

На правах рукописи

ЖЕНГУРОВ БОРИС ГЛЕБОВИЧ

**РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ,
ПАЗАЗИТИРУЮЩИХ НА СИГНАЛАХ ДРУГИХ СИСТЕМ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2016

Работа выполнена на кафедре теоретических основ радиотехники и связи (ГОРС) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Поволжский государственный университет телекоммуникации и информатики» (ПГУТИ).

Научный руководитель

Горячкин Олег Валериевич

– доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники и связи ПГУТИ, г. Самара

Официальные оппоненты:

Костров Виктор Васильевич

– доктор технических наук, профессор кафедры «Радиотехника» Муромского института (филиала) ГОУ ВПО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Муром

Коваленко Александр Иванович

– кандидат технических наук, начальник отдела, АО «НИИ ТП», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва» г. Самара

Защита состоится

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Поволжского государственного университета телекоммуникации и информатики и на сайте www.psati.ru

Автореферат разослан

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, просим направить по адресу: 443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, д. 23, ПГУТИ

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук

Антипов О.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Задача дистанционного зондирования Земли является одной из приоритетных направлений развития авиационной и космической техники. Среди существующих систем исследования земной поверхности особое место занимают радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), которые позволяют получать радиолокационные изображения с высоким разрешением при любых метеословиях. На сегодняшний день одним из самых перспективных направления развития радиолокационных систем является развитие многопозиционных РСА (МПРСА). Это системы с разнесенными в пространстве передающими и приемными пунктами, в которых пространственная селекция целей, для последующего извлечения полезной информации, осуществляется с использованием алгоритмов синтезирования апертуры. Использование МПРСА позволяет строить радиолокационные системы, работающие в длинноволновых диапазонах частот (VHF и P). Работа в этих диапазонах затруднена деструктивным влиянием ионосферы, которое носит случайный характер, однако при использовании МПРСА опорную функцию сигнала можно сформировать из сигналов искаженных атмосферой, что позволяет получать РЛИ в этих условиях.

Среди МПРСА особенный интерес представляют системы, получившие в литературе название «РСА-паразиты» (Parasitic SAR), поскольку для решения целевой задачи эти системы используют чужие радиосигналы, иногда сигналы радиосистем, не являющихся собственно радиолокаторами. Например, это могут быть системы спутниковой навигации, системы космической связи, системы радио и ТВ вещания и т.п. Такой подход к созданию МПРСА привлекателен в экономическом отношении, так как часть элементов системы уже развернута. Кроме того создаваемые элементы МПРСА могут быть пассивными, что обеспечивает высокую скрытность разворачиваемой системы, что в свою очередь может быть весьма актуальным для военных применений.

Большую роль в развитии данного направления радиотехники сыграли исследования отечественных и зарубежных ученых А.И. Калмыкова, Н.А. Арманда, В.Б. Штеншлегера, Б.Г. Кузузы, В. С. Верба, Л.Б. Неронского, И.Г. Осипова, В.Э. Турук, Ю.В. Шкварко, И.В. Сахно, В.Ф. Фатева, А.В. Ксендука, А.П. Реутова, А.И. Захарова, С.Е. Фальковича, В.И. Пономарева, В.Ф. Кравченко, В.К. Волосюка, Г.С. Кондратенкова, О.В. Горячкина, В. Г. Коберниченко, В.В. Сазонова, В.В. Кострова, М.Ю. Достовалова, А.И. Коваленко, И.С. Неймана, A. Ishimaru, A. Moreira, R. Klem, A. Freeman, J.W. Wood, C.J. Oliver, L.M.H. Ulander, H. Hellsten, Ender, M. Zink, Samczyński P., Bączyk M. K., Zhangfan Z., Antoniou M., Feifeng L., и др.

При использовании уже существующих, нерадиолокационных систем возникают проблемы с обеспечением когерентности РСА, трудности с обеспечением динамического диапазона, и значительно возрастает вычислительная сложность алгоритмов цифровой обработки сигнала. Кроме того, информационные характеристики РСА-паразита могут оказаться не очень хорошими, так как используемые сигналы не предназначены для радиолокации.

Таким образом, на сегодняшний день является актуальной задача получения алгоритмов построения радиолокационных изображений (РЛИ) в РСА – паразитах, а также в РСА, работающих в VHF и P – диапазонах волн, требующих компенсации ионосферных воздействий.

Цели и задачи исследования. Целью работы является разработка и исследование характеристик алгоритмов получения радиолокационных изображений в радиолокаторах с синтезированной апертурой, паразитирующих на сигналах других систем.

Для достижения указанной цели в диссертационной работе решены следующие задачи:

- получение алгоритма построения РЛИ с радиолокатора, паразитирующего на сигналах ТВ-вещания;
- анализ основных характеристик «РСА-паразита». Подбор оптимальных параметров для построения РЛИ. Поиск вариантов оптимальной, с точки зрения вычислительной сложности, реализации алгоритмов;
- математическое моделирование и экспериментальная отработка разработанных алгоритмов на реальных радиолокационных сигналах, а также сигналах БиРСА Р диапазона частот, установленного на МКА «Аист-2Д».

