

На правах рукописи



Булыгин Максим Леонидович

**Многолучевые режимы съемки  
в космических радиолокаторах  
с синтезированной апертурой**

Специальность:

05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Орлов Валерий Павлович**,  
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Бурый Алексей Сергеевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
директор департамента  
ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»

**Николаев Виктор Николаевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
НИЦ (г. Курск) ФГУП «18 ЦНИИ» МО РФ

Ведущая организация: Акционерное общество  
«Концерн радиостроения «Вега», г. Москва

Защита диссертации состоится «31» октября 2018 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте [https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT\\_ID=95627](https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=95627)

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.03,  
д.т.н.



М.И. Сычев

# ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## Актуальность исследований

Современные радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА) космического базирования реализуются в виде бортовых импульсных когерентных радиолокаторов бокового обзора, обеспечивающих получение и регистрацию радиолокационного сигнала, рассеянного наблюдаемым участком земной поверхности. Когерентная обработка сигналов, зарегистрированных на участке траектории движения космического аппарата – носителя РСА, методами квазиоптимальной фильтрации сигнала точечной цели, позволяет сформировать радиолокационные изображения (РЛИ) местности, по качеству приближающихся к оптическим.

Импульсный характер зондирующего сигнала и реализация квазиоптимальной обработки вызывает хорошо известный эффект неоднозначности, проявляющийся в наличии у функции импульсного отклика РСА (реакции РСА на одиночную точечную цель) помимо основного, побочных максимумов, удалённых от основного на значительные расстояния. Данный эффект приводит к появлению на РЛИ ложных отметок от наблюдаемых целей. В классических РСА эффект неоднозначности подавляется с помощью согласованного выбора режимов излучения РСА и параметров диаграммы направленности антенны радиолокатора.

Эффект неоднозначности в РСА космического базирования накладывает существенные ограничения на реализацию детальных режимов съёмки протяженных участков земной поверхности и проявляется в виде ложных образов от целей на РЛИ. Поэтому повышение пространственного разрешения при сохранении и/или увеличении размеров визируемого участка местности (полосы съёмки) с одновременным сохранением приемлемого уровня искажений РЛИ, вызванных эффектом неоднозначности, является одной из важнейших задач, решение которой позволит повысить эффективность применения радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования.

Одним из перспективных методов частичного снятия ограничений на параметры радиолокационного наблюдения, обусловленных эффектом неоднозначности, является применение в космических системах с РСА технологий цифрового формирования диаграммы направленности антенны радиолокатора, рассмотренных в работах зарубежных исследователей М. Younis, G. Krieger, A. Moreira, W. Wiesbeck, N. Gebert и др. Технический облик бортовой аппаратуры РСА, реализующей данные технологии, исследовался в работах А. Коваленко, С. Внотченко, В. Римана, S. Huber, F. Bordoni, A. Patyuchenko.

Среди возможных вариантов построения бортовой радиолокационной аппаратуры выделяются космические РСА, реализованные на базе цифровых активных фазированных антенных решёток (АФАР). Технология аналоговых АФАР в настоящее время реализована в ряде эксплуатируемых радиолокационных систем дистанционного зондирования Земли (Radarsat, TerraSAR-X, CosmoSkyMed, TanDem-X, Sentinel-1 и др.).

В цифровых АФАР каждый сегмент (субапертура) антенной решётки снабжён устройствами формирования и оцифровки радиолокационного сигнала. Такое построение РСА позволяет при приёме эхо-сигнала реализовать цифровое формирование многолучевой диаграммы направленности антенны, при котором выходные цифровые сигналы субапертур АФАР подвергаются процедуре многоканального когерентного суммирования. Выходная информация каждого канала соответствует одному из приёмных лучей антенны РСА. При этом облучение расширенной области радиолокационного наблюдения может проводиться разными способами; например, в качестве передающей антенны может использоваться отдельная антенна сокращённого размера, на вход которой подаётся сигнал от мощного передатчика, либо эти функции может выполнять один из сегментов АФАР. Альтернативным способом является облучение участка радиолокационного наблюдения с помощью полноразмерной апертуры антенны РСА.

За счёт реализации многолучевых режимов обзора земной поверхности РСА с цифровой АФАР позволяют существенно повысить информативность получаемых радиолокационных изображений, определяемой геометрическими размерами кадра и достижимой разрешающей способностью.

В настоящее время отсутствуют законченные исследования, посвященные анализу технологии, разработке и обоснованию алгоритмов реализации многолучевого радиолокационного визирования земной поверхности с помощью космических радиолокаторов, построенных на основе цифровых активных фазированных решёток, что указывает на актуальность рассматриваемых в диссертации задач.

**Целью диссертационной работы является** повышение информационных характеристик радиолокационной съемки и эффективности применения космических РСА с цифровой АФАР.

Для достижения поставленной цели в ходе диссертационного исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ архитектуры и технических характеристик исследуемой системы РСА с цифровой АФАР.
2. Разработать методику многолучевого визирования, обеспечивающую съемку во всей полосе обзора при облучении наблюдаемого участка земной поверхности с помощью полноразмерной апертуры АФАР.

3. Выявить и проанализировать факторы, влияющие на характеристики многолучевого радиолокационного визирования в РСА с цифровой АФАР.
4. Разработать алгоритм расчета периода повторения зондирующих сигналов, минимизирующий влияние эффекта неоднозначности в условиях многолучевого визирования.
5. Разработать методику многолучевого визирования и алгоритмы оценки параметров съемки, для улучшения характеристик визирования в сканирующем режиме съемки.
6. Разработать методику многолучевого прожекторного визирования и оценки параметров съемки, увеличивающие размеры визируемого участка местности при сохранении путевой разрешающей способности.
7. Оценить повышение эффективности применения космических РСА за счет внедрения в радиолокаторы режимов многолучевого визирования.

**Объектом исследования** является космическая система РСА с цифровой АФАР.

**Предметом исследования** являются многолучевые режимы съемки земной поверхности с частотным разделением каналов на передачу и цифровым формированием азимутальной многолучевой ДН на прием.

**Научная новизна:**

1. Разработана методика многолучевого визирования на основе алгоритмов пространственно-временного и частотного разделения зондирующих импульсов и цифрового формирования азимутальной ДН на прием, позволяющая увеличивать суммарное время синтеза апертуры в космических РСА с цифровой АФАР при сохранении коэффициента усиления излучающей системы.
2. Предложенный алгоритм оценки уровня межканальной неоднозначности позволяет минимизировать результирующий уровень неоднозначности при многолучевом визировании в РСА путем учета эффекта взаимного влияния антенных лучей при расчете параметров радиолокационного визирования.
3. Разработанный алгоритм расчета частотного портрета многолучевого визирования позволяет максимизировать реализуемое разрешение по горизонтальной дальности при заданных ограничениях на суммарный уровень неоднозначности.
4. Предложенные алгоритмы оценки влияния частотной дисперсии АФАР на геометрию радиолокационного визирования позволяют снижать влияние данного эффекта на качество многолучевого визирования с частотным разделением каналов обработки.

5. Разработанные алгоритмы расчета параметров качества радиолокационного визирования позволяют оценивать достижимые характеристики съемки в многолучевом сканирующем и многолучевом прожекторном режимах.

