ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

На правах рукописи

Булыгин Максим Леонидович

МНОГОЛУЧЕВЫЕ РЕЖИМЫ СЪЕМКИ В КОСМИЧЕСКИХ РАДИОЛОКАТОРАХ С СИНТЕЗИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ

Специальность:
05.12.14 – «Радиолокация и радионавигация»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
Кандидат технических наук
Орлов Валерий Павлович

Москва – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ 2
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ 4
ВВЕДЕНИЕ 5
ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ВИЗИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ 14
1.1 Радиолокационный мониторинг земной поверхности 14
1.2 Анализ геометрии визирования РСА 25
1.3 Расширенные режимы съемки земной поверхности в РСА 34
1.4 Технологии многоканального визирования и цифрового формирования ДН на прием в РСА 40
1.5 Постановка задачи исследования 45
1.6 Выводы по главе 47
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ С РАЗНЕСЕНИЕМ АНТЕННЫХ ЛУЧЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ . 48
2.1 Краткий анализ РСА с цифровой активной фазированной антенной решеткой 48
2.2 Пространственно-временное разделение зондирующих импульсов 54
2.3 Многоканальная обработка эхо-сигнала с цифровым формированием лучей ДН на прием в горизонтальной плоскости 57
2.4 Анализ техники многолучевого приема сигнала в РСА 61
2.5 Оценка уровня межканальной неоднозначности 64
2.6 Анализ аналогового тракта АФАР при многолучевом визировании 75
2.7 Выбор рабочего периода повторения зондирующих импульсов 82
2.8 Выводы по главе 88
ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ РЕЖИМОВ СЪЕМКИ 91
3.1 Режим многолучевой сканирующей съемки 91
3.1.1 Алгоритмы расчета параметров качества многолучевого сканирующего визирования 91

3.1.2 Влияние эффекта частотной дисперсии АФАР в режиме многолучевой сканирующей съемки 98
3.2 Многолучевой прожекторный режим съемки 105
3.2.1 Алгоритмы расчета параметров качества многолучевого прожекторного визирования 105
3.2.2 Влияние эффекта частотной дисперсии АФАР в режиме многолучевой прожекторной съемки 113
3.3 Расширенный многолучевой прожекторный режим съемки 116
3.4 Сравнительный анализ многолучевых режимов съемки с разнесением антенных лучей в горизонтальной плоскости 124
3.5 Выводы по главе 131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 133
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ 135
ПРИЛОЖЕНИЕ 148
Приложение А. Имитационная модель РСА 148

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АФАР – активная фазированная антенная решетка

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли

ДН – диаграмма направленности

КА – космический аппарат

ЛЧМ – линейная частотная модуляция

МФОС – модуль формирования и оцифровки сигналов

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

ППУ – приемо-передающее устройство

ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина

РГГ – радиоголограмма

РЛИ – радиолокационное изображение

РЛС – радиолокационная станция

РСА – радиолокатор с синтезированной апертурой

ФНЧ – фильтр нижних частот

ЦРМ – цифровой радиолокационный модуль

ВВЕДЕНИЕ

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 [39, 41] в РСА космического базирования накладывает существенные ограничения на реализацию детальных режимов съемки 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 [55-59, 62-64]. Технический облик бортовой аппаратуры РСА, реализующей данные технологии, исследовался в работах [15-16, 65-72].

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 [60, 70], 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.

В первой главе диссертации содержится аналитический обзор материалов отечественных и зарубежных источников по тематике радиолокационного мониторинга Земли из космоса, представлен обзор ряда современных РСА космического базирования и обоснована актуальность исследований в главных направлениях совершенствования аппаратуры РСА. Введены определения основных используемых параметров радиолокаторов с синтезированной апертурой, кратко изложены основные алгоритмы съемки земной поверхности, особое внимание уделено проблеме неоднозначности в РСА. Представлен анализ существующих алгоритмов многоканальной обработки сигналов с формированием цифровой многолучевой ДН на прием, позволяющих снизить влияние эффекта неоднозначности на характеристики РСА. Выявлены

достоинства и недостатки данных алгоритмов съемки, сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе диссертации рассматриваются особенности реализации пространственно-временного разделения зондирующих импульсов, реализуемое в исследуемом РСА за счет разделения зондирующих субимпульсов по времени и азимутальному направлению излучения, а также алгоритмы многоканальной обработки эхо-сигналов с цифровым формированием ДН на прием с частотным разделением лучей, реализующие в совокупности, многолучевое радиолокационное визирование земной поверхности. Представлена оценка уровня межканальной неоднозначности и способов её ослабления за счет низкочастотной фильтрации и применения специального алгоритма поиска рабочего периода повторения. Особое внимание уделено анализу эффекта частотной дисперсии АФАР при приёме эхо-сигналов, приводящей к смещению антенных лучей по вертикали от заданного углового направления, за счет чего сокращается реализуемая полоса съемки. Показана возможность реализации многолучевого визирования с цифровым формированием азимутальной ДН на прием во всей полосе обзора с учетом импульсной структуры зондирующего сигнала с сохранением коэффициента усиления излучающей системы АФАР.

В третьей главе диссертации представлены алгоритмы многолучевого визирования, позволяющие повышать эффективность применения РСА космического базирования. Разработан алгоритм многолучевой сканирующей съемки для повышения характеристик визирования в обзорных режимах с использованием технологии ScanSAR, позволяющий улучшить разрешение в 2,3…2,7 раза при использовании, соответственно, 3-4 антенных лучей.

Рассмотрено влияние эффекта частотной дисперсии АФАР на характеристики многолучевого сканирующего визирования и представлены два алгоритма компенсации пропусков при съемке, вызванные данным эффектом. Первый представляет собой специальный алгоритм чередования номиналов частот, используемых приемопередающими лучами, которое производится при переключении на следующую парциальную полосу. Второй реализуется за счет

введения дополнительного азимутального смещения многолучевой ДН, величина которого зависит от порядкового номера визируемой парциальной полосы.

Разработаны алгоритмы многолучевого прожекторного и расширенного многолучевого прожекторного режимов съемки, позволяющие многократно увеличивать путевую и поперечную протяженность составного кадра радиолокационного изображения (РЛИ) при сохранении высокого пространственного разрешения. В частности, при использовании 2 антенных лучей достигается четырехкратное увеличение протяженности визируемого участка местности вдоль траектории движения РСА при сохранении разрешения в 1 м, по сравнению с режимом составной прожекторной съемки, в котором осуществляется последовательное визирование трех смежных участков земной поверхности классической (однолучевой) прожекторной съемкой.

Представлена сравнительная характеристика многолучевых режимов съемки, позволяющая в сочетании с изложенными алгоритмами реализации параметров визирования, осуществлять системное проектирование космических РСА с повышенными показателями эффективности.

ГЛАВА 1 ОБЗОР МЕТОДОВ ВЫСОКОДЕТАЛЬНОГО РАДИОЛОКАЦИОННОГО ВИЗИРОВАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

1.1 Радиолокационный мониторинг земной поверхности

Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) космического базирования являются эффективным средством получения оперативной информации о состоянии земной поверхности и объектах на ней в глобальных и региональных масштабах [1].

Научные и технические основы для реализации радиолокационных систем ДЗЗ заложены в середине XX века. Самолетные радиолокационные станции (РЛС) панорамного обзора использовались для обнаружения наземных объектов еще со времен Второй мировой войны. В отличие от большинства других разведывательных средств они обеспечивают всепогодное наблюдение земной поверхности и объектов в любое время суток. Однако вследствие низкой угловой разрешающей способности такие РЛС не позволяли получать детальные радиолокационные изображения (РЛИ), необходимые для воздушной разведки [2].

Совершенствование аппаратуры и переход от панорамных РЛС к радиолокаторам бокового обзора с улучшенным разрешением по азимуту и с применением принципа радиолокационного синтезирования апертуры (РСА) способствовало развитию нового направления радиолокации – землеобзора [1].

С освоением космоса начали зарождаться проекты по созданию радиолокационных систем землеобзора космического базирования. За счет существенно большей высоты полета космического аппарата (КА), по сравнению с атмосферными летательными аппаратами, достигается большая полоса обзора космических РСА, а при выборе орбиты КА с наклонением около 90 градусов достигается охват всей поверхности Земного шара [3].

Первой гражданской системой РСА космического базирования стала радиолокационная система Seasat-A (разработка JPL, США), выведенная на

орбиту высотой 800 км 26 июня 1978 года для задач исследования Мирового океана.

РСА Seasat-A был оснащен волноводно-щелевой антенной L-диапазона (рабочая частота 1275 МГц) размером апертуры 10,74 × 2,16 м. В качестве зондирующего сигнала использовался импульсный сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с полосой до 19 МГц, поляризация сигналов – горизонтальная. Такие характеристики антенной системы радиолокатора позволяли реализовывать режим полосовой съемки с полосой захвата 100 км, разрешением по путевой дальности 40 м и по горизонтальной дальности 25 м, протяженность полосы съемки превышала 4000 км [4]. Синтез радиолокационного изображения производился при помощи специальной оптической обработки радиоголограммы [1].

Разработка и запуск системы Seasat-A являлись важными этапом развития космических систем РСА, поскольку данная радиолокационная система была предшественником серии систем РСА, которые должны были быть отправлены в космос в последующие годы [4].

Развитие антенной техники и микроэлектроники, введение цифровой обработки сигналов в радиолокаторах и непосредственно в антенных решетках, переход от аналоговой обработки радиоголограммы к методам с использованием цифровых процессоров способствовали совершенствованию космических радиолокационных систем ДЗЗ космического базирования. Современные космические РСА способны решать широкий круг задач в областях картографии, военной разведки, мониторинга районов чрезвычайных ситуаций, геологии и гидрологии, хозяйственной деятельности и в других областях науки и техники [5].

Для нужд космических средств ДЗЗ в настоящий момент в Международном регламенте радиосвязи предусмотрены несколько частотных диапазонов. В таблице 1.1 содержится основные сведения о частотных диапазонах и особенностях их применения в РСА [1, 51].

Таблица 1.1 – Диапазоны частот для космических РСА

Условное обозна-чение	Диапазон частот, МГц	Диапазон длин волн, см	Области применения и исследований
P	432…438	69,40…68,45	Биомасса, подповерхностная радиолокация
P	440…460	68,14…65,17	
L	1215…1300	24,67…23,06	Растительный покров, подстилающая поверхность
S	3100…3300	9,67…9,08	Подстилающая поверхность
C	5250…5570	5,71…5,38	Сельское хозяйство, водная поверхность
X	8025…8650	3,74…3,47	Сельское хозяйство, водная поверхность, высокодетальное картографирование
X	9300…9900	3,22…3,03	
Ku	13400…13750	2,24…2,18	Картографирование снежного покрова
Ku	13750…14000	2,18…2,14	

Помимо выбора частотного диапазона, огромное значение для получения информации о визируемом участке земной поверхности имеет также выбор поляризации сигналов. В современных РСА реализуется возможность функционирования с сигналами двух ортогональных поляризаций – вертикальной (В) и горизонтальной (Г). Различные сочетания поляризаций сигналов на излучение и прием (ВВ, ГГ, ВГ, ГВ) позволяют реализовать поляриметрические измерения, используемые для более точного определения характеристик подстилающей поверхности [6, 7].

Высокая эффективность решения задач землеобзора с помощью РСА космического базирования привела к появлению множества таких систем различного назначения.

В 2009 году в составе КА «Метеор-М» был запущен малогабаритный бортовой радиолокационный комплекс «Северянин-М» [8], разработанный АО «НИИ ТП». РСА «Северянин-М» предназначен для решения задач гидрометеорологии и мониторинга ледовой обстановки. В 2014 году в составе КА «Метеор-М» №2 на орбиту выведен аналогичный РСА.

Антенна РСА «Северянин-М» выполнена на основе волноводно-щелевой решетки и способна реализовать рекордную полосу съемки – 750 км [8, 10]. В РСА используется импульсный сигнал вертикальной поляризации с фазо-кодовой модуляцией. Основные характеристики РСА «Северянин-М» представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Характеристики РСА "Северянин-М"

Параметр	Значение	
Высота орбиты	832 км	
Центральная частота зондирующего сигнала	9615 МГц (X-диапазон)	
Поляризация сигнала	ВВ	
Размеры апертуры антенны	13,4 м × 0,25 м	
Полоса съемки	До 750 км	
Разрешение	Режим низкого разрешения	Режим среднего разрешения
– по путевой дальности – по горизонтальной дальности	800-1250 м 750-1300 м	350-500 м 400-650 м

В 2013-2014 годах с использованием аппаратов «Космос-2487» и «Кондор-Э» были запущены два РСА «Стриж» [12], разработанные АО «Концерн «Вега». Данных радиолокаторах используется S-диапазон частота (несущая частота 3191 МГц), антенная система реализована в виде рефлектора диаметром около 6 м с 32-рупорным облучателем, зондирование осуществляется сигналом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ).

РСА «Стриж» реализует полный набор режимов от высокодетального прожекторного с разрешением 1 м до сканирующего режима с широкой полосой съемки. Характеристики РСА «Стриж» представлены в таблице 1.3 [8].

Таблица 1.3 – Характеристики РСА «Стриж»

Параметр	Значение			
Высота орбиты	500 км			
Центральная частота зондирующего сигнала	3190 МГц (S-диапазон)			
Диаметр рефлектора	6 м			
Полоса обзора	500 км			
Режимы работы	ПР	ДР	ОР	СС
Полоса съемки	8-10 км	10-15 км	30-120 км	30-120 км
Разрешение - по путевой дальности - по горизонтальной дальности	 1-2 м 1-2 м	 3 м 1,5-2,5 м	 9-30 м 6-30 м	 15-30 м 15-30 м
Поляризация сигнала	ГГ	ВВ, ГГ	ВВ	ВВ
Протяженность полосы съемки по путевой дальности	8-10 км	до 500 км	до 500 км	до 500 км

Примечание: ПР – прожекторный режим; ДР – полосовой детальный режим; ОР – обзорный режим; СС – широкозахватный режим ScanSAR.

В настоящее время в АО «НИИ ТП» разрабатывается комплекс РСА «Касатка-Р» [13] для нового спутника ДЗЗ «Обзор-Р» [14]. РСА построен на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР) X-диапазона с размером апертуры 4 × 1,6 м. В радиолокаторе заложены широкие возможности по управлению диаграммой направленности (ДН) за счет применения цифровой обработки сигналов, что позволяет реализовать в одном радиолокаторе как высокодетальное режимы с разрешением менее 1 м, так и сканирующие режимы с полосой съемки до 750 км [15].