Методы исследования. Задачи проведенных исследований решены на основе методов статистической радиотехники, цифровой обработки сигналов, приближенных методов, а также компьютерного имитационного моделирования и натурального эксперимента.

Научная новизна.

1. В рамках теории байесовского оценивания задача формирования радиолокационного изображения в паразитирующем РСА сформулирована как задача приближенного решения уравнения Фредгольма 2-го рода.
2. Разработан алгоритм формирования РЛИ в паразитирующей РСА на основе адаптивной инверсной фильтрации.
3. В процессе экспериментальных работ впервые получены РЛИ местности РСА, паразитирующего на сигналах аналогового (SECAM) и цифрового (DVB-T2) ТВ вещания.
4. Для алгоритма формирования РЛИ в паразитирующем РСА на основе адаптивной инверсной фильтрации определена область фокусировки вокруг наземного пункта приема космической бистатической РСА Р-диапазона высокого разрешения в условиях дестабилизирующего воздействия атмосферы Земли.

Обоснованность и достоверность результатов работы Результаты исследований получены на основе строгих радиофизических и математических моделей. Используемые при этом методы решения поставленных задач, корректны с формальной математической точки зрения. Контроль достоверности результатов осуществлялся анализом физического смысла решений, имитационным моделированием и натурным экспериментом.

Практическая ценность работы. Полученные алгоритмы открывают возможность получения радиолокационных изображений в радиолокаторах, паразитирующих на сигналах других систем.

Разработанные алгоритмы могут быть использованы для получения изображения в многопозиционных радиолокационных системах с синтезированной апертурой в условиях дестабилизирующего воздействия среды распространения.

Основные положения выносимые на защиту.

1. Алгоритм формирования радиолокационного изображения в паразитирующей РСА, основанный на решении возмущенной системы линейных уравнений.
2. Алгоритм формирования РЛИ в паразитирующей РСА на основе адаптивной инверсной фильтрации.

3. Результаты математического, полунатурного моделирования и экспериментальных работ по исследованию характеристик разработанных алгоритмов.
4. Методика расчета области фокусировки вокруг наземного пункта приема космической бистатической РСА Р диапазона высокого разрешения в условиях дестабилизирующего воздействия атмосферы Земли.

Личный вклад автора. В совместных работах диссертанту принадлежит подробное проведение рассуждений, вывод аналитических соотношений, проведение расчетов, математическое моделирование, обработка экспериментальных данных.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на Европейской конференции по радиолокаторам с синтезированной апертурой EUSAR'2014 (г. Берлин, Германия, 2014 г.), на Мировой конференции по системной технике, кибернетике и информатике, г. Орlando, США, 2015г., на Всероссийской НТК «Радиолокация, навигация, связь» (г. Воронеж, 2013 г., 2014 г.), на Всероссийской конференции «Козловские чтения», (Самара, 2013), на международной научно-технической конференции "Физика и технические приложения волновых процессов", (г. Екатеринбург 2013 г. Нижний Новгород, 2014 г. Казань, 2015 г), на Всероссийской НТК «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2015 г), на Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ (г. Самара, 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2015 г.).

Публикации по работе. По материалам диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 5 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 2 публикации индексируемые в БД Scopus.

Реализация результатов работы. Результаты проведенных исследований и разработок являются частью научно-исследовательских, и опытно-конструкторских работ проводимых в АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара) по созданию перспективных радиолокационных систем ДЗЗ.

Материалы диссертационной работы использованы в ПГУТИ при выполнении НИР «Поиск», ОКР «АИСТ-2Д» а также в учебном процессе на кафедре ТОРС ПГУТИ. Использование результатов работы подтверждено соответствующими документами о внедрении.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений, содержит 98 страниц машинописного текста, в том числе 38 иллюстраций и 3 таблицы. Список литературы включает в себя 65 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во введении приведены основные принципы построения РСА, дан обзор современного состояния РСА авиационного и космического базирования. Представлены перспективы развития РСА, отмечены проблемы, стоящие на пути их совершенствования по различным направлениям. Приведён обзор существующих систем РСА-паразитов. Представлена постановка задачи.

В первой главе рассматриваются методы построения РЛИ с РСА – паразита. Рассмотрена математическая модель МПРСА. Рассмотрен вариант построения двухпозиционной системы с приемной позицией, размещённой на борту движущегося носителя. Геометрия системы показана на рисунке 1. Источник сигнала имеет координаты (x_t, y_t, z_t) , Приемник имеет координаты (x_r, y_r, z_r) и

движется параллельно оси OY со скоростью V . Поскольку в рассматриваемой системе для формирования изображений используется сигнал телевизионного вещания, то для построения изображений местности необходимо обеспечить когерентный прием отраженных от окружающих объектов сигналов. Для этого в приемном устройстве предусмотрен канал приема прямого сигнала от телецентра (далее «прямой канал») и канал приема отраженных сигналов («отраженный канал»). Гетеродины и АЦП в обоих каналах должны быть синхронизированы от одного генератора. Сигнал, принятый по прямому каналу

$$\dot{s}_1(t) = G_1(t) \dot{i}_{tv}(t - \tau_1(t)) e^{j\omega_0(t - \tau_1(t))} + n_1(t), \quad (1)$$

где $\dot{i}_{tv}(t)$ – комплексная огибающая ТВ - сигнала, ω_0 – несущая частота сигнала, $n_1(t)$ – комплексный гауссовский шум в прямом канале приемника, $G_1(t)$ – вещественная весовая функция, учитывающая влияние диаграмм направленности приемной и передающей антенны в прямом канале, $\tau_1(t)$ – временная задержка сигнала в прямом канале, $\tau_2(t, x, y)$ – время задержки в отраженном канале.