**Методы исследования.** Задачи проведенных исследований решены на основе методов теории радиолокационных сигналов, цифровой обработки сигналов, а также компьютерного имитационного моделирования с использованием пакета MATLAB.

**Практическая ценность работы** заключается в следующем:

1. Разработанная методика многолучевого визирования позволяет повышать эффективность применения космических систем РСА за счет сохранения коэффициента усиления излучающей системы и соблюдения приемлемого уровня влияния эффекта неоднозначности.
2. Разработанные режимы многолучевого визирования, позволяющие повышать пространственное разрешение и увеличивать размеры визируемого участка местности в различных режимах съемки, а также алгоритмы оценки параметров качества могут быть использованы при разработке перспективных систем РСА космического базирования.
3. Предложенные алгоритмы оценки влияния частотной дисперсии АФАР на геометрию радиолокационного визирования позволяют снижать влияние данного эффекта на качество съемки в системах РСА с частотным разделением каналов обработки.

**На защиту выносятся** следующие положения:

1. Методика многолучевого визирования, обеспечивающая увеличение суммарного времени синтеза апертуры в космических РСА примерно в 2...4 раза по сравнению с однолучевым визированием при одновременном подавлении влияния эффекта неоднозначности до уровня минус 20 дБ и сохранении коэффициента усиления излучающей системы.
2. Алгоритмы реализации режима многолучевой сканирующей съемки, обеспечивающей улучшение путевого разрешения в 2...3 раза по сравнению с однолучевым сканирующим режимом (ScanSAR) при сохранении поперечной протяженности полосы съемки.
3. Алгоритмы реализации режима многолучевой прожекторной съемки, обеспечивающей увеличение путевой протяженности визируемого участка местности в 4 раза по сравнению с однолучевым прожекторным режимом при сохранении путевого разрешения.

**Достоверность полученных научных результатов** обеспечивается корректностью постановки задачи исследования, применением адекватного математического аппарата с получением обширных расчетных данных и их совпадением с результатами имитационного моделирования.

## **Реализация и внедрение результатов диссертационной работы**

Результаты диссертационной работы реализованы в АО «НИИ ТП» в рамках проведения опытно-конструкторских работ по темам «Касатка», «Касатка-Макет», «Касатка-Р», «АФАР», посвященных созданию радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для космического комплекса «Обзор-Р».

**Апробация результатов.** Результаты диссертационной работы докладываюсь и обсуждались на следующих конференциях:

- Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2014» (2014);
- Юбилейная научно-техническая конференция, посвященная 70-летию головного предприятия и 10-летию ОАО «Концерн «Вега» (2014);
- 13-я, 14-я, 15-я, 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (2014-2017);
- Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015» (2015);
- Гагаринские чтения: XLII, XLIII и XLIV Международная молодёжная научная конференция (2016-2018);
- 11-ая и 12-ая Европейская конференция по радиолокаторам с синтезированной апертурой EUSAR (2016, 2018);
- Всероссийская научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». VII Всероссийские Армандовские чтения «Муром`2017».

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 5-ти статьях в журналах, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России к публикации результатов диссертационных исследований соискателям ученых степеней доктора и кандидата технических наук, а также в 10-ти печатных и 4-ёх электронных работах, включенных в сборники тезисов или докладов по результатам научных и научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 154 страницах, состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 97 наименований и приложения. Основной текст диссертации изложен на 147 машинописных страницах, включает 56 рисунков и 10 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность решения задачи разработки режимов многолучевого визирования с разнесением антенных лучей в горизонтальной плоскости; сформулированы цель и задача исследования, представлена научная новизна и практическая значимость работы, раскрыта структура диссертации.

**Первая глава** диссертации содержит обзор по материалам отечественных и зарубежных источников по системам дистанционного зондирования Земли, реализованных на основе космических радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Представлен анализ геометрии радиолокационного визирования в классических режимах съемки и пути расширения размеров визируемого участка местности за счет ухудшения разрешающей способности РСА вдоль траектории движения. Рассматриваются варианты построения космических РСА для реализации широкозахватных режимов съемки высокого разрешения в условиях влияния эффекта неоднозначности. Приведен анализ существующих подходов многоканальной обработки сигналов, обеспечивающих цифровое формирование диаграммы направленности в РСА на прием и позволяющих формировать многолучевые режимы съемки, снижающие влияние эффекта неоднозначности на характеристики РСА. Результаты проведенного анализа позволили сформулировать цель исследования и частные научные задачи.

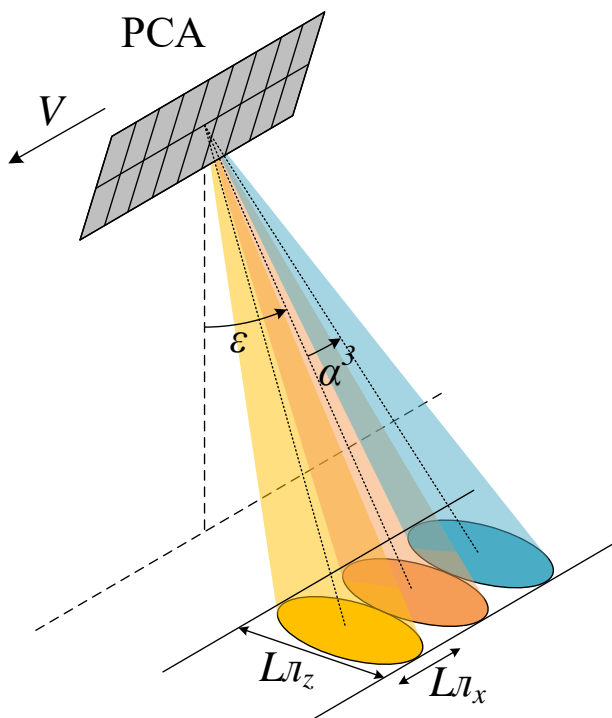


Рисунок 1 – Геометрия многолучевого визирования земной поверхности

**Вторая глава** посвящена рассмотрению принципов и особенностей реализации многолучевого визирования с разнесением антенных лучей в горизонтальной плоскости и частотным разделением каналов обработки в космическом РСА с цифровой активной фазированной антенной решеткой (АФАР).

Геометрия многолучевого визирования земной поверхности условно показана на рисунке 1, где обозначены:  $V$  – вектор скорости космического аппарата,  $\varepsilon$  – угол визирования,  $\alpha'$  – угол отклонения первого луча ДН по азимуту,  $L_x$  и  $L_z$  – размеры следа луча на



поверхности Земли, соответственно, вдоль и поперек траектории движения РСА. Улучшение информационных характеристик радиолокационного изображения (РЛИ) при многолучевом визировании достигается за счет последовательного облучения нескольких смежных участков земной поверхности субимпульсами, осуществляемое за один период излучения зондирующего сигнала, и регистрации эхо-сигналов многолучевой диаграммой направленности (ДН).

Последовательное облучение реализуется за счет разбиения зондирующего импульса на несколько субимпульсов с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), каждый из которых излучается на своей несущей частоте в своем азимутальном направлении.