За рубежом космические РСА получили бурное развитие в начале 2000-ых годов, когда на орбиту было выведено более десятка аппаратов ДЗЗ.

Наиболее известной и коммерчески успешной системой РСА является КА TerraSAR-X (Германия), разработанная ADS Astrium для немецкого аэрокосмического центра DLR и запущенная в 2007 году. Антенная система TerraSAR-X построена на базе волноводно-щелевой АФАР X-диапазона и состоит из 384 приемо-передающих каналов для сигналов двух поляризаций [17].

Основные характеристики TerraSAR-X и аналогичных РСА представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Характеристики РСА TerraSAR-X (TanDEM-X, PazSAR)

Параметр	Значение		
Высота орбиты	514 км		
Центральная частота зондирующего сигнала	9650 МГц		
Размер апертуры	4,8 × 0,7 м		
Полоса обзора	570 км		
Поляризация сигнала	ГГ+ВВ, ГГ+ГВ, ВВ+ВГ		
Режим работы	Прожекторный	Маршрутный	ScanSAR
Полоса съемки	15 км	350 км	350 км
Разрешение - по путевой дальности - по наклонной дальности - по горизонтальной дальности	 1-2 м 1,2 м -	 3 м - 3 м	 15 м - 16 м
Протяженность полосы съемки по путевой дальности	5-10 км	Не ограничена	

В 2010 году был запущен аналогичный аппарат TanDEM-X со схожей орбитой для работы в паре с TerraSAR-X. Орбита КА TerraSAR-X стабильная, а КА TanDEM-X движется около КА TerraSAR-X на расстоянии 300…600 м. Такая конфигурация позволяет реализовать получение высокоточных карт рельефа местности и трехмерных изображений объектов (интерферометрическая съемка) за счет двукратного визирования одного и того же участка местности с разных позиций. На настоящий момент при помощи аппаратов создана цифровая карта рельефа Земли с точностью менее 10 м охватывающая около 95% суши (67% территории с точностью менее 2 м). Несмотря на заложенный срок активного существования 5,5 лет оба аппарата на начало 2018 года продолжают функционирование на орбите [18].

В начале 2018 года запущен аналогичный аппарата PazSAR-X по заказу испанского агентства CDTI.

В 2013 году Республика Корея вывела на орбиту высотой 550 км свой первый КА с бортовым РСА KOMPSAT-5, разработанный Корейским аэрокосмическим исследовательским институтом в рамках реализации Корейского национального плана развития министерства образования науки и технологий (MEST) для задач наблюдения и контроля экологической обстановки. Аппарат оснащен АФАР X-диапазона (несущая частота 9660 МГц) [19]. Основные характеристики РСА KOMPSAT-5 представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Характеристики РСА KOMPSAT-5

Параметр	Значение		
Высота орбиты	550 км		
Центральная частота зондирующего сигнала	9660 МГц		
Полоса обзора - стандартная - расширенная	 305 км 490 км		
Поляризация сигнала	ГГ, ГВ, ВГ, ВВ		
Режим работы	Высокого разрешения	Стандартный	ScanSAR
Полоса съемки	5 км	30 км	100 км
Разрешение	1 м	3 м	20 м

Примечание: характеристики режимов съемки представлены для угла падения 45°; потенциальное значение расширенной полосы обзора достигается за счет дополнительного отклонения луча ДН.

В период с 2007 по 2010 на орбиту было выведено 4 аппарата двойного назначения COSMO-Sky-Med, разработанные Итальянским Космическим Агентством (ASI) для задач мониторинга лесного и водного покрова, экологического мониторинга и мониторинга чрезвычайных ситуаций а так же для задач министерства обороны Италии.

РСА оснащены АФАР X-диапазона, которая способна проводить съемку с разрешением лучше 1 м, а также реализовывать поляриметрические и

интерферометрические режимы съемки [1]. Производительность системы из четырех аппаратов составляет 1800 радиолокационных снимков в сутки при полной нагрузке для гражданских потребителей, что позволило достичь конечной цели – предоставления оперативной радиолокационной информации потребителям [21]. Основные характеристики РСА представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Характеристики РСА COSMO-Sky-Med

Параметр	Значение				
Высота орбиты	620 км				
Центральная частота зондирующего сигнала	9600 МГц (X-диапазон)				
Размер апертуры	5,7 × 1,4 м				
Полоса обзора	630 км				
Режим работы	СВР	МВР	СР-СС	НР-СС	Пол.
Полоса съемки	10 км	40 км	100 км	200 км	30 км
Разрешение - по путевой дальности - по горизонтальной дальности	 1 м 1 м	 3-15 м 3-15 м	 30 м 30 м	 100 м 100 м	 15 м 15 м
Протяженность полосы съемки	10 км	40 км	100 км	200 км	30 км
Поляризация сигнала	ГГ, ВВ	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ	ГГ, ВВ, ГВ, ВГ	ГВ, Г/В+Г В/В+Г

Примечание: СВР – режим сверхвысокого разрешения; МВР – маршрутный режим высокого разрешения; СР-СС – режим ScanSAR среднего разрешения; НР-СС – режим ScanSAR низкого разрешения; Пол. – маршрутный режим среднего разрешения с двойной поляризацией.

В период с 2006 по 2008 на орбиту были запущены 5 немецких аппаратов военного назначения SAR Lupe с установленными на борту РСА X-диапазона [1]. В высокодетальных режимах аппараты обеспечивают радиолокационную съемку кадров 5,5 × 5,5 км с разрешением до 1 м.

До 2013 года на орбите функционировал Канадский аппарат RADARSAT-1 (запуск в 1995 г), а в настоящее время продолжает функционировать аппарат RADARSAT-2, запущенный в 2007 году на орбиту высотой 798 км. Данный РСА оснащен АФАР С-диапазона с размером апертуры 15×1,4 м и реализует широкую номенклатуру режимов съемки с полосой 20-500 км и разрешением 3-100 м. Полоса обзора варьируется от 150 до 500 км в зависимости от режима съемки. Бортовая АФАР реализует в данном РСА полную поляриметрическую матрицу [1].

В 2006 и 2014 годах по заказу Японского агентства аэрокосмических исследований JAXA на орбиту были выведены 2 космических аппарата ALOS (производство компании Mitsubishi Electric). Аппараты предназначены для разведки природных ресурсов с использованием РСА L-диапазона (несущая частота 1275 МГц). В аппаратах реализованы режимы съемки с разрешением до 5 м по путевой дальности и шириной полосы съемки 70-250 км [23].

Так же в настоящее время на орбитах с высотой 480-500 км продолжают функционировать 4 японских аппарата IGS-Radar, обеспечивающие разрешение не хуже 1 м и аппарат PALSAR [11]. На 2018 год запланирован запуск аппарата с РСА X-диапазона ASNARO 2, реализующий разрешение около 1 м и полосой съемки 10 км в высокодетальном режиме съемки [22].

В рамках европейской программы Copernicus, ранее известной как «Глобальный мониторинг природы и безопасности» (GMES), в настоящий момент на орбиту выведены 2 аппарата Sentinel-1A (2014 год) и Sentinel-1B (2016 год). Аппараты предназначены для обеспечения непрерывного наблюдения земной поверхности в С-диапазоне частот с цикличностью в 12 дней. Главной целью программы является надежное обеспечение результатами радиолокационных наблюдений пользователей программы Copernicus [24].

Аппараты способны реализовать как детальные кадровые режимы съемки (размер кадра 20 × 20 км, разрешение 5 м), так и обзорные режимы низкого разрешения (полоса съемки 400 км, разрешение 20-40 м). Так же заложены

возможности ведения поляриметрических измерений и интерферометрической съемки местности с полосой 250 км и разрешением 5-20 м.

В 2018 году запланирован запуск первого Аргентинского аппарата РСА L-диапазона SAOCOM. В аппарат закладываются возможности ведения радиолокационной съемки с полосой 30-350 км и разрешением 10-100 м [25]. Сотрудничество Аргентины и Италии предполагает создание совместно с аппаратами COSMO-Sky-Med орбитальной группировки из 6 аппаратов ДЗЗ для мониторинга чрезвычайных ситуаций.

В 2008 году на орбиту высотой 580 км выведен израильский РСА TecSAR. Аппарат оснащен антенной с параболическим рефлектором с диаметром около 3 м и реализует несколько режимов съемки в том числе высокодетальное (с разрешением 1 м) и поляриметрические [11].

В 2009 году на орбиту выведен аппарат Risat-2 Индийской организации космических исследований (ISRO) с РСА С-диапазона (несущая частота 5,35 ГГц) Израильского производства. В 2012 году запущен аппарат Risat-1 с РСА Х-диапазона Израильского производства [11].

В 2006-2011 годах в рамках запуска серии Китайских радиолокационных и оптических разведывательных спутников на орбиту были выведены 7 аппаратов РСА с высотой орбиты 510-620 км [26].

В настоящий момент на орбите продолжает функционировать китайский КА Gaofen 3 (GF-3), запущенный в 2016 году [27]. Многорежимный РСА С-диапазона (несущая частота 5400 МГц) оснащен апертурой размером 15 × 1,232 м, позволяющей получать РЛИ с разрешением 1-500 м и полосой съемки 10-650 км в различных сочетаниях поляризаций [32].

Так же свои космические программы по созданию и запуску радиолокаторов ДЗЗ имеют США (серии аппаратов Lacrosse и FIA Radar, аппарат XpressSAR, NISAR – совместно с Индийской организацией космических исследований) [11, 28], Сингапур (TeLEOS-2) [31]. Вьетнам (LOTUSat-1), Финляндия (первый аппарат малых размеров с РСА ICEYE-X1) [29], Великобритания (NovaSAR-S – совместно с Airbus Defence and Space) [30].

Представленный обзор свидетельствует о растущем общемировом интересе к технологиям космических РСА. Радиолокационные средства ДЗЗ космического базирования в настоящее время являются универсальным инструментом получения оперативной информации о состоянии земной поверхности. Число стран, обладающих РСА космического базирования продолжает увеличиваться с каждым годом. При этом создание подобных радиолокаторов требует коммерческой кооперации между предприятиями, а иногда и международного научно-технического сотрудничества.

В настоящий момент в мире проводятся международные научные конференции, посвященные проблемам радиолокационного ДЗЗ. Данные конференции включат в себя одну или несколько секций, посвященных радиолокационному мониторингу Земли из космоса и технологиям радиолокационной съемки. Например, Европейская конференция по радиолокаторам с синтезированной апертурой (EUSAR, периодичность – раз в два года), международная радиолокационная конференция (RADAR, ежегодная), и др.

Основные направления совершенствования аппаратуры космических РСА предполагают [32]:

– создание новых методов визирования земной поверхности;

– развитие АФАР и рефлекторных антенн для применения в РСА;

– повышение оперативности наблюдения;

– развитие технологий многопозиционного визирования и создание созвездий РСА;

– расширение частотных диапазонов и создание мультичастотных РСА;

– развитие методов обработки радиолокационной информации и др.

Мировой интерес к решению широкой номенклатуры научных проблем и задач в области космических РСА подчеркивают актуальность исследований в данном научно-техническом направлении.

1.2 Анализ геометрии визирования РСА

При описании геометрии бокового визирования земной поверхности используется модель Земли в виде сферы с радиусом R_S. Использование сферической модели весьма условно, поскольку форма поверхности Земли отлична от сферы и описывается геоидом. Однако на некотором ограниченном участке местности Земная поверхность может быть аппроксимирована сферой при этом необходимо уточнять значение среднего локального радиуса Земли R_S [34].

Основные геометрические соотношения для данной модели при строго боковом визировании иллюстрируются рисунком 1.1 [35], на котором указаны: КА – положение КА с РСА; ЦЛ – геометрический центр следа луча ДН на поверхности Земли (визируемого участка местности) точечная цель на поверхности Земли в центре визируемого участка местности) – точка, в которую нацелен максимум ДН; H – высота орбиты КА над поверхностью модели Земли (без учета высоты рельефа местности в подспутниковой точке – точке пересечения прямой, соединяющей КА и центр масс Земли, со сферой Земли); ΔH – отклонение высоты орбиты КА от номинального значения H; R – *наклонная дальность* до центра визируемого участка местности (с учётом высоты рельефа местности визируемого участка местности и изменения высоты КА) отсчитываемая по линии КА - центр следа луча на поверхности Земли; ε – *угол визирования* заданной точечной цели (с учётом высоты рельефа визируемого участка местности и изменения высоты космического аппарата (КА)) – отсчитываемый от линии КА - центр сферы Земли О к прямой по которой отсчитывается наклонная дальность; L – *горизонтальная дальность* до заданной точки наблюдения отсчитываемая от подспутниковой точки до точечной цели на поверхности земли, по дуге окружности, радиус которой равен R_S; $\Delta h_{ПС}$ – высота рельефа визируемого участка местности; $\Delta h_{КА}$ – высота рельефа в подспутниковой точки; η – *угол падения*, отсчитываемый от нормали к поверхности Земли в точке визирования к прямой, по которой отсчитывается наклонная дальность; ε' – угол

визирования заданной точечной цели при отсутствии рельефа и отклонений высоты КА; R' – наклонная дальность до заданной точки наблюдения при отсутствии рельефа и отклонений высоты КА; L' – горизонтальная дальность до заданной точки наблюдения при отсутствии рельефа и отклонений высоты КА; γ – центральный угол, соответствующий дугам L и L', точка О – вершина центрального угла γ (не обозначена на рисунке 1.1), расположенная в центре сферы Земли.