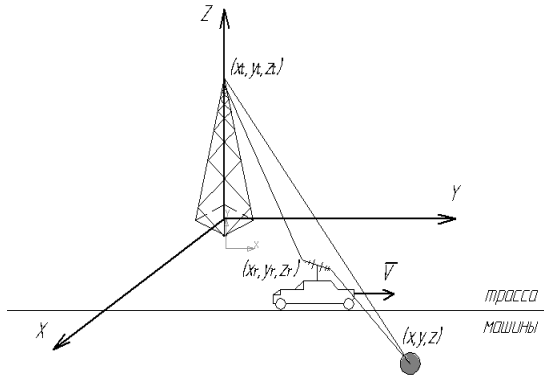


Рисунок 1 - Геометрия бистатической РСА

Сигнал, отраженный от поверхности

$$\dot{s}_2(t) = \iint_D G_2(t, x, y) \dot{i}_{tv}(t - \tau_2(t, x, y)) \dot{\xi}(x, y) dx dy + \dot{n}_2(t), \quad (2)$$

где $\dot{\xi}(x, y)$ – коэффициент отражения поверхности земли, $\dot{n}_2(t)$ – комплексный гауссовский шум в приемном устройстве отраженного канала, D – область отражения, $G_2(t, x, y)$ – вещественная весовая функция, учитывающая влияние диаграмм направленности приемной и передающей антенны в отраженном канале. Задача построения оптимального алгоритма приема сводится к оценке коэффициента $\dot{\xi}(x, y)$ (комплексного радиолокационного изображения) из сигнала, принятого по отраженному каналу.

Алгоритмом максимума апостериорной вероятности (МАН), можно записать в виде:

$$\hat{\xi}(x, y) = \arg \max_{\xi(x, y)} p(\xi(x, y) | \dot{s}_2(t)) = \arg \max_{\xi(x, y)} p(\dot{s}_2(t) | \xi(x, y)) p(\xi(x, y)), \quad (3)$$

где $p(\xi(x, y) | \dot{s}_2(t))$ - апостериорное распределение восстанавливаемого сигнала (РЛИ), $p(\dot{s}_2(t) | \xi(x, y))$ - функционал правдоподобия наблюдаемого изображения, $p(\xi(x, y))$ - априорное распределение восстанавливаемого изображения. Пусть восстанавливаемое радиолокационное изображение является реализацией гауссовского комплексного случайного процесса с корреляционной функцией $B_{\xi}(x_1, x_2, y_1, y_2)$ и нулевым математическим ожиданием. Шум в уравнении (2) также является гауссовским комплексным случайным процессом с корреляционной функцией $B_{n_2}(t_1, t_2)$ и нулевым математическим ожиданием.

В диссертационной работе показано, что (3) сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма 2-го рода в классическом виде:

$$\xi(x, y) = \xi_0(x, y) - \lambda \iint F(x_1, x_2, y_1, y_2) \xi(x_1, y_1) dx_1 dy_1 \quad (4)$$

где $F(x_1, x_2, y_1, y_2)$ -функция неопределенности бистатической РСА; $\xi_0(x, y)$ - искомое радиолокационное изображение. При решении задачи построения радиолокационных изображений необходимо решение уравнения (4) в конечном множестве точек, определяемом типом используемой дискретизации. В этом случае целесообразно прямо перейти к дискретному аналогу уравнения:

$$\begin{aligned} \xi(n\Delta x, m\Delta y) &= \xi_0(n\Delta x, m\Delta y) - \\ &- \lambda \sum_i \sum_j F(i\Delta x, j\Delta x, n\Delta y, m\Delta y) \cdot \xi(i\Delta x, j\Delta y) \end{aligned} \quad (5)$$

где $m = 1 \dots N$, $n = 1 \dots N$, $i = 1 \dots N$, $j = 1 \dots N$, $\Delta x \times \Delta y$ - пространственный шаг дискретизации. Используя индексацию $k = n + (m - 1)N$, $l = i + (j - 1)N$ систему линейных уравнений (5) можно записать в привычном виде

$$\xi = \begin{pmatrix} \xi(\Delta x, \Delta y) \\ \vdots \\ \xi(N\Delta x, N\Delta y) \end{pmatrix}, \quad \xi_0 = \begin{pmatrix} \xi_0(\Delta x, \Delta y) \\ \vdots \\ \xi_0(N\Delta x, N\Delta y) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\mathbf{F} = \begin{pmatrix} F(\Delta x, \Delta x, \Delta y, \Delta y) & \dots & F(N\Delta x, N\Delta x, \Delta y, \Delta y) \\ \vdots & & \vdots \\ F(N\Delta x, N\Delta x, \Delta y, \Delta y) & \dots & F(N\Delta x, N\Delta x, N\Delta y, N\Delta y) \end{pmatrix}$$

$$(\mathbf{E} + \lambda \mathbf{F}) \xi = \xi_0 \quad (7)$$

Однако данный метод требует больших вычислительных затрат. В диссертационной работе предлагается альтернативный путь построения оценки РЛИ,