Регистрация эхо-сигналов, приходящих относительно антенного полотна с различных угловых направлений по азимуту осуществляется путем параллельной многоканальной обработки, где в каждом из каналов ведется обработка эхо-сигнала отдельного приемного антенного луча. Смесь эхо-сигналов, принятых с различных азимутальных направлений, регистрируется аналоговым трактом и обрабатывается в цифровом виде независимо в каждом сегменте АФАР (цифровом радиолокационном модуле (ЦРМ)) (рисунок 2).

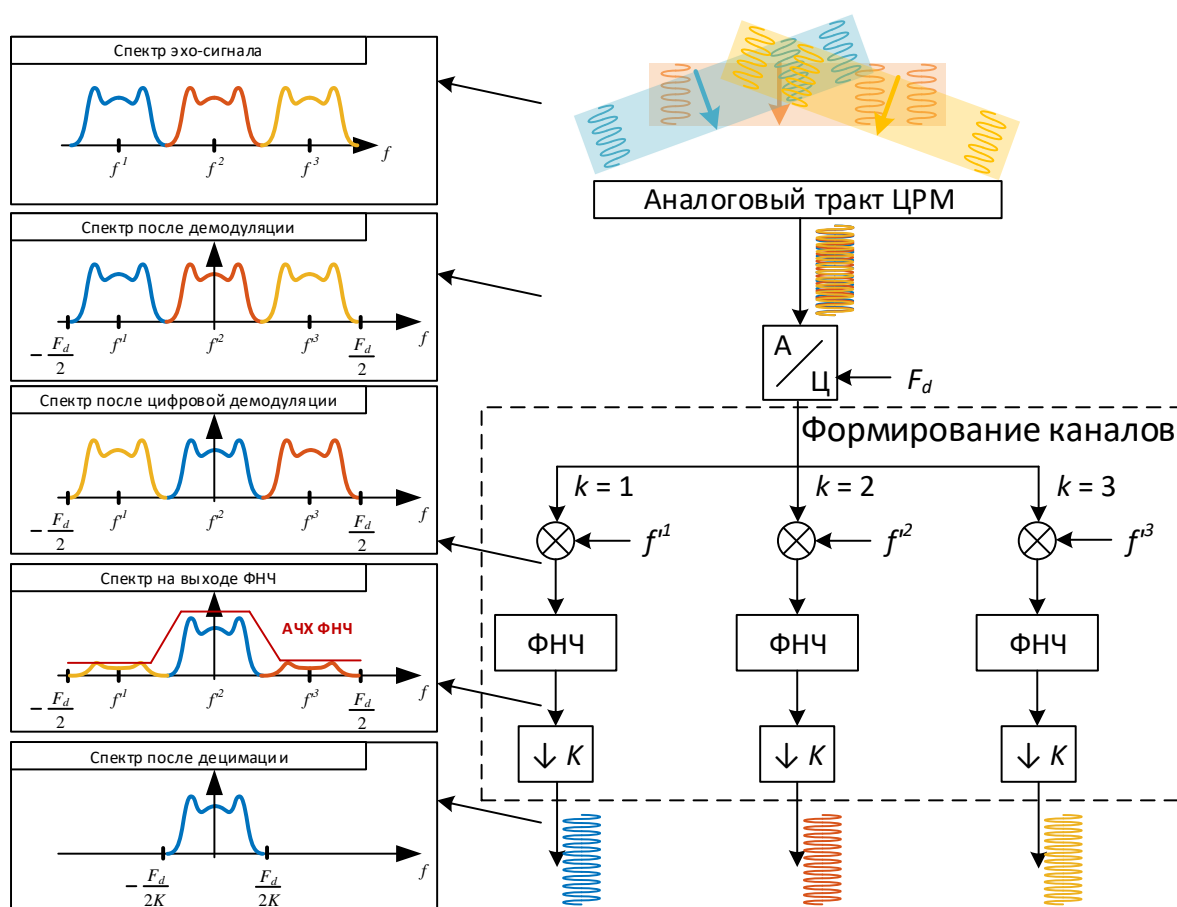


Рисунок 2 – Тракт обработки сигнала одного сегмента АФАР при формировании трех каналов обработки

На рисунке 2 введены следующие обозначения:  $f^k$  – несущая частота высокочастотного сигнала  $k$ -ого приемного луча, где  $k = 1 \dots K$ ,  $K$  – количество формируемых приемных антенных лучей,  $f^{*k}$  – несущая частота сигнала в  $k$ -ом канале обработки (после цифровой демодуляции),  $F_d$  – частота дискретизации сигналов.

Формирование многолучевой ДН в РСА обеспечивается за счет когерентного суммирования сигналов каждого канала обработки (соответствующего своему приемному антенному лучу) между сегментами АФАР (ЦРМ). При этом для создания линейного набега фаз по апертуре АФАР в горизонтальной плоскости (для отклонения каждого луча ДН на свой азимутальный угол) сигналы на выходе каждого сегмента домножаются на свой индивидуальный фазовый множитель. В результате многоканальной обработки на выходе РСА формируется многоканальная радиоголограмма (рисунок 3), где каждом канале сформирована радиоголограмма, полученная от своего антенного луча (своего участка земной поверхности). Данное сочетание пространственно-временного разделения зондирующих импульсов и многоканальной обработки эхо-сигналов с формированием цифровых лучей ДН на прием реализуют методику многолучевого визирования. На рисунке 3 введены следующие обозначения:  $\Delta\varphi_{r_x}^k$  – фазовый сдвиг, вводимый между элементами антенной решетки, для отклонения  $k$ -ого антенного луча по горизонтали,  $N_{эл_x}$  – количество элементов антенной решетки по горизонтали.

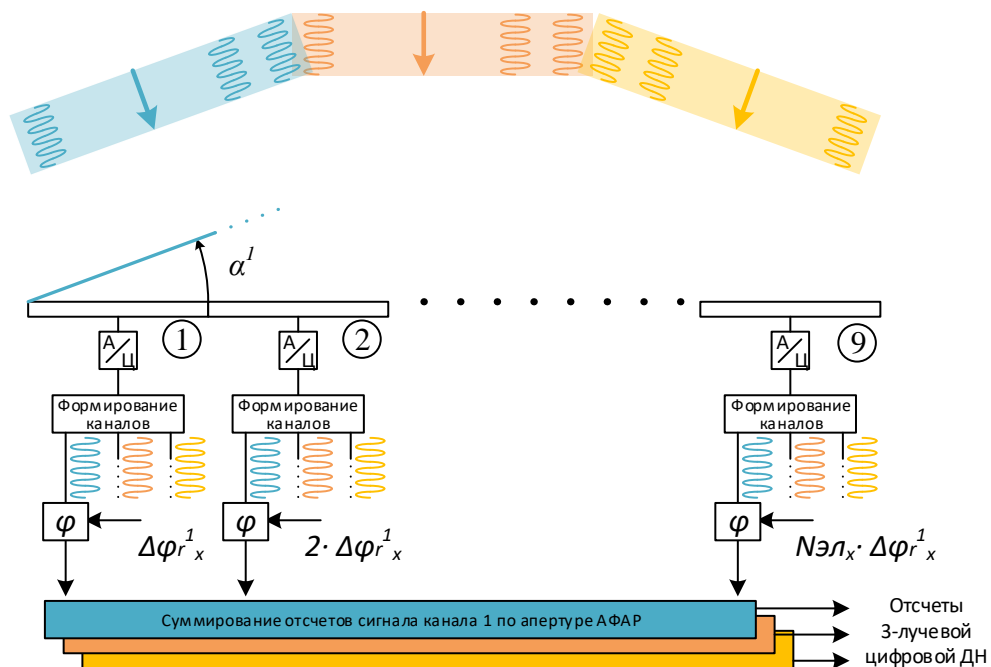


Рисунок 3 – Цифровое формирование многолучевой ДН

Разработанная методика многолучевого визирования имеет преимущества перед альтернативными способами формирования многолучевой съемки (разбиение полноразмерной апертуры на независимые приемо-передающие секции, технология сканирования на прием SCORE и др.) за счет использования при излучении и приеме сигналов полноразмерной апертуры, что обеспечивает сохранение коэффициента усиления излучающей системы при работе АФАР в режиме приёма/передачи. При этом проблема обеспечения качественного приема эхо-сигналов в условиях периодической структуры зондирующего сигнала (приводящая к возникновению эффекта неоднозначности и к появлению зон «слепых» дальностей и надирных отражений), решается применением алгоритма выбора периода зондирующего сигнала, разработанного для однолучевых РСА.