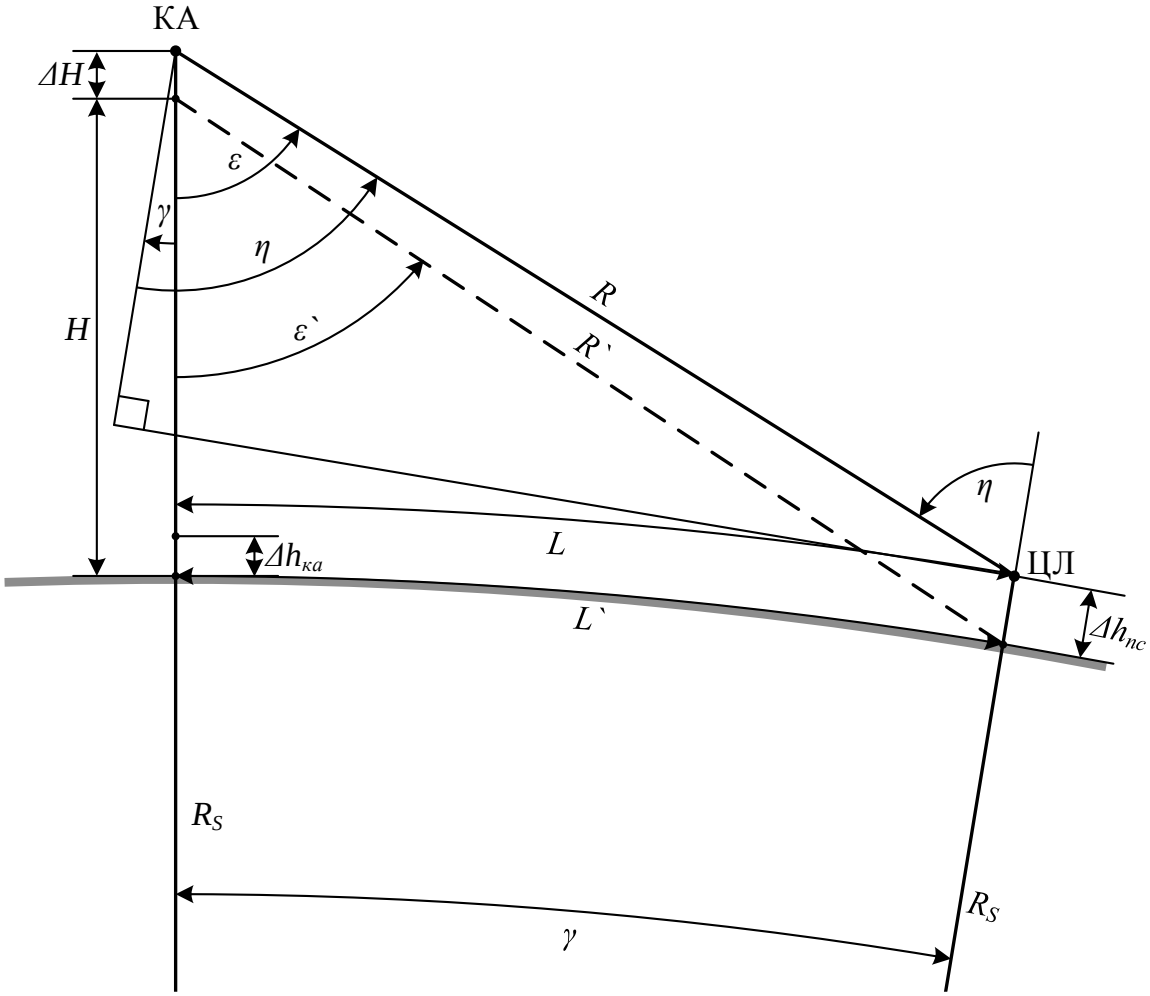

Рисунок 1.1 – Геометрия бокового визирования в РСА

Решение треугольника КА-ЦЛ-О позволяет определить все соотношения для расчета характеристик бокового визирования. Величина центрального угла:

$$\gamma = \frac{L}{R_S + \Delta h_{ПС}} = \frac{L'}{R_S}, \tag{1.1}$$

коэффициент сферичности с учетом рельефа и изменений высоты КА:

$$K_S = \frac{R_S + H + \Delta H}{R_S + \Delta h_{ПС}}, \tag{1.2}$$

горизонтальная дальность в зависимости от угла визирования:

$$L(\varepsilon) = \left(R_S + \Delta h_{ПС}\right) \cdot (\eta - \varepsilon) = \left(R_S + \Delta h_{ПС}\right) \cdot (\arcsin(K_S \cdot \sin(\varepsilon)) - \varepsilon), \tag{1.3}$$

наклонная дальность в зависимости от угла визирования:

$$R(\varepsilon) = \left(R_S + \Delta h_{ПС}\right) \cdot \left(K_S \cdot \cos(\varepsilon) - \sqrt{1 - K_S{}^2 \cdot \sin^2(\varepsilon)}\right), \tag{1.4}$$

угол визирования в зависимости от наклонной дальности:

$$\varepsilon(R) = \arcsin\left(\frac{\left(K_S{}^2 - 1\right) \cdot \left(R_S + \Delta h_{ПС}\right)^2 + R^2}{2 \cdot R \cdot K_S \cdot \left(R_S + \Delta h_{ПС}\right)}\right), \tag{1.5}$$

где величина K_S в соотношениях 1.3-1.5 рассчитывается в соответствии с текущими значениями высот Δh_{KA} и ΔH.

Антенная система бортового радиолокатора, с размерами апертуры вдоль траектории движения КА D_X – по горизонтали и размером по вертикали D_Y образуют диаграмму направленности с *шириной* (в угловых координатах) $\Delta\alpha$ в горизонтальной плоскости $\Delta\varepsilon$ в вертикальной плоскости, где ширина ДН определяется типом антенны и рабочей длиной волны λ [36] и отсчитывается по уровню -3 дБ от максимума ДН.

Ширина ДН определяет *размер следа луча ДН* на поверхности Земли, который вычисляется по следующим соотношениям [1]:

– *продольный* (вдоль траектории движения РСА) размер следа луча на поверхности Земли:

$$Лл_x(\varepsilon) = 2 \cdot R(\varepsilon) \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right), \tag{1.6}$$

– *поперечный* (поперек траектории движения РСА – отсчитываемый в направлении горизонтальной дальности) размер следа луча на поверхности Земли:

$$Лл_z(\varepsilon) = R_S \cdot \left(\arcsin\left(K_S \cdot \sin(\varepsilon)\right) - \Delta\varepsilon\right). \tag{1.7}$$

Протяженности полосы съемки, ограниченная угловыми направлениями $\varepsilon_б$ и $\varepsilon_д$, определяется соотношением:

$$Lc_z = L(\varepsilon_д) - L(\varepsilon_б). \quad (1.8)$$

где $L(\varepsilon)$ – горизонтальная дальность, определяемая соотношением (1.3), $\varepsilon_б \leq \varepsilon_д$.

Технология синтезирования апертуры протяжённостью $L_{синт}$, во много раз превышающую горизонтальный размер антенны D_Y, обеспечивает высокую азимутальную разрешающую способность ДН синтезированной апертуры. При этом в пределах визируемого участка местности обеспечивается *продольная разрешающая способность* l_x:

$$l_x = \frac{\lambda \cdot R}{2 \cdot L_{синт}}, \quad (1.9)$$

где λ – средняя длина волны зондирующего сигнала.

Разрешающая способность радиолокатора по дальности (по времени запаздывания сигнала) определяется длительностью импульса на выходе оптимального приемника [37]. В современных системах РСА для повышения разрешающей способности по дальности применяются сложные сигналы, наибольшее распространение среди которых получили сигналы с ЛЧМ, использование которых обеспечивает *поперечную разрешающую способность*:

$$l_z = \frac{c}{2 \cdot \Delta F \cdot K_S \cdot \sin(\varepsilon)}, \quad (1.10)$$

где ΔF – ширина полосы обрабатываемого ЛЧМ сигнала, c – скорость распространения радиоволн.

Первым режимом съемки земной поверхности применявшимся в космических радиолокаторах (РСА Seasat-A [4]), являлся режим *полосовой съемки*.

В режиме *полосовой съемки* боковое визирование производится неподвижным в процессе съемки антенным лучом. В результате формируется *радиоголограмма* (комплексные отсчеты эхо-сигналов, зарегистрированные за время съемки всего участка местности, обрабатываемые совместно для получения РЛИ данного участка местности) прямоугольного участка местности (*полосы*

съемки) на поверхности Земли вдоль траектории движения РСА, образованного перемещением следа луча ДН на поверхности Земли в процессе поступательного движения РСА по траектории. При этом *ширина полосы съемки* в полосовом режиме съемки Lc_z равняется поперечному размеру следа луча на поверхности Земли $Lл_z$, *протяженность полосы съемки* Lc_x может достигать нескольких тысяч километров и определяется возможностями бортовой аппаратуры по функционированию в данном режиме. Преобразование выражения (1.9) с учетом особенностей радиолокационного визирования дает следующее соотношение для оценки продольной разрешающей способности в полосовом режиме съемки:

$$l_x = \frac{D_X}{2}. \qquad (1.11)$$

Положение визируемого участка местности на поверхности земли характеризуется моментами начала съемки (излучением первого зондирующего импульса и регистрацией первого эхо-сигнала) и окончания съемки (регистрацией последнего эхо-сигнала, а также положением полосы съемки в пределах *полосы обзора* – участка земной поверхности доступного для визирования с учетом возможностей бортового радиолокатора по механическому или электронному перенацеливанию луча ДН в вертикальной плоскости или за счет разворота КА. Боковое визирование в режиме полосовой съемки иллюстрируется рисунком 1.2.

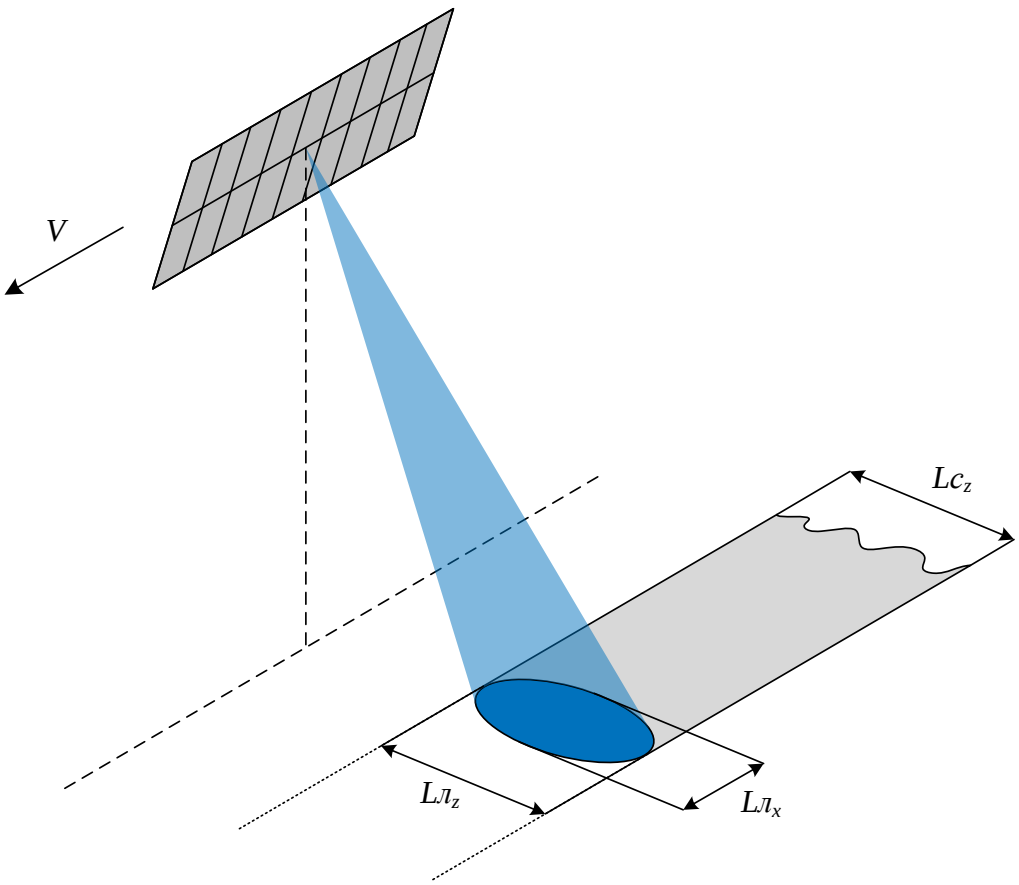

Рисунок 1.2 – Полосовой режим съемки

Необходимо отметить, что при рассмотрении характеристик визирования, зависящих от движения следа луча ДН на поверхности Земли, необходимо использовать скорость движения луча по поверхности Земли $V_л$ отличную от скорости движения КА $V_{КА}$. Связь данных параметров описывается следующим соотношением [38]:

$$V_Л = \frac{V_{КА}}{K_S}. \qquad (1.12)$$

Предельно достижимое разрешение по путевой дальности в режиме полосовой съемки составляет половину горизонтального размера бортовой антенны. Улучшение продольного разрешения можно достичь увеличением апертуры синтеза за счет ведения прожекторной съёмки (рисунок 1.3), характеризующейся непрерывным отслеживанием лучом ДН одного участка местности (непрерывное нацеливание максимума ДН в одну точку) в процессе съемки. В данном случае ведется речь о кадровой съемке (когда участок

местности ограничен по путевой дальности соответствующим размером следа луча на поверхности Земли). Размеры визируемой полосы съемки будут эквивалентны размерам следа луча ДН на поверхности Земли, а разрешение определяется соотношением (1.10).

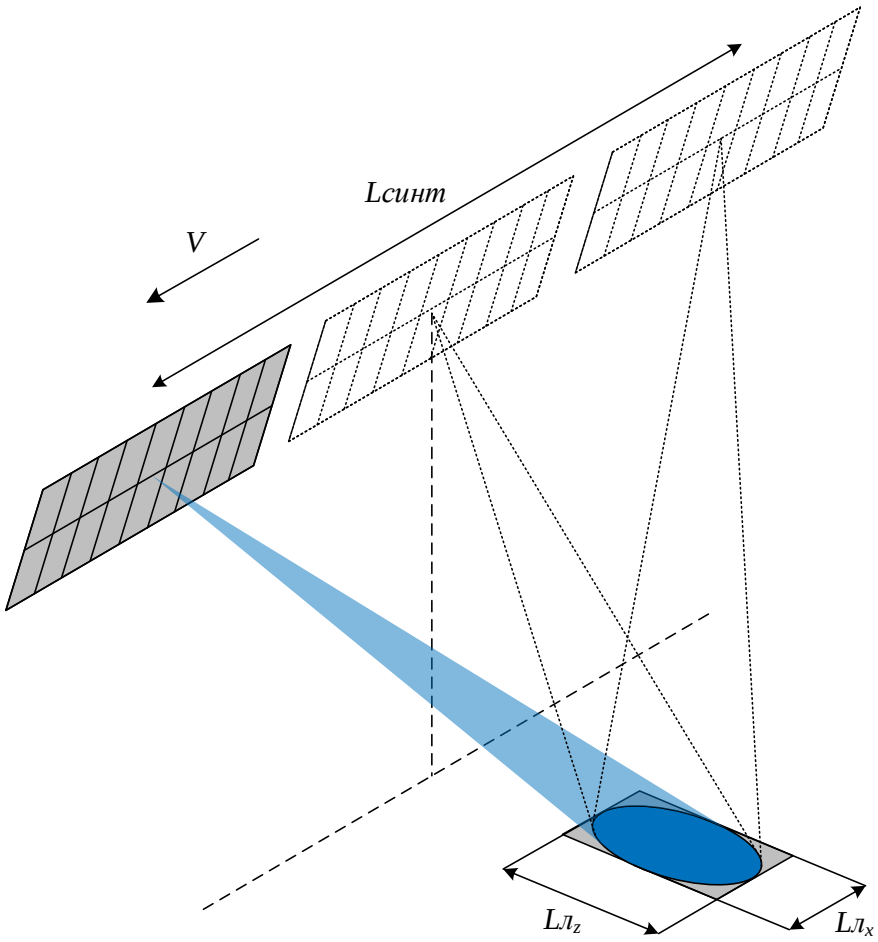

Рисунок 1.3 – Прожекторный режим съемки

Из представленных соотношений видно, что геометрические характеристики радиолокационного изображения определяются размерами следа луча на поверхности Земли, апертурой синтеза и типом используемого сигнала (что определяет разрешение и геометрические размеры полосы съемки или кадра). Расширение размеров визируемого участка путем увеличения угловых размеров ДН (например, путем уменьшения размеров апертуры) сопряжено с рядом технических сложностей (например – значительное падения коэффициента усиления излучающей системы, которые необходимо компенсировать за счет

использования зондирующих сигналов повышенной мощности), а также сопряжено с увеличением уровня неоднозначности [39].