не требующий итерационного процесса или решения системы линейных уравнений. Для этого рассмотрим задачу выбора линейного фильтра, при котором выполняется наиболее близкое приближение

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) \rightarrow \delta(x_1 - x_2, y_1 - y_2).$$

Пусть в области формирования радиолокационного изображения $G_2(t_1, x, y) = 1$, что наиболее характерно для диапазона УКВ. Заметим, что на интервале обработки информации $(t_2 - t_1)$ всегда можно выделить N участков длительностью T , на которых функцию $\tau_2(t, x, y)$ можно считать кусочно-постоянной, тогда справедливо следующее выражение

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \sum_{i=0}^{N-1} \int_{iT}^{(i+1)T} \dot{s}_h(t - \tau_2(t_i, x_1, y_1)) s_h^*(t - \tau_2(t_i, x, y)) dt$$

$$\dot{s}_h(t') = \int \dot{s}_{tv}(t) \dot{h}(t - t') dt, \quad (8)$$

Воспользуемся равенством Парсеваля для преобразования Фурье, получим

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} |\dot{S}_i(i\omega)|^2 |\dot{H}_i(i\omega)|^2 e^{i(\omega - \omega_0)(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y))} d\omega \quad (9)$$

, т.е.

Пусть выполняется условие

$$\frac{|\dot{S}_i(j\omega)| |\dot{H}_i(j\omega)|}{\mu(\omega)} = 1, \quad (10)$$

В этом выражении $|\dot{S}_i(j\omega)|$ - спектральная плотность комплексной огибающей телевизионного сигнала на интервале времени $(iT, (i+1)T)$, $\dot{H}_i(j\omega)$ - передаточная функция искомого фильтра на несущей частоте $\mu(\omega)$ - заданная весовая функция

$$F(x_1, x_2, y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=0}^{N-1} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j(\omega - \omega_0)(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y))} d\omega = \sum_{i=0}^{N-1} \mu(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y)) e^{-j\omega_0(\tau_2(t_i, x_1, y_1) - \tau_2(t_i, x, y))} \quad (11)$$

Последнее выражение, очевидно, является функцией неопределенности бистатической РСА, в которой в качестве зондирующего сигнала используется последовательность импульсов, с периодом повторения T . Т.о. мы показали, что для компенсации особенностей функции неопределенности телевизионного сигнала

можно провести фильтрацию с адаптивным выравниванием АЧХ. Алгоритм оценивания в данном случае будет иметь вид

$$\hat{\xi}(x, y) = \int G_2(t, x, y) s_1^{*h}(t_1 - \tau_2(t_1, x, y) + \tau_1(t)) s_2^h(t) dt \quad (12)$$

Однако после фильтрации аддитивный шум становится окрашенным, в соответствии с корреляционной функцией корректирующего фильтра, что означает более низкую помехоустойчивость данного алгоритма, по сравнению с оптимальным алгоритмом (7).

Во второй главе проведено полунатурное моделирование с использованием сигнала записанного с эфира. Моделирование проводилось с целью проверки основных результатов первой главы, сравнения алгоритмов, определения оптимальных параметров обработки для получения РЛИ в различных диапазонах и условиях съемки. При моделировании использовались реальные сигналы прямого канала приемника телевизионного сигнала паразитической РСА, установленной движущимся автомобиле. Отраженный сигнал рассчитывался из цифровых отсчетов прямого, в соответствии с параметрами модели. Показано, что алгоритм позволяет получать РЛИ с достаточным контрастом для выделения цели на фоне при отношении сигнал/шум не менее -13дБ. Определено, что при весовой обработке предпочтительным является окно Хэмминга. Показано, что определение времени синтеза апертуры необходимо проводить подбором для каждого маршрута записи радиолограмм БиРСА.

В третьей главе представлены результаты натуральных экспериментов. Серия экспериментов была проведена с использованием двухканального приемника телевизионного сигнала установленного на движущемся автомобиле (рисунок 2).



Рисунок 2 – Внешний вид антенного устройства БиРСА

По результатам экспериментов получены РЛИ местности с разрешающей способностью близкой к заданной. На полученных РЛИ присутствуют отражения от высотных зданий, мачт линий электропередач и других высотных объектов, располагающихся выше моста по которому двигался автомобиль (рисунок 3). Также в диссертации представлены РЛИ полученные с использованием сигналов цифрового телевидения стандарта DVT-B (рисунок 4). Необходимо отметить, что в этом случае РЛИ может быть получено с помощью алгоритма (12) без адаптивного выравнивания АЧХ.