Однако при расчете энергетических характеристик визирования необходимо принимать во внимание потери, вызванные сокращением длительности зондирующего сигнала по сравнению с однолучевым визированием:

$$P_{loss} = \frac{\tau_{zu} - (K - 1) \cdot \Delta\tau_{cu}}{\tau_{zu} \cdot K}, \quad (1)$$

где  $\tau_{zu}$  – полная длительность зондирующего импульса,  $K$  – количество формируемых в цифровом виде лучей ДН,  $\Delta\tau_{cu}$  – временной интервал между субимпульсами.

Спецификой формирования многолучевой ДН по азимуту, является перекрытие соседних лучей ДН по уровню -3 дБ и выше при реализации многолучевых режимов съемки, что приводит к усугублению уровня доплеровской неоднозначности (образующейся в азимутальном направлении) в случае, когда зона неоднозначности луча 2 (рисунок 4) совпадает с направлением прихода интенсивного эхо-сигнала луча 1.

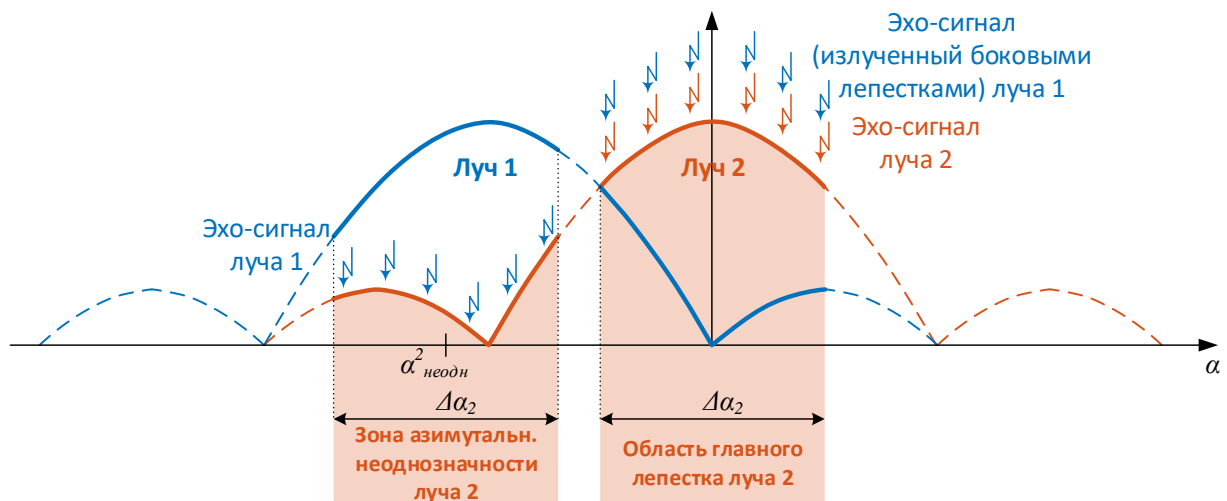


Рисунок 4 – Принцип образования межканальной неоднозначности

Уровень данной межканальной неоднозначности, в зависимости от величины периода повторения и азимутального углового интервала разнеса лучей ДН, варьируется в диапазоне от минус 5 до 3,5 дБ, что существенно превышает допустимый уровень неоднозначности минус 20 дБ, при котором достигается приемлемое качество РЛИ.

Частотное разделение каналов обработки позволяет снижать уровень межканальной неоднозначности за счет введения в приемный тракт каждого сегмента АФАР набора идентичных цифровых фильтров нижних частот (ФНЧ). Результирующий уровень доплеровской неоднозначности при многолучевом визировании, учитывающий, как «собственную» (внутриканальную) неоднозначность, так и межканальную, в данном случае определяется следующим соотношением:

$$A_x = \frac{A_{stop} \cdot L_{МК} + L_{неодн}}{A_{pass} \cdot L_{сигн}}, \quad (2)$$

где  $A_{pass}$  и  $A_{stop}$  – коэффициенты усиления ФНЧ, соответственно, в полосе пропускания и полосе подавления,  $L_{МК}$  – относительный уровень эхо-сигналов соседних лучей принимаемых рассматриваемым лучом ДН,  $L_{неодн}$  – относительный уровень «собственного» эхо-сигнала, принимаемый боковыми лепестками из областей доплеровской неоднозначности,  $L_{сигн}$  – относительный уровень «полезного» эхо-сигнала, регистрируемого областью главного максимума рассматриваемого луча ДН. Соотношения для вычисления указанных параметров представлены в диссертации.

Наличие у амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) цифрового ФНЧ переходной полосы (рисунок 5), приводит к необходимости введения защитных частотных интервалов между соседними парциальными спектрами, что в свою очередь ведет к ограничению максимально реализуемой разрешающей способности по горизонтальной дальности:

$$l_z \geq \frac{K \cdot c}{2 \cdot K_S \cdot \sin(\varepsilon) \cdot (\Delta F_{тракт} - (K - 1) \cdot \Delta F_{МК})}, \quad (3)$$

где  $K$  – количество формируемых антенных лучей,  $c$  – скорость распространения радиоволн,  $K_S$  – коэффициент сферичности Земли ( $K_S = 1 + H/R_3$ ,  $H$  – высота КА,  $R_3$  – радиус Земли),  $\varepsilon$  – угол визирования,  $\Delta F_{тракт}$  – полоса приемо-передающего тракта системы РСА,  $\Delta F_{МК}$  – выбранный в соответствии с переходной полосой ФНЧ частотный интервал между соседними парциальными спектрами.