Неоднозначность в РСА вызвана использованием периодических импульсных зондирующих сигналов и проявляется на РЛИ в виде целей на изображении, накладывающийся на наблюдаемый участок земной поверхности, что значительно ухудшает качество РЛИ и затрудняет их дешифрирование. Эмпирическим путем установлено, что для получения качественных радиолокационных изображений необходимо соблюдать уровень неоднозначности не более -20 дБ [1].

Неоднозначность по азимуту (доплеровская неоднозначность) обусловлена необходимостью использования в РСА частоты повторения зондирующих импульсов вдвое большей, чем полоса доплеровских частот визируемого участка местности. При этом аналогичные доплеровские спектры на кратных частоте повторения импульсов частотах «сворачиваются» в область главного доплеровского спектра. Уровень доплеровской неоднозначности может быть оценен по следующему соотношению [1]:

$$A_x = \frac{\sum_n \int_{\alpha^n_{неодн} - \frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}}^{\alpha^n_{неодн} + \frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}} Ft_x(\theta_x) \cdot Fr_x(\theta_x) \cdot d\theta_x}{\int_{-\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}}^{\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}} Ft_x(\theta_x) \cdot Fr_x(\theta_x) \cdot d\theta_x}, \qquad (1.13)$$

где $\alpha^n_{неодн}$ – угловое положение n-ой зоны доплеровской неоднозначности, n – номер зоны доплеровской неоднозначности (обычно не более $n = \pm 1$), $\Delta\alpha_{допл}$ – визируемый угловой диапазон в азимутальном направлении (в котором формируется доплеровский спектр), $Ft_x(\theta_x)$ и $Fr_x(\theta_x)$ – диаграммы направленности по мощности, соответственно, на излучение и прием в горизонтальной плоскости.

Неоднозначность по дальности (по задержке) возникает в результате регистрации антенной РСА эхо-импульсов, отраженных от разных участков земной поверхности, расстояние по наклонной дальности между которыми кратно половине расстояния на которое распространяется электромагнитная волна за один период повторения $c \cdot Tn/2$. Принцип возникновения неоднозначности по

дальности иллюстрируется рисунком 1.4, где сигнал от точек *Б* и *Д*, удаленные от РСА соответственно на расстояния *Rб* и *Rд*, регистрируется в РСА в момент прихода *n*-ого отраженного эхо-импульса от точки *ЦЛ*, визируемой пол углом *ε*.

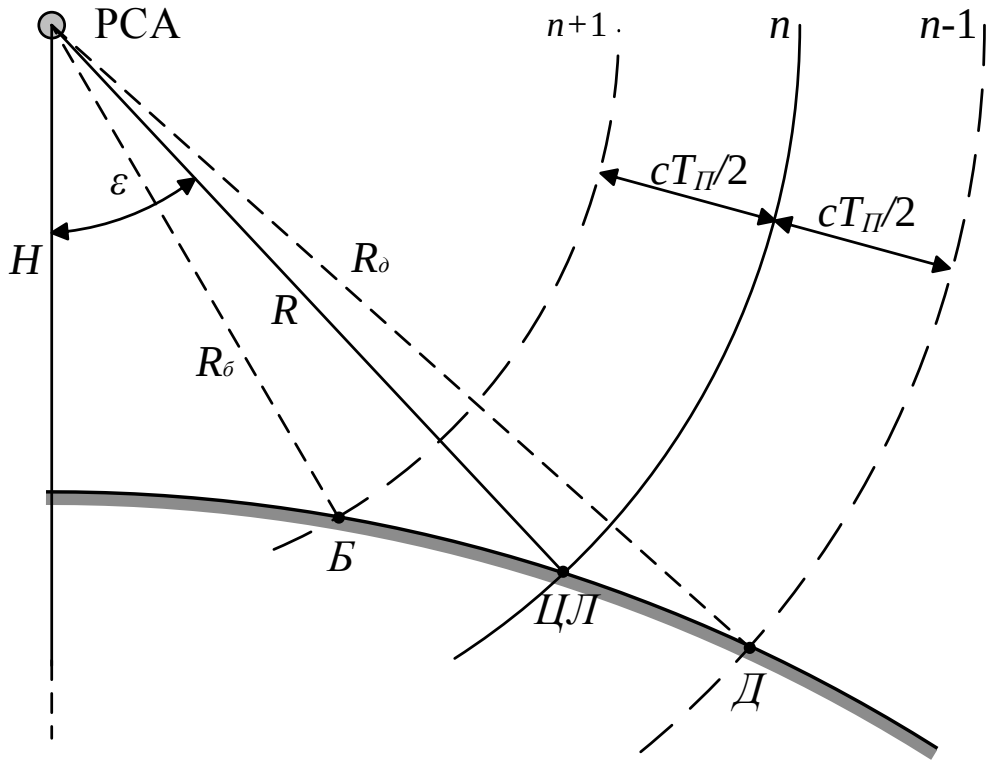

Рисунок 1.4 – Неоднозначность РСА по дальности

Уровень неоднозначности по дальности может быть оценен по следующему соотношению:

$$A_y = \frac{\dfrac{Ft_y(\theta_{yб}) \cdot Fr_y(\theta_{yб})}{R_б^{\,4}} + \dfrac{Ft_y(\theta_{yд}) \cdot Fr_y(\theta_{yд})}{R_д^{\,4}}}{\dfrac{Ft_y(\theta_{y0}) \cdot Fr_y(\theta_{y0})}{R_0^{\,4}}}, \qquad (1.14)$$

где $Ft_y(\theta_y)$ и $Fr_y(\theta_y)$ – диаграммы направленности по мощности, соответственно, на излучение и прием в вертикальной плоскости, $\theta_{yб}$ и $\theta_{yд}$ – угловые направления на, соответственно, ближний и дальний центры зон неоднозначности по дальности, $R_б$ и $R_д$ – наклонные дальности до центров, соответственно, ближней и дальней зоны неоднозначности по дальности, θ_{y0} – угловое направление на центр

визируемой полосы (кадра), R_0 – наклонная дальность до центра визируемой полосы (кадра).

Селекция полезных сигналов при подавлении неоднозначности возможна путем специального выбора периода повторения, величина которого определяет положение зон неоднозначности в пространстве, а значит и относительно диаграммы направленности, являющейся пространственным фильтром. При этом выбор периода повторения зондирующего сигнала в системах с одной приемо-передающей антенной требует специального расчета данного параметра с целью исключения регистрации эхо-сигнала от визируемого участка местности в момент излучения зондирующего импульса (возникновение «слепых» дельностей) и наложения на полезный сигнал надирных помех, вызванных интенсивными отражениями сигналов от подспутниковой точки [40].

Таким образом, конфигурация и размеры апертуры антенны напрямую влияют на реализуемые характеристики РЛИ [41], при этом эффект неоднозначности существенно ограничивает возможность реализации режимов съемки земной поверхности при увеличении размеров визируемого участка местности в несколько раз (по сравнению с размерами следа луча на поверхности Земли) с одновременным сохранением продольного разрешения.

Для того, чтобы обойти указанное ограничение на реализацию широкозахватных режимов съемки высокого разрешения в настоящий момент исследуются и в современных РСА используются различные техники синтеза апертуры, примеры некоторых из которых рассматриваются ниже.

1.3 Расширенные режимы съемки земной поверхности в РСА

Одним из способов увеличения размеров визируемого участка местности, при условии соблюдения приемлемого уровня неоднозначности, в РСА с АФАР является искусственное расширение угловых размеров ДН антенны за счет

введения специальных поканальных амплитудно-фазовых распределений по апертуре [42].

Процесс оптимизации при расчете амплитудно-фазовых распределений предполагает разбиение данной задачи на две частных: расширение луча ДН в вертикальной плоскости (для увеличения полосы съемки) и расширение луча ДН в горизонтальной плоскости (для увеличения продольного размера снимаемого кадра в прожекторном режиме или увеличения апертуры синтеза в полосовом режиме съемки).

Однако, необходимо учитывать, что введение амплитудно-фазовых распределений сопряжено с дополнительными энергетическими потерями, что может быть частично скомпенсировано введением различных распределений на излучение и прием: на излучение, для повышения мощности зондирующего импульса, могут применяться только фазовые методы расширения, а на прием – амплитудно-фазовые.

Например, расширение в 1,8 раза ДН в вертикальной плоскости РСА RADARSAT-2, результирующие потери коэффициента усиления составляют 4,6 дБ. Расширение данной ДН в 2 раза в горизонтальной плоскости ведет к потерям коэффициента усиления на 4,7 дБ [42].

Амплитудно-фазовые методы расширения луча ДН применимы в рамках более сложных техник синтезирования апертуры.

Существенное расширение полосы съемки возможно путем ведения сканирующей съемки земной поверхности ScanSAR (Scanning Synthetic Aperture Radar) [44]. Данный режим реализуется на базе полосового режима съемки за счет последовательного наблюдения в нескольких парциальных полосах, что достигается уменьшением времени синтезирования в каждой из парциальных полос (по сравнению с полосовым режимом съемки). Геометрия визирования в режиме ScanSAR поясняется рисунком 1.5.

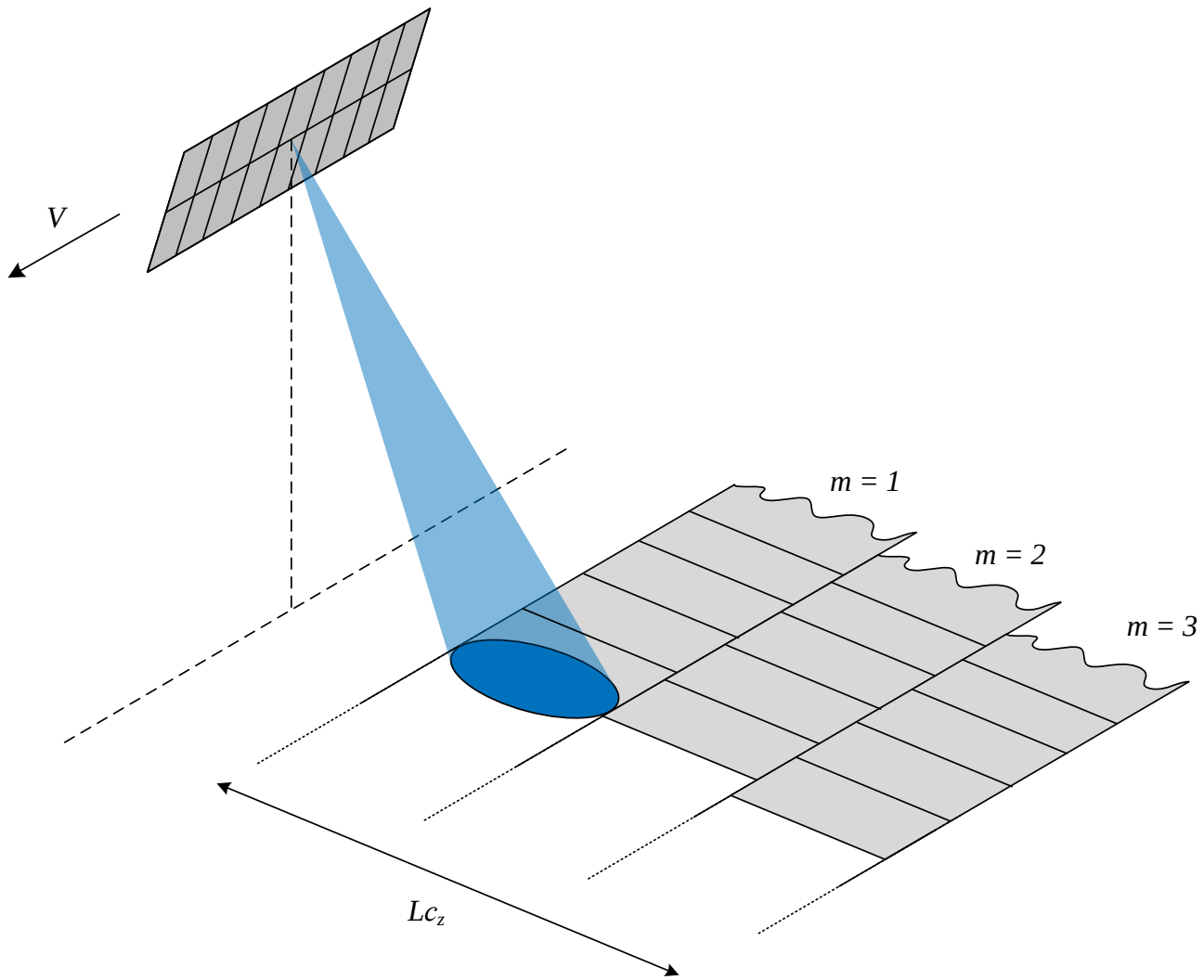

Рисунок 1.5 – Режим ScanSAR

На рисунке 1.6 представлена последовательность синтеза апертуры и покадрового формирования полосы съемки в сканирующем режиме съемки при визировании антенным лучом в M = 3 парциальных полосах.

