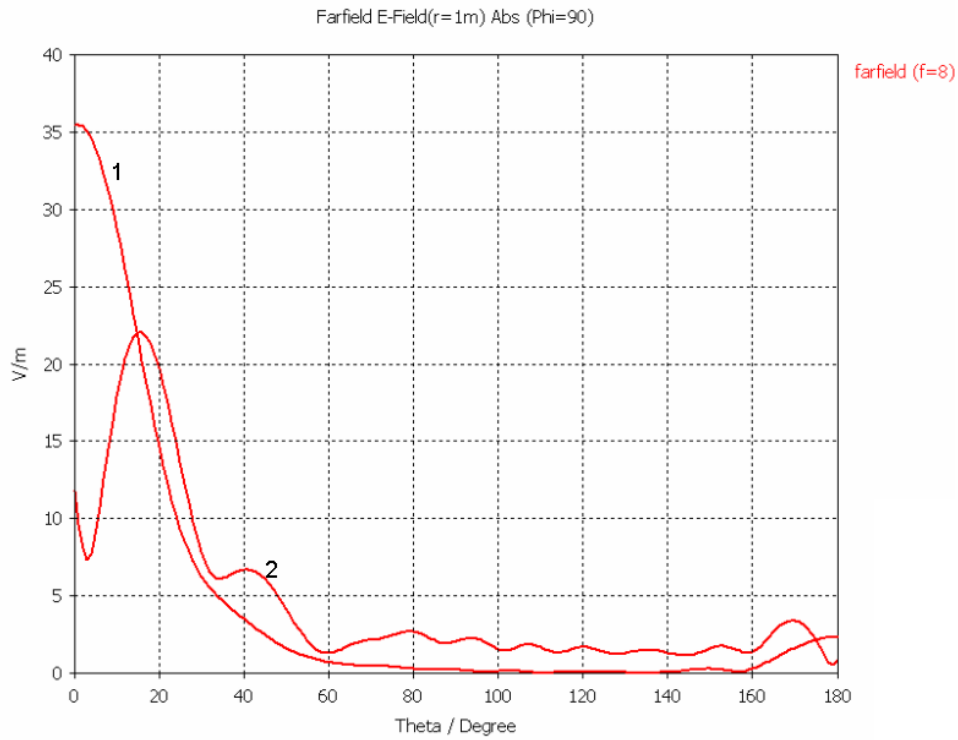
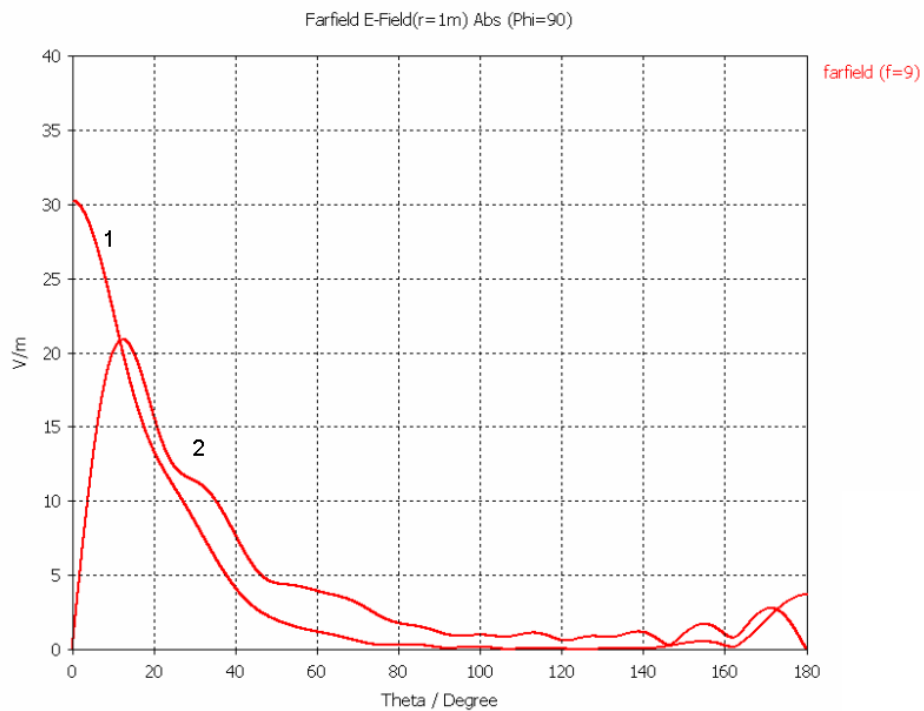


Рис.1.



**Рис.2.**



**Рис.3.**

Анализ полученных данных показал, что обеспечивается достаточная степень адекватности уровня принимаемой мощности из области рассеяния ДН двух каналов в ближней боковой области диаграммы направленности, прием по которой фонового шума в основном и определяет величину помеховой составляющей входного сигнала радиотеплолокационной системы.