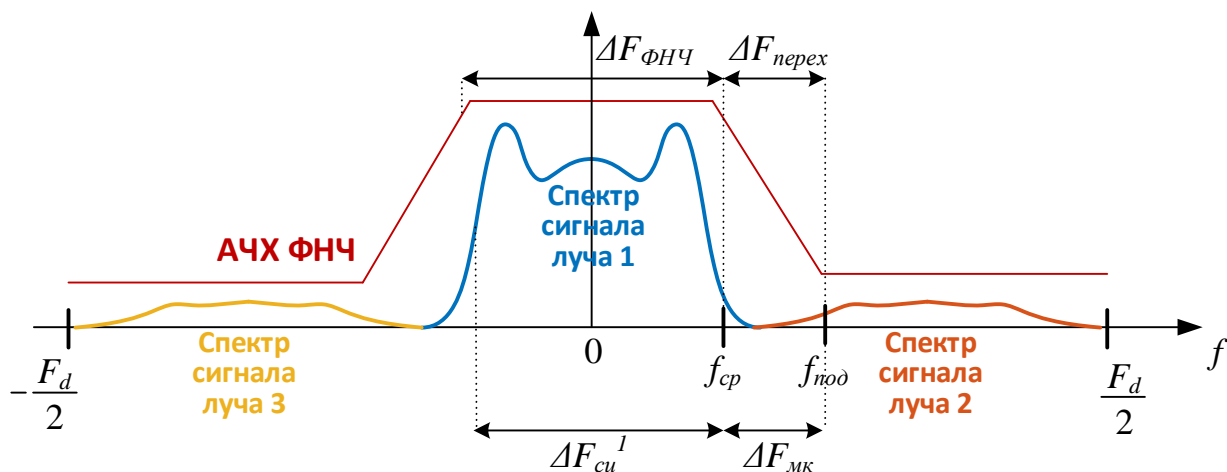


Рисунок 5 – Подавление спектров соседних каналов в цифровом ФНЧ

Представленные в диссертации алгоритм оценки уровня межканальной неоднозначности и алгоритм расчета частотного портрета многолучевого визирования позволяют достигать баланса между уровнем неоднозначности и разрешением по горизонтальной дальности.

Частотное разделение лучей в РСА приводит к дополнительным паразитным отклонениям лучей АФАР в вертикальной плоскости, поскольку отклонение многолучевой ДН по вертикали при приеме эхо-сигналов реализуется за счет введения соответствующего линейного фазового набега по апертуре АФАР. При этом положения фазовращателей каждого элемента антенной решетки по вертикали рассчитывается исходя из значения центральной частоты принимаемого эхо-сигнала. Однако применяемое частотное разделение эхо-сигналов исключает возможность корректной подстройки фазового распределения индивидуально для каждого приемного луча.

В рамках диссертационного исследования установлено, что данный эффект частотной зависимости углового положения лучей ДН по вертикали, именуемый в дальнейшем эффектом частотной дисперсии АФАР проявляется в виде дополнительных паразитных смещений следа ДН по поверхности Земли.

Истинное направление положения максимума луча ДН по вертикали определяется соотношением:

$$\theta_y^k = \frac{1}{2} \cdot \left( \arcsin \left( \frac{F_0}{f^k} \cdot \sin(\theta_{0y}) \right) + \theta_{0y} \right), \quad (4)$$

где  $F_0$  – центральная частота используемого частотного диапазона (в соответствии с которой рассчитывались положения фазовращателей АФАР по вертикали),  $f^k$  – несущая частота сигнала, принимаемого  $k$ -ым лучом,  $\theta_{0y}$  – заданное направление положения многолучевой ДН по вертикали.

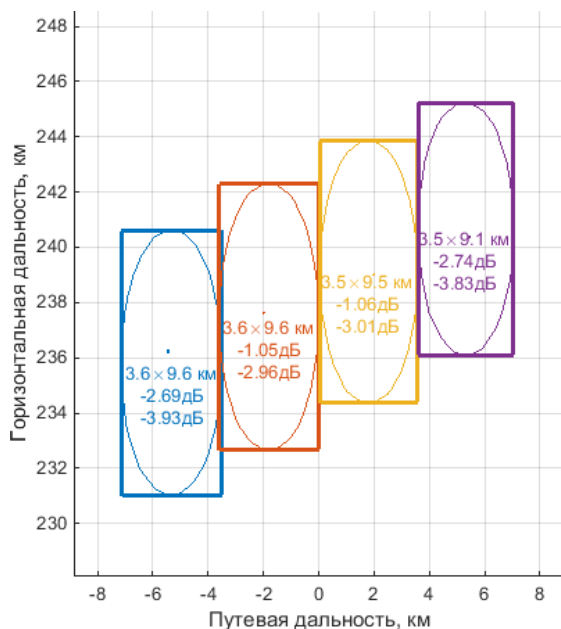


Рисунок 6 – Расположение кадров на поверхности Земли при визировании четырьмя антенными лучами ДН (синий – луч 1 (9367,5 МГц); оранжевый – луч 2 (9522,5 МГц); желтый – луч 3 (9677,5 МГц); фиолетовый – луч 4 (9832,5 МГц))

дисперсии АФАР на геометрические характеристики радиолокационного визирования. Проведённый анализ этого эффекта показывает, что существуют возможности снижения его влияния на характеристики многолучевого радиолокационного визирования, которые подробно рассмотрены в соответствующих параграфах диссертации.

В третьей главе решена задача разработки режимов многолучевого прожекторного и многолучевого сканирующего визирования, даны алгоритмы оценки достижимых характеристик визирования и управления бортовой аппаратурой РСА. Приведены алгоритмы компенсации влияния эффекта частотной дисперсии АФАР на качество радиолокационной съемки в данных режимах.

*Режим многолучевой сканирующей съемки* основывается на описанной комбинации многолучевого визирования и, получившей широкое распространение в современных РСА, технологии ScanSAR (рисунок 7).

В рассматриваемой системе РСА данное паразитное отклонение может достигать величины половины угловой ширины ДН по вертикали, что существенно искажает геометрические характеристики визирования. На рисунке 6 представлено геометрическое расположение кадров на поверхности Земли (в координатах путевая-горизонтальная дальность) при перекрытии азимутальных ДН по уровню минус 3 дБ; кадры расположены на ближнем краю полосы обзора (отклонение луча ДН по вертикали  $-15^\circ$ ).

Смещение следов лучей ДН на поверхности Земли в направлении горизонтальной дальности приводит к сужению результирующей полосы съемки.

Представленные в данной главе диссертации соотношения реализуют алгоритм оценки влияния частотной

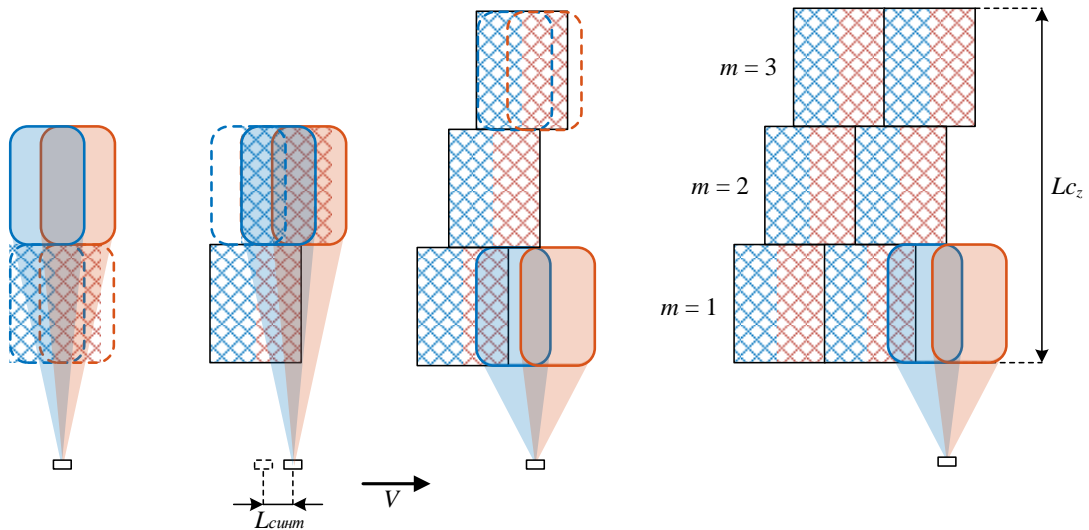


Рисунок 7 – Сканирование в  $M = 3$  парциальных полосах многолучевой ДН (при  $K = 2$ )