В процессе движения КА (как и в полосовом режиме съемки) происходит синтезирование апертуры протяженностью $L_{синт}$. Одновременно с движением КА луч ДН смещается по поверхности земли на расстояние $L_{см}$, после чего происходит перенацеливание луча (сканирование в угломестной плоскости) на следующую парциальную полосу и процесс синтезирования повторяется. Просканировав все M = 3 парциальные полосы (один цикл сканирования) ДН нацеливается на первую парциальную полосу, след луча ДН занимает соседнее

положение от уже снятого участка Земной поверхности и цикл сканирования повторяется.

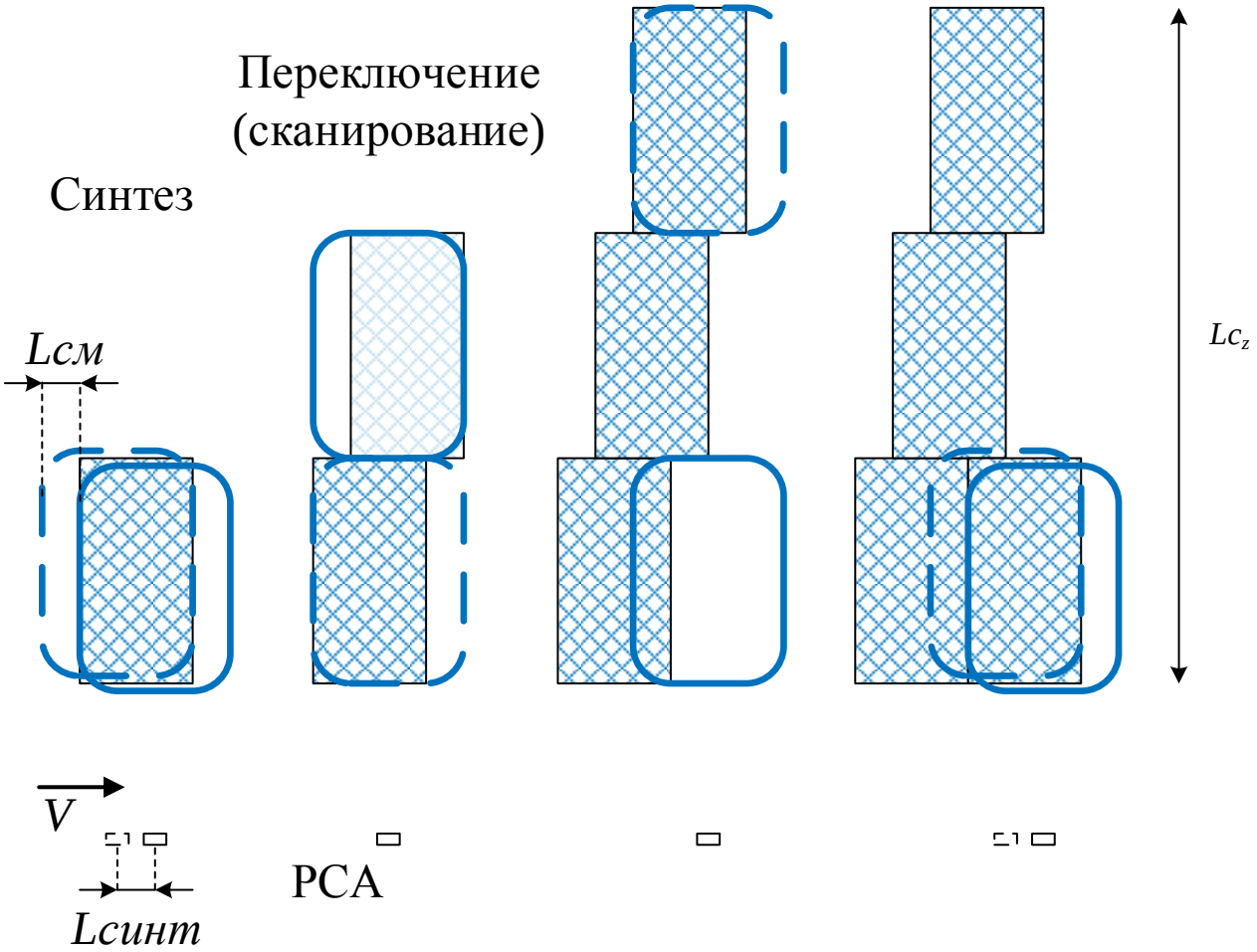

Рисунок 1.6 – Последовательность съемки в режиме ScanSAR

Реализуемая разрешающая способность в данном режиме оценивается как [1]:

$$l_x = \frac{D_X}{2} \cdot (M+1), \tag{1.15}$$

где M – число парциальных полос сканирования. Ширина полосы съемки в сканирующем режиме съемки увеличится примерно в M раз по сравнению с полосовым режимом, точное значение определяется с использованием соотношения (1.3).

Применение режима ScanSAR позволяет существенно расширить полосу съемки за счет ухудшения разрешения. На его основе в современных РСА создаются как и детальные режимы с узкой полосой съемки, так и обзорные режимы низкого разрешения [45].

Возможность охвата протяженных участков местности привела к использованию режима ScanSAR для проведения интерферометрических измерений для которых необходимо обеспечивать идентичные доплеровские спектры от идентичных целей, визируемых при двух наблюдениях [46]. В режиме ScanSAR точечные цели в пределах одного наблюдения в одной парциальной полосе имеют свою амплитуду (за счет формы ДН в пределах главного лепестка ДН), а также свой диапазон доплеровских частот (поскольку луч за время наблюдения смещается на расстояние меньшее, чем размер следа луча по путевой дальности. Данные недостатки компенсируются в интерферометрических РСА путем ведения прогрессивной сканирующей съемки местности – TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans).

В данном режиме достигаются лучшая амплитудно-доплеровская стабильность отражённого сигнала за счет ведения принудительного азимутального сканирования лучом ДН в процессе визирования одной парциальной полосы, что так же приводит к получению более качественных РЛИ за счет снижения уровня модуляции эхо-сигнала приемной ДН [47].

Так же в работе [48] рассмотрен подход к реализации расширенного режима TOPS – ETOPS (Extended TOPS) для РСА в которых возможности по азимутальному сканированию существенно ограничены. При таких ограничениях режим ETOPS позволяет реализовать разрешение по путевой дальности лучше, чем в режиме TOPS. При этом уровень неоднозначности и радиометрическая чувствительность превосходят аналогичные характеристики режима ScanSAR и уступают режиму характеристикам режима TOPS.

Расширение размеров кадра по путевой дальности в прожекторном режиме съемки может быть достигнуто путем ведения *скользящей прожекторной съемки* [49]. В данном режиме луч ДН ориентируется в направлении на заданный участок

местности, а в процессе съемки луч отслеживает в азимутальном направлении точку лежащую гораздо дальше визируемого участка местности (не в центре кадра – как в прожекторном режиме). В результате след луча ДН скользит по поверхности Земли, реализуя аналогичную полосовому режиму съемку местности, при этом скорость движения следа луча ДН по поверхности Земли гораздо меньше скорости движения луча в полосовом режиме. В результате время синтеза апертуры увеличивается. Протяженность реализуемой полосы съемки ограничивается возможностями бортовой аппаратуры по отклонению луча ДН в азимутальном направлении. Геометрия визирования представлена на рисунке 1.7.

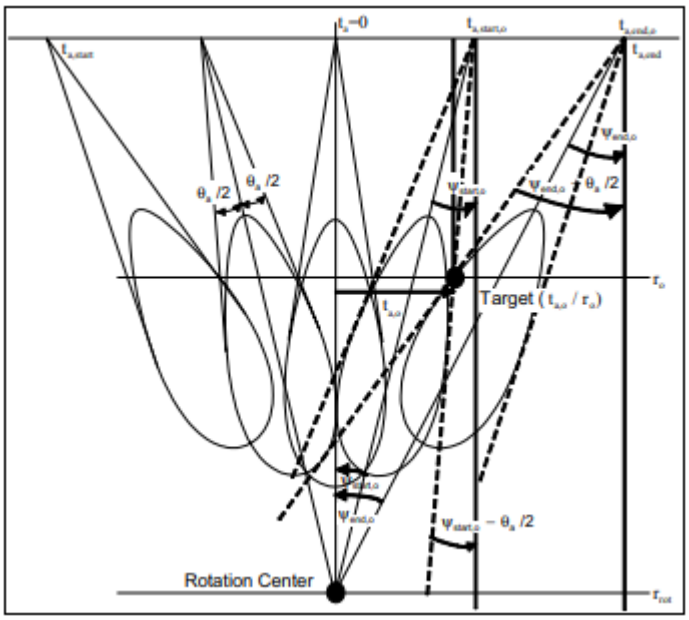

Рисунок 1.7 – Режим скользящей прожекторной съёмки [49]

Например, в РСА TerraSAR-X, где в классическом прожекторном режиме на дальнем краю полосы обзора реализуется путевая протяженность полосы съемки 3,7 км при разрешении 0,24 м [37], использование скользящей прожекторной съемки позволяет увеличить путевую протяженность полосы съемки до 5 км при путевом разрешении 1,1 м. Так же возможно увеличение протяженности до 10 км с разрешением 1,7 м – то есть достижимо увеличение протяженности полосы съемки в 1,35-2,7 раза за счет ухудшения разрешения.

Таким образом, в РСА с одним антенным лучом ДН увеличение размеров визируемого участка местности в прожекторном или полосовом режиме связано с одновременным ухудшением разрешающей способности по путевой дальности или снижением энергетических характеристик.

Развитие антенной техники и микроэлектроники привели к внедрению в РСА цифровых методов формирования и обработки сигналов, позволяющие осуществлять многоканальную обработку эхо-сигналов и цифровое формирование многолучевой диаграммы направленности на прием, что позволят улучшить характеристики радиолокационного визирования [51].

1.4 Технологии многоканального визирования и цифрового формирования ДН на прием в РСА

В различное время в зарубежной литературе предлагались подходы по ведению многоканальной съемки земной поверхности, предполагающие разбиение приемной антенны на несколько субапертур: концепция многоканального РСА со скошенным обзором [52], метод сдвига фазового центра антенны (DPCA – Displaced-Phase-Center Antenna) [53], использование прямоугольной четырехсекционной апертуры [54].

Один из подходов к ведению многоканальной съемки предполагает использование двух антенн: передающей и приемной антенны (смонтированные на одном КА или двух – находящихся на схожих орбитах) [58]. Приемная антенна в несколько раз превосходит по площади передающую и состоит из нескольких приемных секций расположенных в горизонтальном направлении. При излучении зондирующего импульса небольшая передающая антенна засвечивает широкую полосу земной поверхности, которая будет определять поперечный размер визируемого участка местности [59].

Горизонтальный размер каждой секции аналогичен горизонтальному размеру передающей антенны. Вертикальный – в несколько раз больше чем у

передающей, что создает узкий луч приемной ДН по вертикали [60]. Каждая секция приемной антенны позволяет производить сканирование электронным способом по вертикали (технология SCORE – SAan On REceive). В итоге засвеченный участок земной поверхности широкой ДН передающей антенны покрывается узкими ДН нескольких приемных секций (рисунок 1.8).

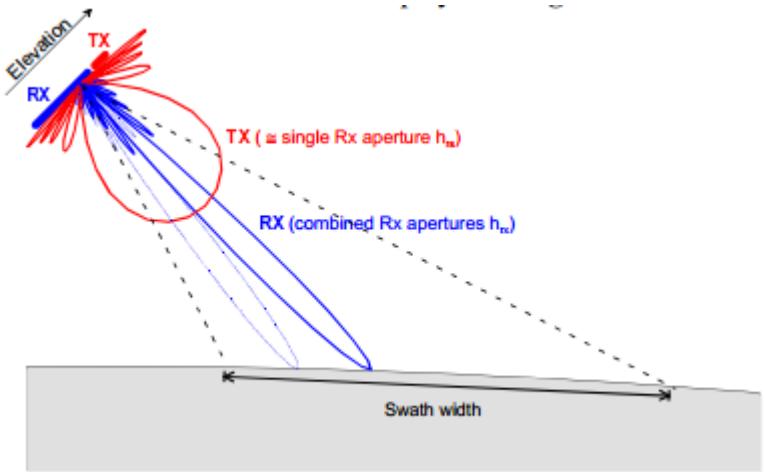

Рисунок 1.8 – Многоканальный режим с раздельными передающей и приемной апертурами [60]

В каждой из секций приемной антенны (разнесенных в горизонтальном направлении) формируется сигнал одной парциальной полосы. Сигналы проходят аналого-цифровое преобразование, независимую обработку в приемном тракте и объединяются в единую радиоголограмму в процессоре. За счет ведения цифровой обработки каждого приемного канала, данный подход получил название цифрового формирования лучей ДН на прием [55].

Исследования таких широкозахватных режимов высокого разрешения (HRWS – High-Resolution Wide-Swath), реализующих широкую полосу съемки с высоким пространственным разрешением, в дальнейшем исследовались в ряде работ [48], [49]. Данные методы позволяют расширить полосу съемки, однако обладают рядом недостатков (использование двух антенн, низкие энергетические характеристики за счет относительно малых размеров предающей антенны). Также, несмотря на предложенные решения по подавлению неоднозначности [61],

проблема выбора периода повторения (в условиях интенсивных надирных отражений) при одновременном визировании протяженных участков земной поверхности существенно ограничивает возможность применения данного подхода в РСА.

Развитие технологии цифрового формирования лучей привела к созданию концепции пространственно-временного разделения зондирующих импульсов [62], использующую одну полноразмерную приемо-передающую антенну в сочетании с цифровым формированием лучей на прием (рисунок 1.9). Теоретические обоснования данного подхода были предложены [64] коллективом немецких авторов G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira и развиты в последующих работах [63].

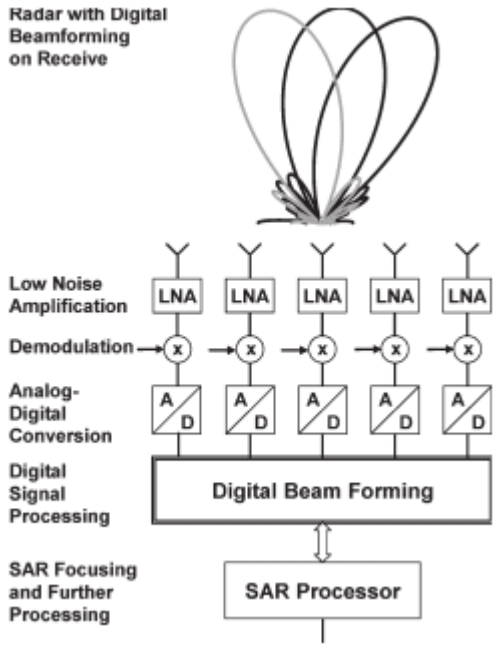

Рисунок 1.9 – Схема цифрового формирования многолучевой ДН на прием [64]

Основная идея заключается в излучении полноразмерной передающей антенной зондирующего сигнала последовательно (с использованием нескольких субимпульсов в составе зондирующего импульса, каждый из которых излучается в своем направлении) или одновременно – в нескольких направлениях при формировании каждой субапертурой своего индивидуального зондирующего

сигнала. На прием сигнал регистрируется методами многоканальной обработки с цифровым формированием многолучевой ДН. Радиолокационная система, осуществляющая цифровое формирования диаграммы направленности на прием была запатентована авторами [65, 66].