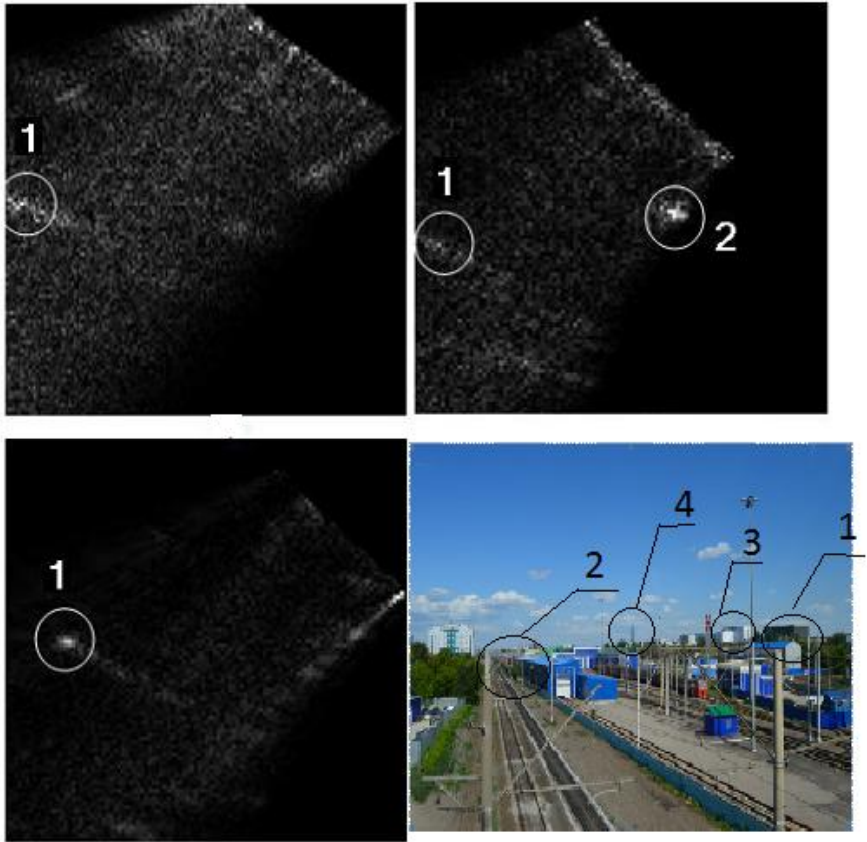


Рисунок 3 – Радиолокационное изображение с бистатического радиолокационного комплекса, паразитирующее на сигнале аналогового телевидения

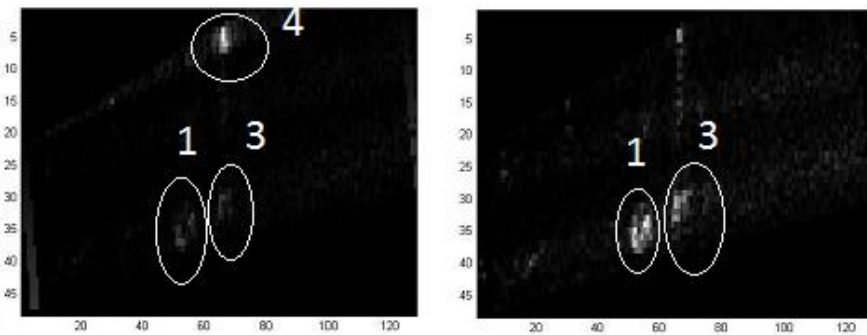


Рисунок 4 – РЛИ с использованием сигнала цифрового телевидения стандарта DVB-T2.

В четвертой главе рассматривается задача построения изображения в бистатической РСА космического базирования в условиях дестабилизирующего воздействия атмосферы земли. В этом случае эффективно применение алгоритмов формирования РЛИ, разработанных для паразитирующих РСА. В этой связи в четвертой главе проведен расчет области автофокусировки вокруг наземного пункта приема космической бистатической РСА Р диапазона высокого разрешения в условиях дестабилизирующего воздействия атмосферы Земли. Для этого определена корреляционная функция флуктуации разности времени прихода сигналов для МПРСА (рисунок 5).

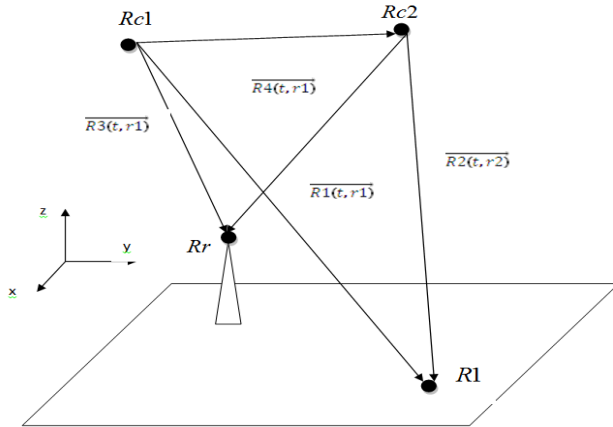


Рисунок 5 –Геометрическая модель системы ДЗЗ по бистатической схеме, где Rc1- координаты спутника в момент начала съемки; Rc2 – координаты спутника в момент конца съемки; Rr – координаты приемника; R1– координаты, исследуемого участка элемента разрешения.