Данный режим съемки имеет специфику, заключающуюся в особых требованиях к горизонтальному перекрытию следов антенных лучей для обеспечения радиолокационного визирования без пропусков, что достигается путем согласования величины смещения следов лучей на поверхности Земли  $L_{с.м}$  в процессе синтеза и их горизонтального перекрытия  $L_{пер}$  с горизонтальным размером следа луча ДН на поверхности Земли  $L_{л_x}$  при заданном количестве лучей  $K$  и парциальных полос визирования  $M$ , и приводит к следующему соотношению для вычисления путевого разрешения:

$$l_x = l_{x_0} \cdot \left( \frac{M}{K} + 1 \right), \quad (5)$$

и алгоритму пространственной ориентации антенных лучей:

$$\alpha^k = \Delta\alpha \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{2 \cdot k - (K + 1)}{M + K}, \quad (6)$$

где  $l_{x_0}$  – разрешающая способность в классическом полосовом режиме съемки.

Рисунок 8 характеризует эффективность применения многолучевой сканирующей съемки в рассматриваемой системе РСА, выражающуюся реализуемым улучшением разрешения по путевой дальности  $l_x$  в зависимости от энергетических потерь  $P_{loss}^{-1}$ , вызванных сокращением длительности зондирующего субимпульса. Например, при использовании 3-4 антенных лучей достигается улучшение разрешения в 2-3 раза (в зависимости от количества парциальных полос визирования) при сохранении суммарной полосы съемки сканирующего режима.

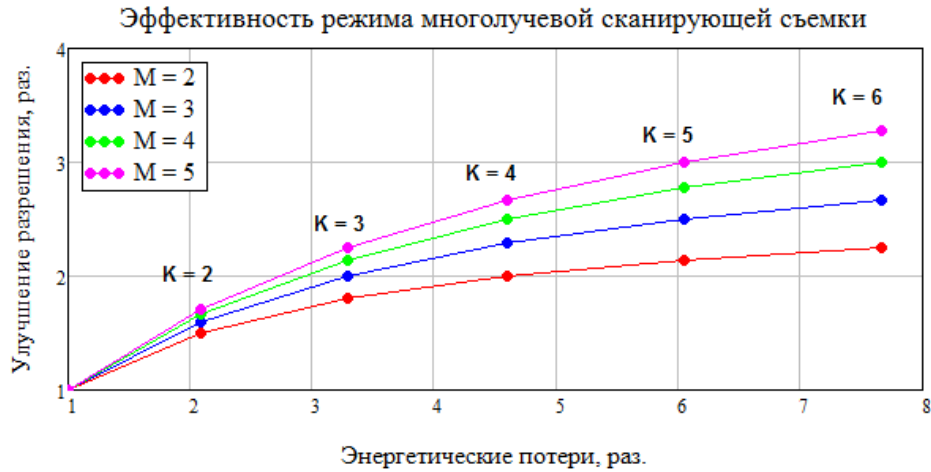


Рисунок 8 – Энергетические потери и реализуемое улучшение путевого разрешения в зависимости от количества используемых лучей ( $K = 1 \dots 6$ ) многолучевого сканирующего режима съемки при различном количестве парциальных полос  $M$

Эффект частотной дисперсии АФАР приводит к появлению пропусков местности при многолучевой сканирующей съемке, компенсация которых возможна одним из двух предложенных алгоритмов. Первый предполагает введение специального чередования номиналов поднесущих частот  $f^k$  всех  $K$  лучей при переключении на следующую парциальную полосу. Данный способ применим для визирования без пропусков только при соблюдении равенства количества используемых антенных лучей числу парциальных полос визирования, и не требует введения дополнительных отклонений лучей ДН по азимуту (в горизонтальной плоскости).

Второй алгоритм компенсации пропусков предполагает оперативное управление положением многолучевой ДН в горизонтальной (азимутальной) плоскости при перенацеливании лучей на последующую парциальную полосу. Для этого при визировании антенные лучи ориентируются по горизонтали в направлениях, определяемых следующим соотношением:

$$\alpha^k(m) = \Delta\alpha \cdot \left( \frac{M}{2} \cdot \frac{2 \cdot k - (K + 1)}{M + K} - \frac{K}{M + K} \cdot \left( m - \frac{M - 1}{2} \right) \right), \quad (7)$$

где  $\Delta\alpha$  – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости,  $M$  – количество парциальных полос визирования,  $k$  – номер антенного луча,  $k = 1 \dots K$ ,  $K$  – количество используемых антенных лучей,  $m$  – текущий номер парциальной полосы визирования,  $m = 1 \dots M$ .

Использование данного алгоритма оперативного управления положением многолучевой ДН задействует в 2-2,5 раза больший угловой сектор визирования  $\Delta\alpha_{виз}$  в горизонтальной плоскости, чем алгоритм частотного чередования, однако реализуем при произвольном количестве парциальных полос визирования  $M$  и количестве антенных лучей  $K$ .



Режим многолучевой прожекторной съемки реализуется за счет комбинации классической составной прожекторной съемки и методики многолучевого визирования путем последовательного визирования смежных участков

земной поверхности поочередно несколькими антенными лучами (рисунок 9). На рисунке 9 введены следующие обозначения:  $Lc_x$  и  $Lc_z$  – протяженность визируемого участка местности, соответственно, вдоль и поперек траектории движения РСА,  $n_k = 1...N_k$  – порядковый номер визируемого парциального кадра,  $N_k$  – суммарное количество визируемых кадров,  $\Delta\alpha_{синт}$  – угловой интервал синтеза апертуры,  $\Delta\alpha_{перекл}$  – угловой интервал в котором осуществляется перенацеливание луча ДН для визирования последующего парциального кадра,  $\alpha(n_k)$  – начальное отклонение луча ДН по азимуту при визировании  $n_k$ -ого парциального кадра.

На рисунке 10 представлена количественная оценка увеличения протяженности суммарного кадра в режиме многолучевой прожекторной съемки как предельно реализуемое путевое разрешение в данном режиме для рассматриваемой системы РСА в зависимости от количества последовательно визируемых парциальных кадров. Например, при использовании  $K = 2$  антенных лучей достигается увеличение протяженности в 4 раза (по сравнению с однолучевой составной прожекторной съемкой) до  $N_k = 12$  парциальных кадров при энергетических потерях, вызванных сокращением длительности зондирующего сигнала, в 2,1 раза.