В качестве одного из вариантов реализации такой системы предлагается использовать азимутальное пространственное разделение излучаемых субимпульсов (для сохранения энергетических характеристик), излучаемых в широком диапазоне углов по вертикали (засветка протяженной по горизонтальной дальности области) в сочетании с цифровым формированием широких в азимутальном направлении лучей по вертикали на прием. Такое решение имеет преимущество в использовании всей апертуры на передачу и на прием, поскольку оцифрованные отсчеты эхо-сигнала каждого сегмента антенны могут быть обработаны для цифрового формирования многолучевой ДН на прием. Формируемый результирующий узкий приемо-передающий луч ДН сохраняет энергетические характеристики сигналов и обужает доплеровский спектр, ослабляя уровень неоднозначности в широкозахватных режимах съемки [67].

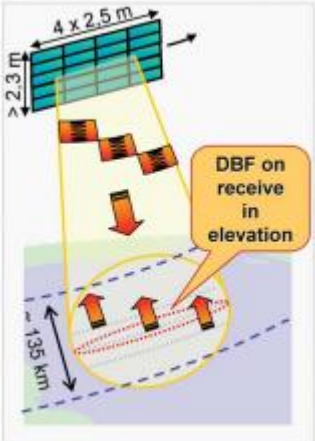

Рисунок 1.10 – Пример реализации режима с пространственно-временным разделением зондирующих импульсов и цифровым формированием многолучевой ДН на прием [64]

В качестве примера авторы рассматривают реализацию режима с полосой съемки 135 км и азимутальным разрешением 1,5 м (рисунок 1.10) на базе системы сегментированной апертуры размером 10 × 2,5 м с цифровым формированием лучей по вертикали при сохранении приемлемого уровня неоднозначности. При этом из теоретических выкладок следует, что дальний край полосы съёмки будет содержать надирную помеху [64]. Так же в работе не раскрываются технические характеристики рассматриваемой в примере системы, что осложняет оценку реализуемости данного метода съемки на практике.

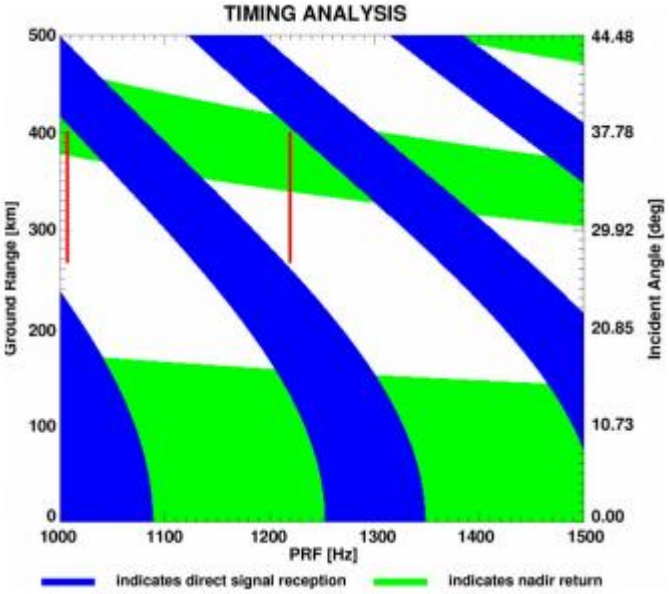

Рисунок 1.11 – Диаграмма помех РСА [64]

Последующие работы авторов посвящены теоретическому анализу различных концепций использования многоканального приема и цифрового формирования лучей на прием для будущих систем РСА [56, 68, 69, 70]. В частности, для упрощения реализации систем РСА, снижения массы антенной системы при одновременном сохранении энергетических характеристик систем, предлагается использование рефлекторной антенны с облучателем, позволяющим формировать многолучевую ДН [71, 72]. Архитектура такой системы обсуждается в работе [73]. В то же время аппараты текущих миссий РСА, реализующие высокодетальное режимы съемки, оснащены иным типом антенных систем –

сложными активными фазированными антенными решетками (Radarsat, TerraSAR-X, CosmoSkyMed, TanDem-X, Sentinel-1 и др.), которые характеризуются повышенной гибкостью в управлении при реализации различных режимов съемки [74, 75].

В последние годы методы многоканального приема и цифрового диаграммообразования активно исследуются китайскими учеными [76]. Предложены алгоритмы визирования с формированием цифровой многолучевой в вертикальной плоскости ДН на прием [77, 78, 79] а так же методы разделения эхо-сигналов в таких режимах [80].

В настоящий момент отрабатываются авиационные системы РСА DBSAR-2 [81] и EchoSAR [82] разработанные в Национальном управлении по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA, США), являющиеся прототипами для перспективных космических аппаратов с применением технологии цифрового формирования диаграммы направленности на прием. Аналогичный проект разрабатывается в Институте электроники китайской академии наук (IECAS) [83].

Так же появляются публикации об экспериментальной отработке аппаратуры для будущих систем РСА с технологиями цифрового формирования лучей у европейских ученых [84, 85].

1.5 Постановка задачи исследования

Как было отмечено выше, в настоящий момент создается высокодетальный радиолокационный комплекс ДЗЗ космического базирования «Касатка-Р». Бортовая аппаратура предусматривает возможность ведения многоканальной обработки радиолокационных сигналов и цифрового формирования ДН на прием [16].

Из представленного обзора очевидна теоретическая обоснованность применения многоканальных систем РСА с возможностью цифрового

формирования многолучевой ДН на прием для повышения эффективности функционирования космических РСА. Однако использование цифровых методов формирования ДН на прием выливается в повышение требований к характеристикам бортовой аппаратуры [86], параметры и конфигурация которой определяет возможность интеграции представленных подходов многоканальной съемки земной поверхности.

Это приводит к необходимости проведения дополнительных исследований направленных на разработку комплексов технических решений и алгоритмов функционирования аппаратуры применимых на практике в рамках реализации проектов по созданию высокодетальных РСА космического базирования с целью повышения характеристик радиолокационной съемки и эффективности применения космических РСА с цифровой АФАР. Для достижения поставленной цели 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.

1.6 Выводы по главе

1. Космические радиолокаторы являются востребованными средствами ДЗЗ во всем мире, способными решать широкий круг задач в различных областях науки, техники и жизнедеятельности человека. Интерес, проявляемый мировым сообществом к совершенствованию техники получения радиолокационной информации, повышению характеристик систем РСА и к решению научных проблем в теории радиолокаторов синтезирования апертур подчёркивают актуальность исследований в данном направлении.

2. Эффект неоднозначности в одноканальных РСА существенно ограничивает возможность реализации широкозахватных режимов съемки Земной поверхности высокого разрешения. Использование многоканальных режимов работы в РСА и применение цифрового диаграммообразования на прием позволяет преодолевать ограничения, вызванные эффектом неоднозначности.

3. Из представленного обзора научной литературы следует, что повышение характеристик радиолокационной съемки и эффективности применения космических РСА является актуальной целью исследований, а разработка новых режимов съемки, основанных на многолучевом визировании, и создание алгоритмов функционирования РСА в таких режимах – актуальными научными задачами.

ГЛАВА 2 АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ МНОГОКАНАЛЬНОЙ СЪЕМКИ С РАЗНЕСЕНИЕМ АНТЕННЫХ ЛУЧЕЙ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ

2.1 Краткий анализ РСА с цифровой активной фазированной антенной решеткой

РСА строится на базе активной фазированной антенной решетки (АФАР) размером апертуры 4 м × 1,6 м (рисунок 2.1) и конструктивно состоит из 18-ти цифровых радиолокационных модулей (ЦРМ – 9 по горизонтали и 2 по вертикали), объединенные по управлению и суммированию потоков радиолокационных данных (радиоголограмм – РГГ) вычислителем [87].

Рисунок 2.1 – Конфигурация исследуемой АФАР – вид со стороны антенного полотна

ЦРМ представляет собой, по сути, автономный РСА с 32-х канальной приемо-передающей микрополосковой аналоговой АФАР [88], позволяющей излучать и принимать сигналы двух ортогональных поляризаций. Для целей настоящего диссертационного исследования многополяризационные режимы работы АФАР не вносят особой специфики. Поэтому все дальнейшие

рассуждения и схемы приводятся для тракта одной поляризации. На рисунке 2.2 представлена схема приемо-передающего тракта ЦРМ.

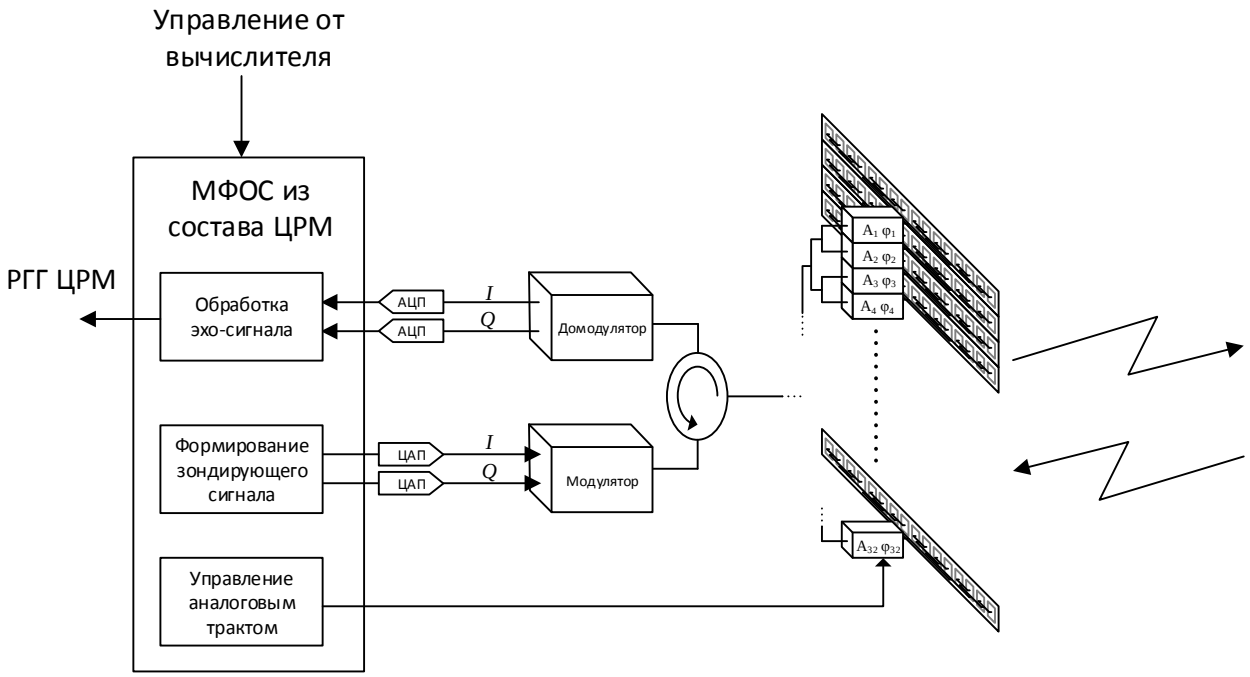

Рисунок 2.2 – Архитектура ЦРМ

Формирование зондирующего сигнала с заданными характеристиками (начальная фаза, частота, амплитуда, длительность и т.д.) в ЦРМ осуществляется в программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС) модуля формирования и оцифровки сигналов (МФОС) по команде от вычислителя. При этом, за счет применения цифрового формирования сигнала, импульсы имеют идентичные параметры в каждом периоде излучения (при одинаковых исходных данных, выдаваемых в блок формирования, которые могут быть изменены в любой момент по команде от вычислителя). Сформированный демодулируется в приемо-передающем устройстве (ППУ) и поступает в аналоговый тракт, где по системе сумматоров-делителей сверхвысокочастотный сигнал поступает на 32 аналоговых приемо-передающих канала. Каждый приемо-передающий канал оснащен аттенюаторами (с шагом 0,9 дБ) и фазовращателями (дискрет установки фазы 5,625°). Излучающая система каждого приемо-передающего канала представлена линейкой 16-ти микрополосковых излучателей, запитываемых

пассивно. Излучение сигнала происходит всеми 32-мя каналами одновременно [89].

При работе ЦРМ на прием сигнал суммируется по апертуре одной линейки излучателей, проходит аналоговый приемо-передающий тракт (с учетом преобразований фазы и аттенюации), суммируется по апертуре ЦРМ, демодулируется и поступает в МФОС. МФОС осуществляет обработку эхо-сигналов в цифровом виде и формирование РГГ данного ЦРМ (поток оцифрованных отсчетов зарегистрированных эхо-сигналов) [89].

В составе цифровой АФАР РГГ от каждого ЦРМ суммируется по всей апертуре, формируя единую РГГ, передаваемую в бортовой накопитель. Радиолокационное изображение формируется после передачи РГГ на Землю.

Антенная решетка по горизонтали образована 9-ю цифровыми элементами (поскольку формирование и обработка сигнала осуществляется в цифровой форме). Соответственно, управление формой и положением луча ДН в вертикальной плоскости осуществляется за счет аналоговых фазовращателей и аттенюаторов (аналоговая антенная решетка по вертикали), в горизонтальной – посредствам цифровой обработки сигналов в каждом из 9-ти ЦРМ в горизонтальной плоскости (цифровая антенная решетка по горизонтали). Основные характеристики исследуемой системы РСА с цифровой АФАР приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики исследуемого РСА с цифровой АФАР

Параметры	Значение	
Частотный диапазон, несущая частота, F_0	X-диапазон 9600 МГц	
Ширина полосы приемо-передающего Тракта, $\Delta F_{тракт}$	600 МГц	
Частота дискретизации сигналов в ЦРМ, F_d	720 МГц	
Максимальное число формируемых каналов обработки на прием, K	4	
Угол крена антенны, $\varepsilon_{кр}$	35°	
Высота орбиты, H	650 км	
Плоскость антенны	Горизонтальная	Вертикальная
Размер апертуры АФАР, $D_X \times D_Y$	4,032 м	1,6 м
Количество элементов антенной решетки $N_x \times N_y$	9	64
Шаг между элементами антенной решетки $h_x \times h_y$	0,448 м	0,025 м
Сектор сканирования лучом ДН, $\Delta\alpha_{скан} \times \Delta\varepsilon_{скан}$	±1,0°	±15°
Ширина двусторонней ДН, $\Delta\alpha \times \Delta\varepsilon$	0,30°	0,77°

На рисунке 2.3 представлены размеры следа луча ДН на поверхности Земли рассматриваемого РСА, определяемые угловой шириной ДН по уровню -3 дБ от максимума приемо-передающей ДН. В таблице 2.2 представлены расчетные характеристики визирования в режимах полосовой и прожекторной съемки.