Корреляционная функция разности флуктуаций времени прихода сигналов имеет вид:

$$B_{\Delta}(t_1, t_2, R_1) = \frac{1}{c^2} \int_0^a \int_0^b B_{11}(r_1 r_2) dr_1 dr_2 - \frac{1}{c^2} \int_0^a \int_0^c B_{10}(r_1 r_2) dr_1 dr_2 - \frac{1}{c^2} \int_0^d \int_0^b B_{01}(r_1 r_2) dr_1 dr_2 + \frac{1}{c^2} \int_0^d \int_0^c B_{00}(r_1 r_2) dr_1 dr_2 \quad (12)$$

$$\text{где } a = |R_c(t_1) - R_1|, \quad b = |R_c(t_2) - R_1| \quad c = |R_c(t_2) - R_r| \quad d = |R_c(t_1) - R_r|$$

Рассматриваемая задача сводится к нахождению частных корреляционных функций флуктуации времени прихода для расстояний между точками Rc1, Rc2, Rr, R1.

Для случая, равномерного движения спутника вдоль координаты y со скоростью 7500 км/с и высотой орбиты 510 км получим следующие графики корреляционных функций флуктуации траекторной фазы при масштабе неоднородностей в ионосфере равном 1000м (Рисунок 6)

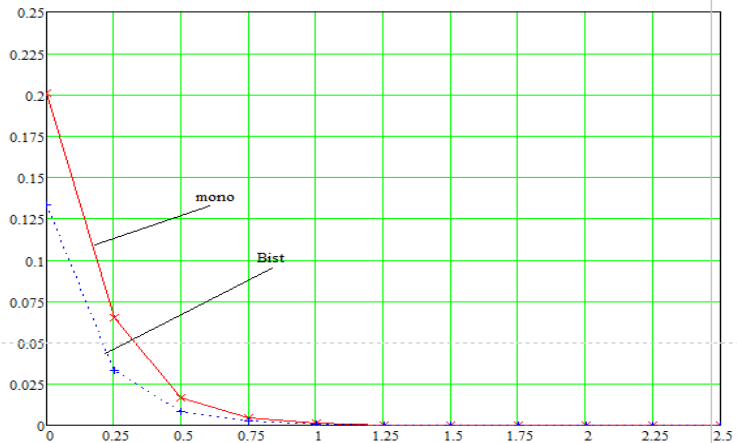


Рисунок 6– Графики корреляционных функций флуктуации разности времени прихода сигналов при масштабе неоднородностей при масштабе неоднородностей в ионосфере равном 1000м, где mono- для моностатического случая; Bist- для бистатического случая.

Как видно из рисунка 6 при работе в бистатическом режиме дисперсия флуктуации траекторной фазы имеет меньшие значения, чем в моностатическом режиме.

Для определения зоны построения радиолокационного изображения при работе в бистатическом режиме для Р-диапазоне частот было проведено компьютерное моделирование. Для проведения моделирования был сформирован сигнал бортовой аппаратуры МКА «Аист-2Д».

В результате моделирования было определено, что РЛИ будут существенно искажаться при следующих соотношениях:

- 1) масштаб неоднородности 100 м – дисперсия 1,6 рад²;
- 2) масштаб неоднородности 700 м – дисперсия 2,5 рад²;
- 3) масштаб неоднородности 1000 м – дисперсия 8 рад².

На рисунке 7 представлены значения дисперсии флуктуации траекторной фазы при различных расстояниях x от пункта приема при масштабе неоднородности ионосферы равном 4000 м.

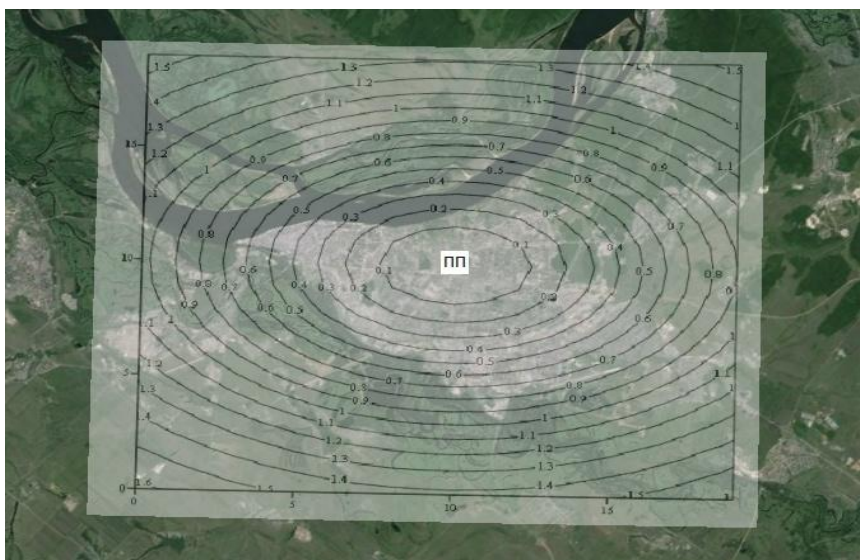


Рисунок 7– Зоны корреляции фазы относительно пункта приема при масштабе неоднородности ионосферы равном 4000 м.