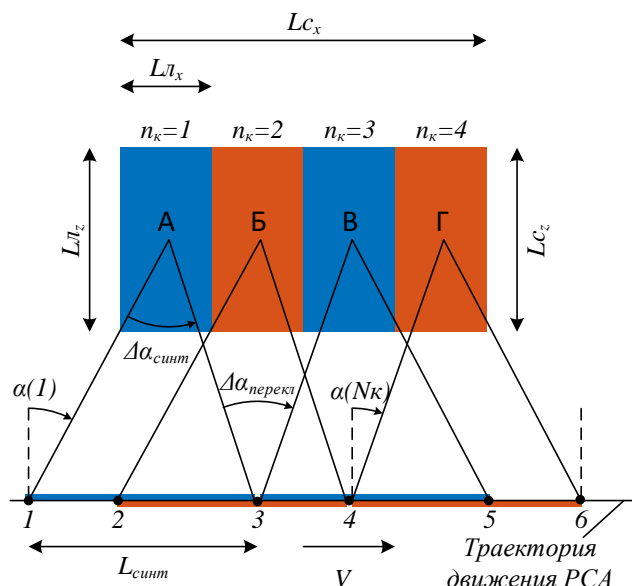


Рисунок 9 – Режим многолучевой прожекторной съемки при количестве антенных лучей  $K = 2$  и количестве парциальных кадров  $N_k = 4$

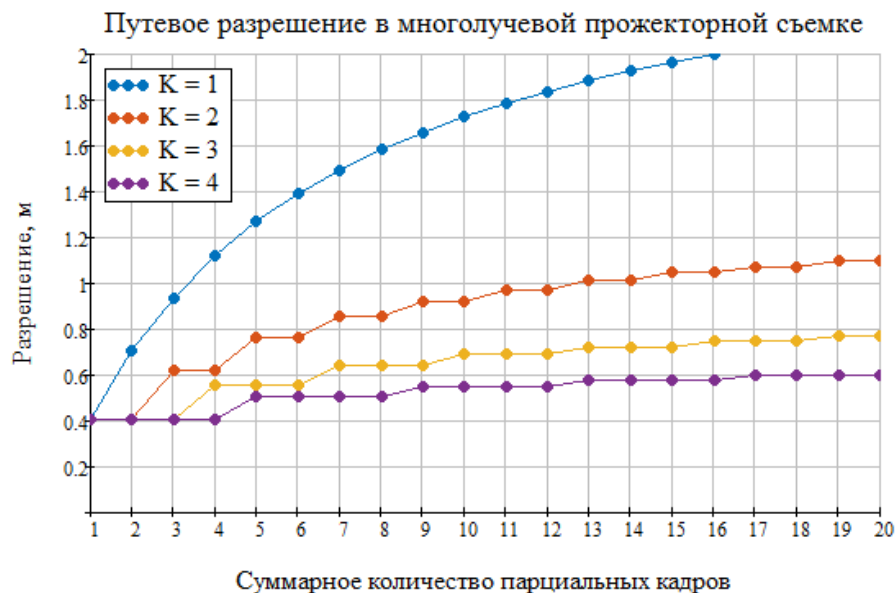


Рисунок 10 – Реализуемое путевое разрешение в режиме многолучевой прожекторной съемки в зависимости от суммарного количества формируемых парциальных кадров  $N_k$  при различном количестве антенных лучей  $K$  и использовании полного азимутально сектора визирования  $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2$ .

Эффект частотной дисперсии АФАР приводит к смещению парциальных кадров друг относительно друга в направлении горизонтальной дальности и в конечном счете к сужению результирующей полосы съемки многолучевого прожекторного режима. Для всесторонней оценки эффективности

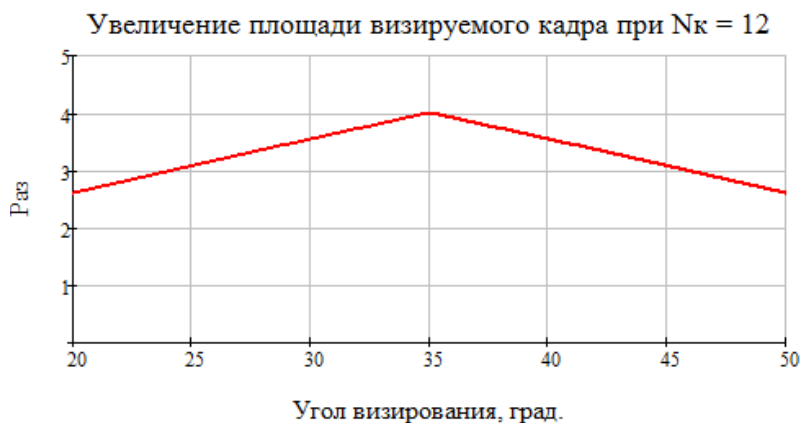


Рисунок 11 – Увеличение площади визируемого кадра формируемого в многолучевом прожекторном режиме при визировании  $K = 2$  антенными лучами (энергетические потери 2,1 раза)  $N_k = 12$  кадров по сравнению с составным однолучевым прожекторным режимом съемки при визировании  $N_k = 3$  парциальных кадров с разрешением  $l_x = 1$  м

многолучевого визирования достижимое увеличение размеров визируемого участка местности с учетом эффекта частотной дисперсии АФАР выражается в виде зависимости реализуемого увеличения суммарной площади формируемого составного кадра в многолучевом прожекторном режиме по сравнению с классическим однолучевым визированием (рисунок 11). В данном примере наблюдение двумя антенными лучами ( $K = 2$ ) при сохранении разрешения

в 1 метр позволяет увеличить площадь формируемого составного кадра в 2,6...3 раза в зависимости от угла визирования.

Для расширения размеров реализуемого кадра по горизонтальной дальности в многолучевом прожекторном режиме возможно провести, например, два наблюдения, аналогичных рассмотренному ранее режиму, в двух парциальных полосах. Наблюдение в нескольких парциальных полосах формирует *расширенный многолучевой прожекторный режим съемки*. Конфигурация парциальных кадров в данном режиме съемки схожа с режимом многолучевой сканирующей съемки, однако при небольшом числе парциальных кадров достижимое разрешение выше. Например, в режиме расширенной многолучевой прожекторной съемки при визировании  $K = 2$  антенными лучами  $N_k = 8$  кадров в каждой из  $M = 2$  парциальных полосах достигается разрешение 2 м – что в 2,65 раза лучше, чем в аналогичной многолучевой сканирующей съемке. Однако проведенное сравнение данных режимов показывает, что при формировании протяженного вдоль траектории составного кадра (в несколько тысяч километров) режим многолучевой сканирующей съемки будет реализовывать наилучшее разрешение.

Разработанные алгоритмы реализации многолучевых режимов съемки РСА в сочетании с методиками оценки характеристик получаемых радиолокационных изображений позволяют осуществлять системное проектирование космических РСА с цифровым формированием многолучевой ДН в горизонтальной плоскости и частотным разделением антенных лучей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию алгоритмов многолучевого визирования Земной поверхности в космических РСА с цифровой АФАР, реализуемых за счет принципов пространственно-временного разделения зондирующих импульсов и многоканальной обработкой эхо-сигналов с формированием цифровых ДН на прием. В результате получены следующие основные результаты:

1. Предложены алгоритмы пространственно-временного разделения зондирующих импульсов и многоканальной обработки эхо-сигналов на прием с цифровым формированием азимутальной ДН на прием в РСА космического базирования, позволяющие формировать многолучевые режимы визирования, отличающиеся тем, что используют для излучения и приема сигналов полноразмерную апертуру, сохраняющую коэффициент усиления излучающей системы РСА.
2. Предложены алгоритмы оценки уровня межканальной неоднозначности и ее подавления в приемном тракте каждого из каналов обработки при

многолучевом визировании в РСА за счет ведения низкочастотной фильтрации и применения алгоритма выбора рабочего периода повторений.