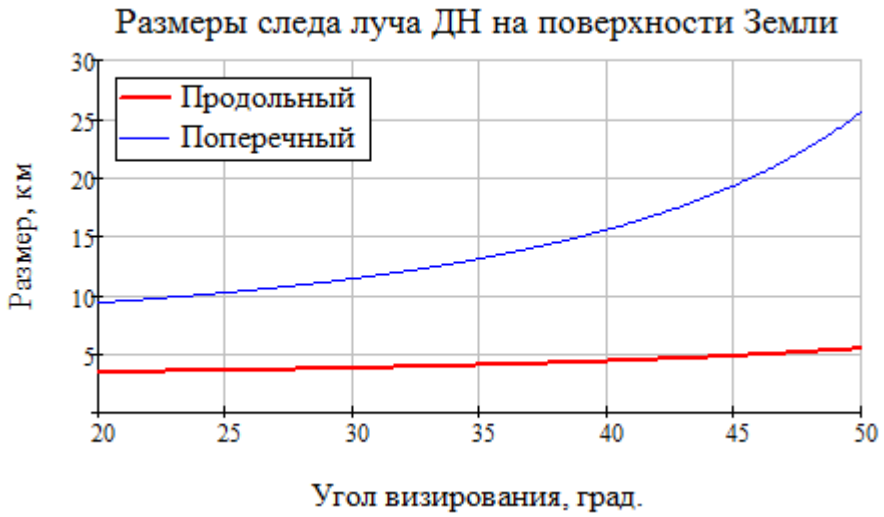

Рисунок 2.3 – Размеры следа луча ДН исследуемого РСА

Таблица 2.2 – Реализуемые характеристики визирования исследуемого РСА

	Полосовой режим	Прожекторный режим
Диапазон углов визирования	20°…50°	20°…46°
Размер реализуемого кадра – продольный – поперечный	 4000 км 10,1 км… 27,6 км	 3,7 км … 5,9 км 10,1 км… 27,6 км
Реализуемое разрешение – продольное – поперечное	 2,65 м 2,65 м	 1 м 1 м

На рисунке 2.3 представлена функциональная схема исследуемой цифровой АФАР, составленная на основе представленного описания архитектуры, которая будет использоваться в ходе диссертационного исследования. На схеме введена систему нумерации элементов двумерной антенной решетки: v = 1…9 – порядковый номер элемента АФАР по горизонтали (ЦРМ), u = 1…64 – порядковый номер элемента АФАР по вертикали (каналы ЦРМ, нумеруемые последовательно в составе двух ЦРМ, расположенные вертикально).

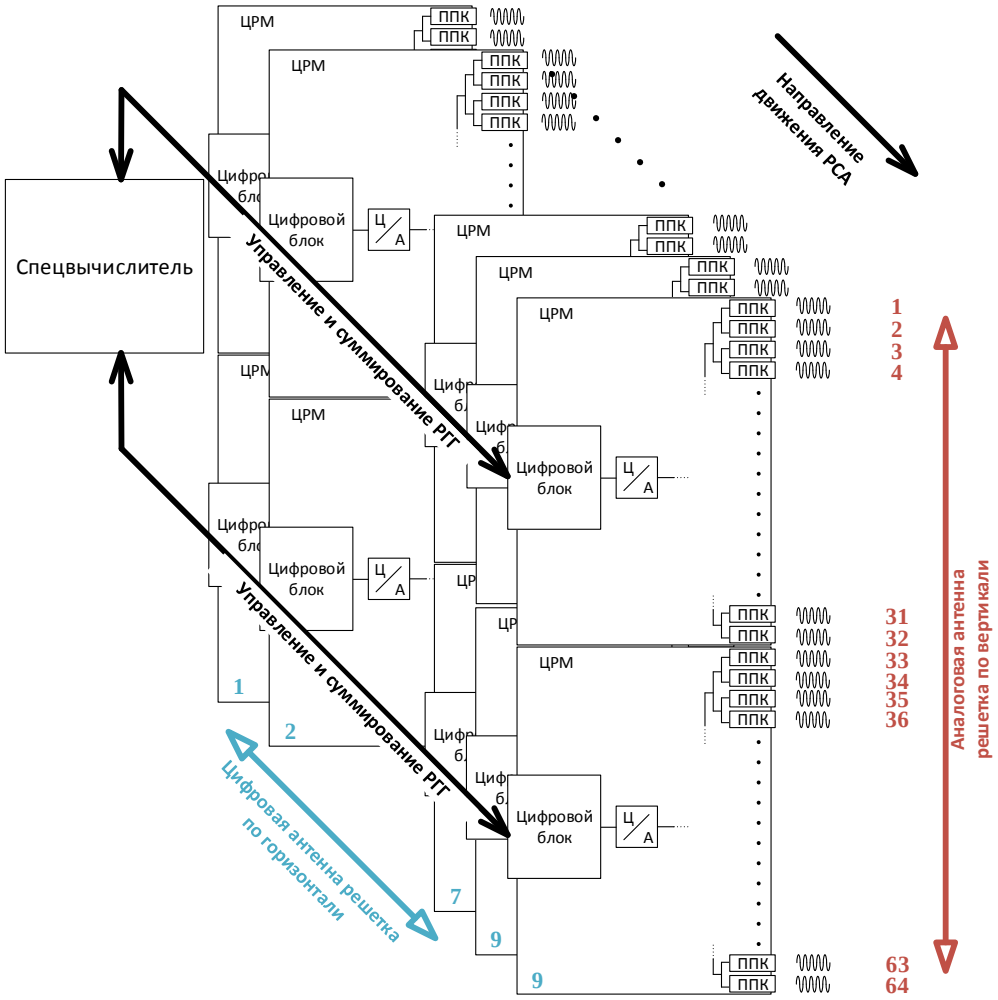

Рисунок 2.4 – Функциональная схема исследуемой цифровой АФАР

9 МФОС в составе цифровой антенной решетки (образованной 9-ю ЦРМ в горизонтальной плоскости) в данной архитектуре АФАР образуют подсистему цифрового диаграммообразования в азимутальном направлении на прием, предложенную в работе [64]. Формирование сигнала в цифровой форме и ведение цифровой обработки, осуществляемые МФОС, делает возможным реализацию подходов пространственно-временного разделения зондирующих импульсов и многоканальной обработки эхо-сигналов с формированием цифровой многолучевой ДН на прием.

Применение указанных принципов функционирования РСА с цифровой АФАР, как отмечалось в разделе 1.4, позволяет реализовать высокодетальное визирование протяженных участков земной поверхности. Для этого на излучение зондирующий импульс разбивается на несколько субимпульсов, которые

излучаются последовательно в различных азимутальных направлениях за счет отклонения луча ДН (рисунок 2.5).

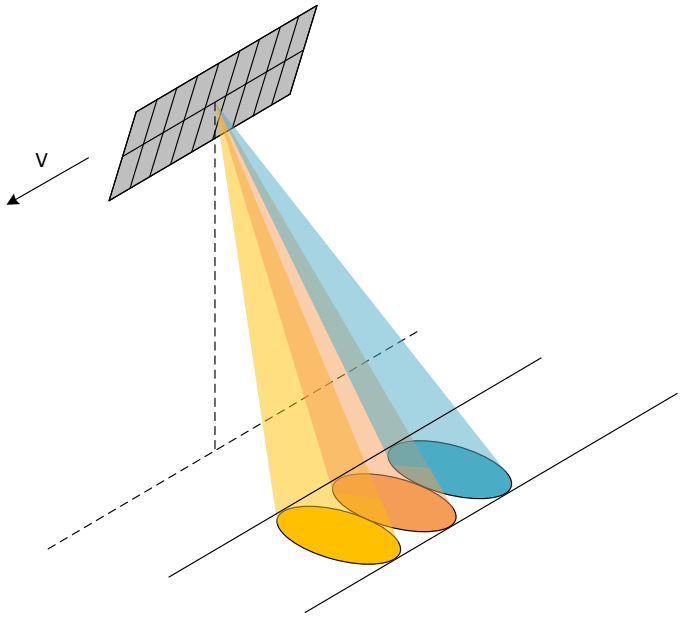

Рисунок 2.5 – Концепция азимутального разнесения 3-ех лучей ДН

На прием, за счет создания цифровой многолучевой ДН и ведения многоканальной обработки, соответствующей количеству приемных лучей, происходит параллельное формирование РГГ от каждого азимутального направления. В результате размер визируемого участка местности увеличивается пропорционально количеству формируемых приемо-передающих лучей. Рассмотрим подробнее в общем виде алгоритм многолучевого визирования.

2.2 Пространственно-временное разделение зондирующих импульсов

Для реализации описанных выше принципов визирования на передачу зондирующий ЛЧМ импульс длительностью $\tau_{зи}$ разбивается на K субимпульсов, следующих с интервалом $\Delta\tau_{зи}$ (рисунок 2.6).

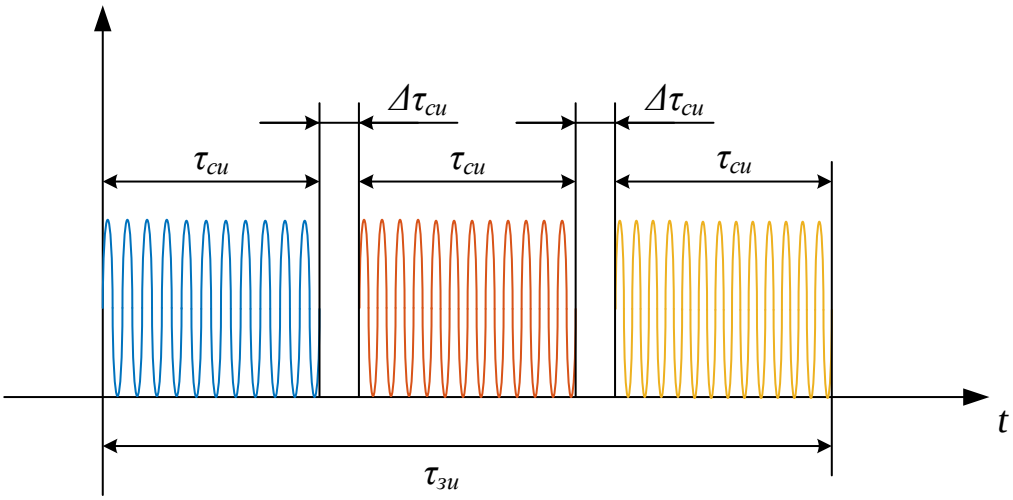

Рисунок 2.6 – Структура зондирующего импульса (при K = 3)

Длительность каждого субимпульса определяется соотношением:

$$\tau_{си} = \frac{\tau_{зи} - (K-1)\cdot \Delta\tau_{си}}{K}. \qquad (2.1)$$

Для улучшения разделения эхо-сигналов, регистрируемых с разных направлений, используется частотное разделение каналов. Для этого при формировании сигнала парциальный спектр шириной $\Delta F_{си}$ каждого субимпульса имеет свою поднесущую частоту f^k, в рамках отведенного для функционирования РСА частотного диапазона $\Delta F_{тракт}$ (рисунок 2.7) где $k = 1\ldots K$ – порядковый номер субимпульса.

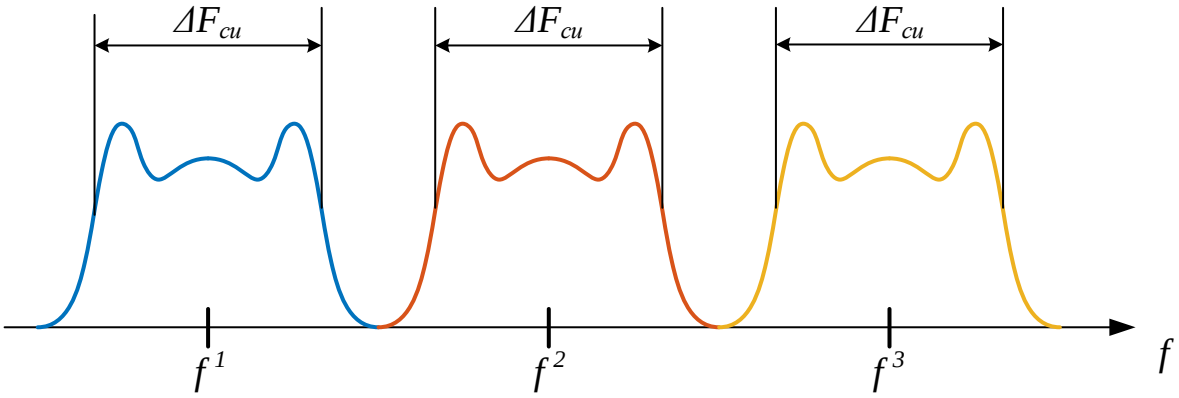

Рисунок 2.7 – Структура спектра зондирующего импульса (при K = 3)

Вопрос выбора номиналов частот для каждого субимпульса в рамках доступного частотного диапазона будет рассмотрен в разделе 2.5. Суммарная полоса зондирующего сигнала не может превышать полосу пропускания приемо-передающего тракта РСА:

$$K \cdot \Delta F_{кан} + (K-1) \cdot \Delta F_{мк} \leq \Delta F_{тракт}, \qquad (2.2)$$

где $\Delta F_{кан}$ – максимальная полоса канала обработки (соответствующая одному приемном лучу ДН), $\Delta F_{мк}$ – защитный частотный интервал между спектрами соседних частотных каналов, $\Delta F_{тракт}$ – полоса пропускания приёмо-передающего тракта.