## Литература

1. Патент на полезную модель № 91630 Радиометрическая система с компенсацией аддитивных внешних фоновых помех// Федосеева Е.В. Оpubл.: 20.02.2010 Бюл. №5.
2. Патент РФ №2300831 Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна. // Федосеева Е.В., Ростокина Е.А., Ростокин И.Н. Оpubл.: 10.06.2007 Бюл. №16.

### Оценка влияния затухания в двухканальной антенне на результаты компенсации фоновых шумов в СВЧ радиотеплолокационной системе

СВЧ радиотеплолокационные измерения радиозумового излучения природных сред позволяют дистанционно непрерывно оценивать физические параметры исследуемой области пространства. Погрешность измерений радиояркостной температуры обусловлена конечной пространственной селективностью антенны и приемом через область рассеяния диаграммы направленности радиозумового излучения всего окружающего антенну пространства, что приводит к недетерминированному помеховому приросту входного сигнала и необходимости выделения информационной составляющей входного сигнала системы.

Одно из направлений решения задачи исключения влияния фоновых шумов на результаты радиотеплолокационных измерений при дистанционном зондировании природных сред – реализация компенсационных измерений при формировании дополнительного сигнала компенсации на выходе антенны [1-2]. Для практической реализации данного метода была предложена радиотеплолокационная система, построенная на основе модуляционного принципа приема радиозумового излучения, содержащая двухканальную антенну [3-4].

К дополнительному антенному каналу предъявляются следующие требования: отсутствие приема по области главного лепестка ДН основного антенного канала и адекватный основному антенному каналу прием по области рассеяния ДН. В таком случае антенная температура на выходе основного антенного канала равна

$$T_{осн} = \bar{T}_{гл} (1 - \beta_{осн}) \eta_{осн} + \bar{T}_{ф} \beta_{осн} \eta_{осн} + T_0 (1 - \eta_{осн}), \quad (1)$$

на выходе дополнительного антенного канала

$$T_{доп} = \bar{T}_{гл} (1 - \beta_{доп}) \eta_{доп} + \bar{T}_{ф} \beta_{доп} \eta_{доп} + T_0 (1 - \eta_{доп}), \quad (2)$$

где  $\bar{T}_{гл}$  и  $\bar{T}_{ф}$  - усредненные значения радиояркостной температуры по главному лепестку и области рассеивания ДН основного антенного канала;  $\beta_{осн}$  и  $\beta_{доп}$  - коэффициенты рассеяния ДН основного и дополнительного каналов, нормированные соответственно по суммарной мощности основного и дополнительного канала;  $T_0$  - термодинамическая температура антенны;  $\eta_{осн}$  и  $\eta_{доп}$  - кпд основного и дополнительного канала антенны.

Выходное напряжение радиотеплолокационной системы пропорционально разности антенных температур двух антенных каналов

$$U_{вых} \propto \bar{T}_{гл} (1 - \beta_{осн}) + \bar{T}_{ф} (\eta_{осн} - \eta_{доп}) + T_0 (\eta_{осн} - \eta_{доп}). \quad (3)$$

Согласно выражению (3) в выходном сигнале радиотеплолокационной системы с компенсацией фоновых шумов присутствует помеховая составляющая, величина которой пропорциональна разности кпд двух антенных каналов. Для анализа ее влияния на погрешность радиотеплолокационных измерений были выполнены оценки величины  $(\eta_{осн} - \eta_{доп})$  в диапазоне частот 9-11 ГГц на основе данных по численным значениям коэффициентов затухания волн  $H_{11}$  и  $E_{01}$  в круглом волноводе, приведенных в [5].

Для принятой длины общего приемного волновода антенны 30 см численное значение разности  $(\eta_{осн} - \eta_{доп})$  не превысило 0.001, т.е. погрешность обусловленная различием кпд основного и дополнительного антенных каналов не превысит 0.3 К, поэтому ее вклад в общую погрешность радиотеплолокационных измерений пренебрежимо мал.

Таким образом, в СВЧ радиотеплолокационной системе исследования природной среды с компенсацией влияния фонового шума с применением двухканальной двухмодовой антенны можно считать, что погрешность измерений в основном обусловлена точностью реализации требований к направленным свойствам дополнительного канала антенны.

### Литература

1. Краус Дж. Д. Радиоастрономия. Пер. с англ. Под ред. В.В. Железнякова – М.: Сов. радио, 1973. – 456 с.
2. Есепкина Н.А., Корольков Д.В., Парийский Ю.Н. Радиотелескопы и радиометры. – М.: Наука. 1973. – 416 с.
3. Патент на полезную модель № 91630 Радиометрическая система с компенсацией аддитивных внешних фоновых помех// Федосеева Е.В. Опубл.: 20.02.2010 Бюл. №5.
4. Патент РФ №2300831 Способ снижения уровня шума антенны и двухмодовая апертурная антенна. // Федосеева Е.В., Росточкина Е.А., Росточкин И.Н. Опубл.: 10.06.2007 Бюл. №16.
5. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1973. – 608 с.