Из анализа рисунка 7 можно сделать вывод, что при работе в бистатическом режиме, зона фокусировки на космическом БирСА не менее 20 км.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Показано, что алгоритм получения радиолокационного изображения с бистатического радиолокатора сводится к решению уравнения Фредгольма 2-го рода
2. Алгоритм построения оценки РЛИ, основанный на выборе адаптивного фильтра сводящего функцию неоправданности сигнала к дельта-функции.
3. Показано, что определение времени синтеза апертуры необходимо проводить подбором для каждого случая записи радиолограмм.
4. Алгоритм формирования РЛИ методом адаптивной инверсной фильтрации имеет высокую помехоустойчивость, что позволяет строить РЛИ с использованием приемника с низкой чувствительностью.
5. Проведена экспериментальная отработка разработанного алгоритма адаптивной инверсной фильтрации, показывающая возможность получения радиолокационного изображения с использованием сигнала от аналогового телевидения.
6. Показана возможность получения радиолокационного изображения с использованием сигнала цифрового телевидения стандарта DVB-T2.
7. Определено, что при работе с сигналом цифрового телевидения для получения РЛИ использовании алгоритма адаптивной инверсной фильтрации нет необходимости.

8. Проведенный расчет показывает возможность формирования РЛИ космического бистатического РСА Р – диапазона, методом в котором в качестве опорного сигнала сигнал прямого канала.
9. Показано, что при работе в бистатическом режиме дисперсия флуктуации траекторной фазы сигнала имеет меньшее значения, чем в моностатическом режиме, что позволяет получать РЛИ с заданным качеством в пределах зоны автофокусировки.
10. Определено, что зоны автофокусировки вокруг наземного пункта приема космической бистатической РСА Р-диапазона достаточно для построения изображения в интересах различных потребителей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Женгуров, Б.Г. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой, паразитирующий на сигналах ТВ вещания / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. // Инфокоммуникационные технологии. - 2013. – Т.12. - №2. – С.13-22.
2. Женгуров, Б.Г. Радиолокатор с синтезированной апертурой паразитирующий на сигналах ТВ вещания / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. //Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева.–2014.– № 2—С.16-24.
3. Женгуров, Б.Г. Мобильный радиолокационный комплекс с синтезированной апертурой УКВ диапазона для дистанционного зондирования / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г., Курков, И.Г., Калимуллин, Р.Г., Мовчан, В.К., Хохлов, С.М //Инфокоммуникационные технологии.– 2015.– №4.
4. Женгуров, Б.Г. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой Р-диапазона для МКА «Аист—2» / Горячкин, О.В., Женгуров Б.Г., Бакеев, А.Б., Барабошин, А.Ю., Невский, А.В., Скоробогатов, Е.Г.// Электросвязь – 2015. –№ 8. – С.34-39.
5. Женгуров, Б.Г. Некоторые направления развития многопозиционных радиотехнических систем дистанционного зондирования Земли / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г.// Радиотехнические и телекоммуникационные системы – 2016. –№ 1. С.22-31.

Публикации в остальных изданиях:

6. Женгуров, Б.Г. Разработка алгоритма формирования радиолокационного изображения с РСА, паразитирующего на сигнале ТВ-вещания / Горячкин, О.В. , Женгуров, Б.Г // Физика и технические приложения волновых процессов: Труды XI МНТК / под общ. ред. Ю.Е. Мительмана. – Екатеринбург: Изд. Урал. ун-та, 2012. – 394с., С.64-65.
7. Женгуров, Б.Г. Бистатический радиолокатор с синтезированной апертурой, паразитирующий на сигналах ТВ –вещания / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г., Курков И.Г., Хохлов С.М. // Радиолокация, навигация, связь: сборник научных трудов XIX международной научной конференции, г. Воронеж, 16-18 апреля 2013. - Воронеж, 2013. - Т.3.- С. 1685-1696.
8. Женгуров, Б.Г. Некоторые направления развития многопозиционных радиотехнических систем дистанционного зондирования Земли / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. Курков, И.Г., Хохлов, С.М. //

Радиолокация, навигация, связь: сборник научных трудов XX международной научной конференции, г. Воронеж, 16-18 апреля 2014. - Воронеж, 2014. - Т.2.- С. 1014-1022.

9. Zhengurov, B.G. Bistatic SAR Based on TV-signal / Goriachkin, O.V., Borisenkov, A.V., Dolgoplov, V.N.// Proceedings of 10th European Conference on Synthetic Aperture Radar conference (EUSAR-2014), 3-5 June 2014, Berlin, Germany - P.335-338

10. Женгуров, Б.Г. Реализация бистатического РСА, паразитирующего на сигналах ТВ вещания / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г.// Материалы Российской научной Конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ: материалы XVIII РНТК. –Самара, 2011. –С.