3. Проанализировано влияние эффекта частотной дисперсии АФАР на конфигурацию многолучевой приемо-передающей ДН с частотным разделением лучей и предложены алгоритмы оценки характеристик радиолокационного визирования с учетом данного эффекта.
4. Показана возможность реализации предложенного алгоритма многолучевого визирования во всей полосе обзора в условиях периодической структуры зондирующего сигнала, приводящего к появлению зон «слепых» дальностей и надирных отражений.
5. Разработан режим многолучевого сканирующего визирования, отличающийся улучшением путевой разрешающей способности в 2...3 раза в обзорных режимах съемки при визировании 4 антенными лучами.
6. Предложены алгоритмы компенсации влияния эффекта частотной дисперсии АФАР, приводящего к пропускам при многолучевом сканирующем визировании с частотным разделением лучей и сокращении поперечной протяженности полосы съемки.
7. Разработан режим многолучевой прожекторной съемки, реализующий увеличение путевой протяженности составного кадра в 2...4 раза при сохранении путевого разрешения 0,5...1,0 м за счет визирования 2-мя антенными лучами, по сравнению с однолучевым визированием.
8. Разработан режим расширенной многолучевой прожекторной съемки, позволяющий увеличивать одновременно путевую и поперечную протяженность составного кадра суммарно в 4 раза при использовании 3-ех антенных лучей и ухудшении разрешения до 1,5 м, по сравнению с однолучевым визированием.
9. Разработана имитационная модель исследуемого РСА, позволяющая проводить оценку характеристик многолучевого визирования и проверять корректность разработанных алгоритмов съемки путем контроля целостности формируемого составного кадра на поверхности Земли в условиях влияния эффекта частотной дисперсии АФАР.
10. Предложена методика системного проектирования космических РСА в составе разработанных алгоритмов для реализации в РСА многолучевых режимов съемки с пространственно-временным разделением зондирующих импульсов и цифровым формированием многолучевой ДН по горизонтали на прием, позволяющих повысить эффективность применения РСА космического базирования.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России к публикации результатов диссертационных исследований соискателям ученых степеней доктора и кандидата технических наук:

1. **Булыгин М. Л., Муллов К. Д.** Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой [Электронный ресурс] // *Труды МАИ.* – 2015. – № 80 (26.03.2015). – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57040>.
2. **Булыгин М. Л., Внотченко С. Л., Коваленко А. И., Риман В. В.** Режим многоканальной съемки в многоапертурном космическом радиолокаторе с синтезированной апертурой // *Успехи современной радиоэлектроники.* – 2015. – №5. – сс. 20-26.
3. **Булыгин М. Л., Внотченко С. Л.** Построение диаграмм слепых дальностей и надирных отражений радиолокатора с синтезированной апертурой в MATLAB [Электронный ресурс] // *Труды МАИ.* – 2015. – № 83 (05.10.2015). – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=62290>.
4. **Булыгин М. Л., Маркова А. С., Муллов К. Д.** Реализация режима многоканальной сканирующей съемки в радиолокаторе космического базирования [Электронный ресурс] // *Труды МАИ.* – 2018. – № 98 (15.03.2018). – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90438>.
5. **Булыгин М. Л.** Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических РСА на базе АФАР. [Электронный ресурс] // *Труды МАИ.* – 2018. – № 100 (25.06.2018). – Режим доступа: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93428>.

Тезисы и доклады на конференциях:

6. **Булыгин М. Л.** Режим многоканальной съемки земной поверхности для космической системы РСА // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтика – 2014». 22-24 апреля 2014 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – 2014. – сс 140-141.
7. **Булыгин М. Л.** Реализация алгоритма расчета периода повторения зондирующего сигнала РСА в условиях взаимного распределения помех / Булыгин М.Л. // 13-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2014». 17–21 ноября 2014 года. Москва. Тезисы. – 2014. – сс. 366-367.

8. **Булыгин М. Л., Муллов К. Д.** Реализация формирователя зондирующего сигнала для РСА на ПЛИС // Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». 21–23 апреля 2015 года. Москва. Сборник тезисов докладов. – 2015. сс. 108-109.
9. **Булыгин М. Л.** Аналитический подход к построению диаграмм помех слепых дальностей и надирных отражений для космических РСА // 14-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2015». 16–20 ноября 2015 года. Москва. Тезисы. – 2015. – сс. 232-233.
10. **Булыгин М. Л.** Использование сферической модели земли при расчёте высокодетальных режимов съёмки в космических РСА / Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: В 4 т. Том 1. – 2016. – сс. 576-577.
11. **Bulygin M., Kovalenko A., Riman V., Vnotchenko S.** Multi-channel modes implementation in spaceborne SAR with digital active electronically scanned array // Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016. – pp. 315-318.
12. **Булыгин М. Л.** Реализация режима маршрутной многоканальной съёмки в космических РСА / 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14–18 ноября 2016 года. Москва. Тезисы. – 2016. – сс. 96-97.
13. **Булыгин М. Л.** Аппаратно-программный комплекс контроля параметров зондирующего сигнала в бортовой аппаратуре РСА // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). – 2017. – сс. 601-602.
14. **Милосердов М. С., Кузнецов Г. Ю., Коваленко А. И., Булыгин М. Л.** Сквозная технология наземной отработки АФАР космического РСА // VII Всероссийские Армандовские чтения [Электронный ресурс]: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн / Материалы Всероссийской научной конференции.–Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2017. – 465 с. ISSN 2304-0297 (CD-ROM).
15. **Булыгин М. Л.** Реализация режима многоканальной прожекторной съёмки в космических РСА // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 20–24 ноября 2017 года. Москва. Тезисы. – 2017. – сс. 206-207.

16. **Булыгин М. Л., Маркова А. С., Муллов К. Д.** Реализация режима многоканальной сканирующей съемки в радиолокаторе космического базирования // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 20–24 ноября 2017 года. Москва. Тезисы. – 2017. – сс. 232-233.
17. **Булыгин М. Л.** Эффект смещения следов лучей ДН на поверхности Земли в многоканальных режимах съемки космических РСА // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов. Том 3: М.: Моск. авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2018. – сс 50-51.
18. **Bulygin M., Dudukin V., Kovalenko A., Riman V., Shishanov A., Vnotchenko S.** SAR mode for extended area with an arbitrary orientation // Proceedings of EUSAR 2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 1108-1111.
19. **Bulygin M., Baranov A., Chechina I., Kovalenko A., Riman V., Vnotchenko S.** Digital radar module for digital AESA of spaceborne SAR // Proceedings of EUSAR 2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 79-82.

**Булыгин Максим Леонидович**

**Многолучевые режимы съемки  
в космических радиолокаторах  
с синтезированной апертурой  
АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.08.2018.

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,37. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 100 экз.

---

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ  
(национальный исследовательский университет)»**  
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., 4  
Тел. +7 499 158-43-33, 158-58-70, 158-00-02