11. Zhengurov, B.G. Bistatic P-band SAR for spacecraft AIST-2/ Goriachkin O.V., Borisenkov A.V., Dolgoplov V.N., Zhengurov B.G., Juravlev A.A., Kurkov I.G., Khohlov S.M.// Procedia Engineering. –, 2015.–Vol.104– P.2–4

12. Женгуров, Б.Г. Эксперимент по построению радиолокационного изображения в бистатическом радиолокаторе с синтезированной апертурой паразитирующим на ТВ-вещании / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. Курков, И.Г., Хохлов, С.М. // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций: материалы XIV МНТК.– Самара, 2013. – С.136-137

13. Женгуров, Б.Г. Радиолокационный комплекс Р-диапазона для малого космического аппарата / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. Курков, И.Г., Журавлев, А.А, Хохлов, С.М. // Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках: Тезисы докладов третьей международной конференции " Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках". Самара, 9-11 сентября 2014 г. - Самара, изд-во СНЦ РАН, 2014.- С.167-170.

14. Женгуров, Б.Г. Радиолокационный комплекс Р-диапазона для малого космического аппарата / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. Курков, И.Г., Журавлев, А.А, Калимуллин, Р.Г., Ткаченко, С.М., Степанов, С.В., Хохлов, С.М. // Российской научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов ПГУТИ: материалы XXII РНТК.– Самара, 2015. – С.

15. Zhengurov, B.G. Optimal signal processing in bistatic SAR / Goriachkin O.V., Zhengurov, B.G. // Systemics, cybernrtics and informatics: proceedings 19 WMSCI.– Orlando, 2015. – P.

16. Женгуров, Б.Г. Бистатический радиолокатор паразитирующий на сигналах от спутников ДЗЗ / Горячкин, О.В., Борисенков, А.В., Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г. Курков, И.Г., Хохлов, С.М. // Сборник материалов II Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космической техники (Козловские чтения)", 16-20 сентября 2013 г., г. Самара: под общей ред. А.Н.Кирилина / СамНЦ РАН - Самара, 2013, С.136-137

17. Женгуров, Б.Г. . Получение радиолокационного изображения в УКВ-диапазоне с радиолокатора, построенного по бистатической схеме / Борисенков А.В., Горячкин О.В., Долгополов В.Н., Женгуров, Б.Г., Курков И.Г., Хохлов С.М // Тезисы докладов XXI РНТК ППС ПГУТИ, 2014, С.1

18. Женгуров,Б.Г. Радиолокационный комплекс Р диапазона для малого космического аппарата / Борисенков, А.В., Горячкин. О.В., Дмитренко, В.И.,

Долгополов, В.Н., Женгуров, Б.Г., Журавлев, А.А., Курков, И.Г., Хохлов, С.М. // В сборнике Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов XII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А. Неганова. – Самара: «Самарское книжное издательство». – С.44-45.

19. Женгуров, Б.Г., Формирование радиоизображения местности по сигналам систем радиосвязи, радиовещания или телевидения / Горячкин, О.В., Женгуров, Б.Г., Курков, И.Г., Хохлов, С.М. // Проблемы техники и технологий телекоммуникаций ПТнТТ-2014: Материалы XII МНТК. – Т.1. Казань, 18-21 ноября 2014. – Казань: Изд-во Казанского гос. техн. ун-та, 2014. -448с., С.76-78.

20. Женгуров, Б.Г. Мобильный радиолокационный комплекс с синтезированной апертурой УКВ диапазона для дистанционного зондирования Земли / Борисенков, А.В., Горячкин, О.В., Женгуров, Б.Г., Курков, И.Г., Мовчан, В.К., Хохлов, С.М. // Радиолокация, навигация, связь: сборник научных трудов XXI международной научной конференции, г. Воронеж, 14-16 апреля 2015. - Воронеж, 2015. - Т.1.- С. 741-751.

21. Zhengurov, B.G. Bistatic P-band SAR for spacecraft AIST-2 / Borisenkov, A.V., Goriachkin, O.V., Dmitrenok, V.I., Dolgoplov, V.N., Zhengurov, B.G., Kurkov, I.G., Khohlov, S.M. // Procedia Engineering, Volume 104, Pages 2-8 (2015)

22. Женгуров, Б.Г. Моностатический радиолокационный комплекс Р диапазона для перспективного КА / Горячкин, О.В., Женгуров, Б.Г., Маслов, И.В. // Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции "Актуальные проблемы ракетно-космической техники (IV Козловские чтения)", 14-18 сентября 2015 г., г. Самара: под общей ред. А.Н.Кирилина / СамНЦ РАН - Самара, 2015, т.2, С.369-376.

23. Борисенков А.В., Горячкин О.В., Долгополов В.Н., Женгуров Б.Г., Курков И.Г., Калимуллин Р.Г., Хохлов С.М. Радиолокационный комплекс с синтезированной апертурой высокого разрешения в УКВ диапазоне частот // В сборнике Физика и технические приложения волновых процессов: Тезисы докладов XIII Международной научно-технической конференции: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / Под ред. В.А.Неганова, Г.А. Морозова. – Казань: ООО «Новое знание». – С.45-47.

24. Горячкин О.В., Борисенков А.В., Дмитренков В.И., Долгополов В.Н., Женгуров Б.Г., Курков И.Г., Хохлов С.М. Бистатический радиолокационный комплекс Р диапазона на МКА АИСТ-2Д // Тезисы докладов на Тринадцатой Всероссийской открытой конференции "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса"(CDROM), ИКИ РАН, Москва, 16-20 ноября 2015 г. – С.156.