Полоса канала обработки $\Delta F_{кан}$ определяет максимальную ширину полосы сигнала обрабатываемого сигнала: $\Delta F_{си} \leq \Delta F_{кан}$, где $\Delta F_{си}$ определяется из соотношения (1.9) для обеспечения требуемой разрешающей способности по горизонтальной дальности l_z при заданных условиях визирования. Величина защитного частотного интервала $\Delta F_{мк}$ обеспечивает необходимый уровень фильтрации сигнала в приемном тракте, при этом реальный интервал между границами соседних спектров может быть больше ширины данного интервала.

При зондировании каждый субимпульс последовательно излучается в своем азимутальном направлении α^k за счет смены линейного фазового распределения вдоль антенной решетки АФАР по горизонтали (рисунок 2.8). Требуемый линейный фазовый набег между элементами решетки по горизонтали обеспечивается при формировании субимпульсов во всех МФОС. Для этого в каждом МФОС вводится своя начальная фаза субимпульса. Приращение фаз $\Delta\varphi t_x^k$ между элементами выражается известным соотношением из теории антенн [36]:

$$\Delta\varphi t_x^k = \frac{2\pi \cdot f^k \cdot h_x \cdot \sin(\alpha^k)}{c}, \qquad (2.3)$$

где k – номер субимпульса; угловое направление α^k определяется условиями визирования в конкретном режиме съемки, c – скорость распространения радиоволн.

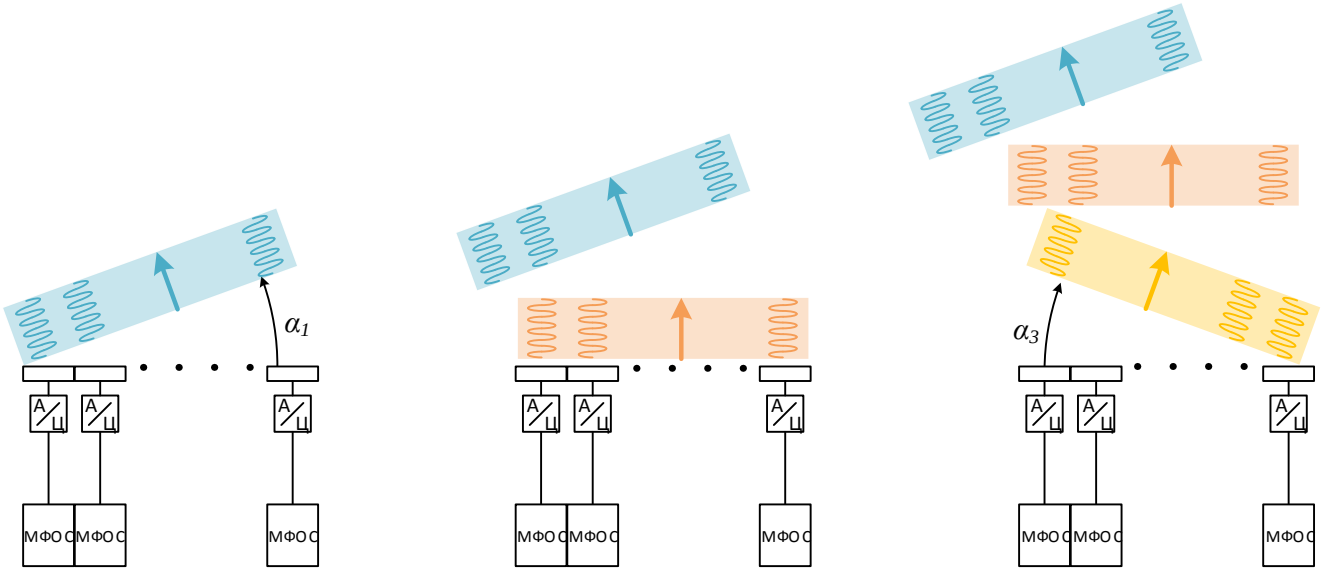

Рисунок 2.8 – Последовательное излучение субимпульсов в различных азимутальных направлениях (при K = 3). Задержки по времени излучения импульсов соседними элементами носят условный характер и приведены для наглядного пояснения последовательности излучения субимпульсов.

Представленное последовательное «засвечивание» одним антенным лучом земной поверхности реализует алгоритм пространственно-временного разделения зондирующих импульсов, позволяющий в K раз увеличить площадь зондируемого участка местности по сравнению с площадью следа луча ДН на поверхности Земли. Перейдем к рассмотрению регистрации эхо-сигналов от «засвеченного» участка местности.

2.3 Многоканальная обработка эхо-сигнала с цифровым формированием лучей ДН на прием в горизонтальной плоскости

Регистрация эхо-сигналов, приходящих относительно антенного полотна с различных угловых направлений, согласно принципам цифрового диаграммообразования, осуществляется путем параллельной многоканальной

обработки, где в каждом из каналов ведется обработка эхо-сигнала своего приемного цифрового антенного луча.

Данный принцип применим к рассматриваемой цифровой АФАР с азимутальной многолучевой ДН. Длительность отраженного от поверхности Земли эхо-сигнала $\tau_{прм}$, исходя из геометрии визирования определяется следующим соотношением:

$$\tau_{прм}=2\cdot\frac{R\left(\varepsilon+\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right)-R\left(\varepsilon-\frac{\Delta\varepsilon}{2}\right)}{c}+\tau_{зи}, \qquad (2.4)$$

где, R – наклонная дальность, определяемая соотношением (1.4), ε – угол визирования, $\Delta\varepsilon$ – ширина ДН в вертикальной плоскости, с – скорость распространения радиоволн, $\tau_{зи}$ – длительность зондирующего импульса.

Для рассматриваемой системы РСА длительность эхо-сигнала варьируется от 50 мкс (при ε = 20°) до 180 мкс (при ε = 50°) при длительности зондирующего импульса 25 мкс. В то же время, разность времени 2-кратного распространения сигналов до центров визируемых каждым приемным лучом участков местности составляет от 66 нс до 105 нс (в зависимости от угла визирования) – что пренебрежимо мало по сравнению с длительностью эхо-сигналов и длительностью субимпульсов. Поэтому, несмотря на временное разделение зондирующих субимпульсов на передачу, аналогичное разделение эхо-сигналов на прием невозможно.

В данных условиях применимо разделение эхо-сигналов в частотной области, для этого при излучении субимпульсы формируются каждый на своей несущей частоте, согласно алгоритму, описанному в разделе 2.2.

Многочастотный сигнал, принятый с разных азимутальных направлений, регистрируется аналоговым трактом и обрабатывается в МФОС каждого сегмента АФАР. В каждом МФОС обработка осуществляется в два этапа.

На первом этапе в каждом МФОС сигнал с частотой оцифровки F_d, разделяется на K каналов параллельной обработки (рисунок 2.9). В каждом канале проходит цифровая демодуляция сигнала, для переноса парциального спектра

соответствующего канала обработки на нулевую частоту, и цифровая фильтрация в фильтре нижних частот с понижением частоты дискретизации данного канала в K раз для снижения избыточности и величины информационных потоков. В результате во всех МФОС в каждом канале формируются поток отсчетов эхо-сигналов своего парциального спектра.

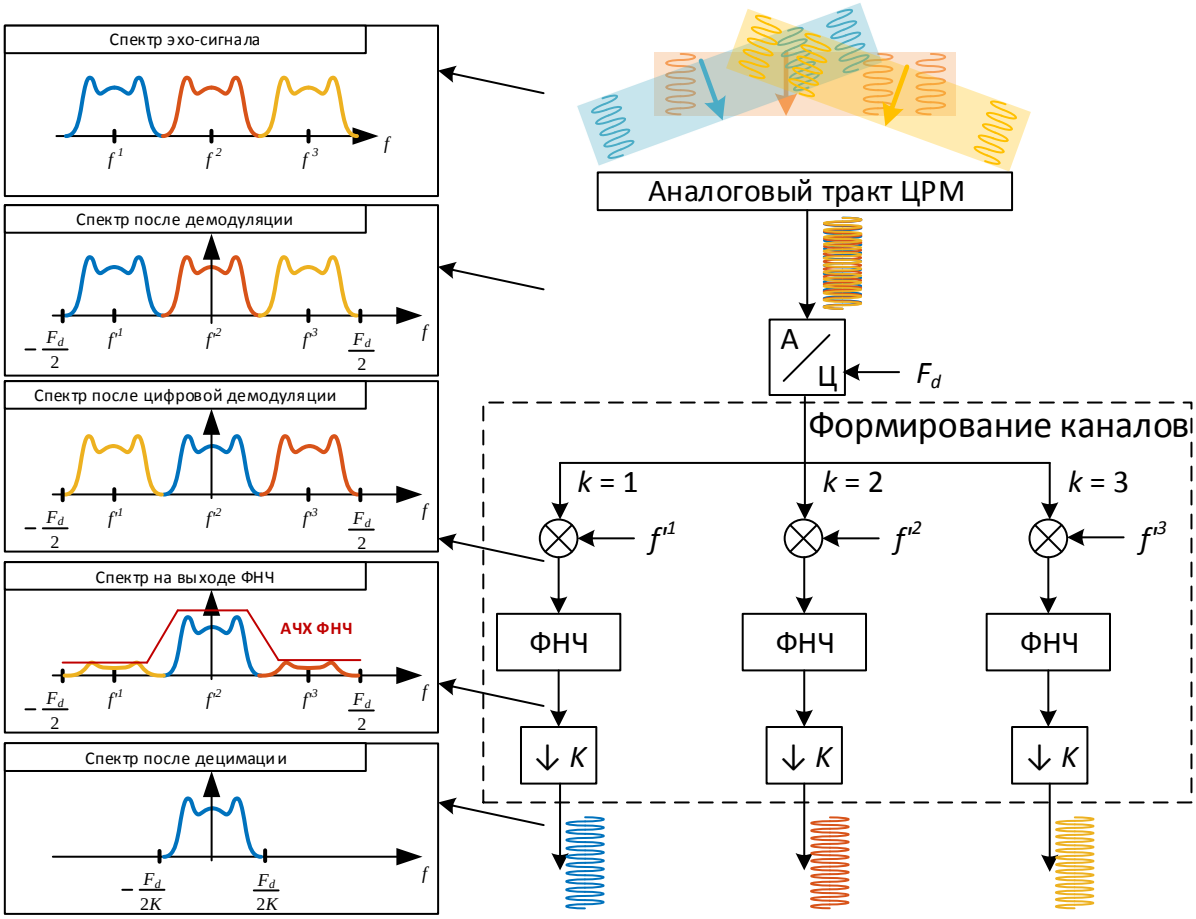

Рисунок 2.9 – Тракт формирования каналов обработки (при K = 3).

f'_k – центральная частота k-ого парциального спектра после аналоговой демодуляции.

На втором этапе обработки обеспечивается формирование многолучевой ДН на прием (рисунок 2.10), при этом каждому приемному антенному лучу соответствует свой канал обработки, сформированный на первом этапе.

Рассмотрим технологию цифрового формирования ДН на прием в рамках всей цифровой АФАР на примере канала 1, сформированного на первом этапе обработки.

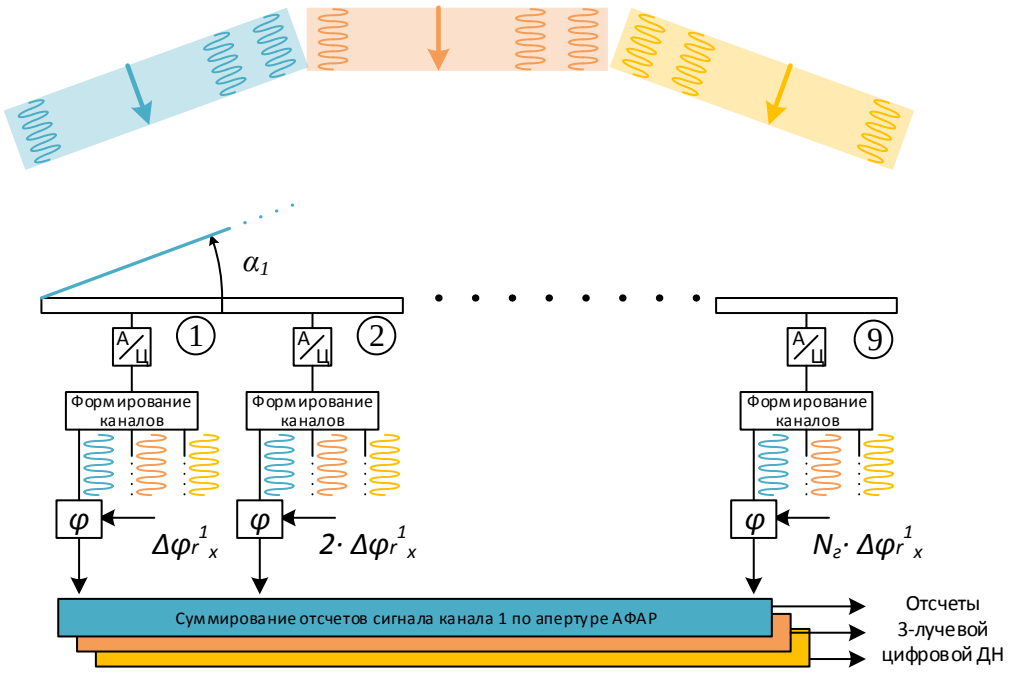

Рисунок 2.10 – Цифровое формирование многолучевой ДН

Аналогично работе передающего тракта, на прием в каждом канале обработки между элементами цифровой решетки по горизонтали вводится приращение фазы сигнала $\Delta\varphi r_x^k$ для создания линейного фазового набега по апертуре, отклоняющего приемный цифровой луч ДН по азимуту на угол α^k, после чего происходит параллельное суммирование отсчетов эхо-сигналов каждого канала (цифрового луча) по апертуре АФАР.

Приращение фазы между элементами антенной решетки по горизонтали $\Delta\varphi r_x^k$ определяется углом отклонения каждого луча ДН в данной плоскости:

$$\Delta\varphi r_x^k = \frac{2\pi \cdot f^k \cdot h_x \cdot \sin(\alpha^k)}{c}, \qquad (2.5)$$

где k – номер канала; угловое направление α^k определяется условиями визирования в конкретном режиме съемки в соответствии с угловым направлением излучения k-ого зондирующего субимпульса.

Описанный алгоритм многоканальной обработки сигналов реализует алгоритм цифрового формирования азимутальной ДН на прием. Поскольку излучение зондирующего субимпульса и прием эхо-сигнала производятся в одном и том же азимутальном направлении и этим сигналам соответствует одинаковая несущая частота (на которую настроен канал обработки и цифрового формирования ДН на прием) то в дальнейшем рассмотрении многолучевого визирования будем полагать, что наблюдение осуществляется несколькими приемо-передающими лучами АФАР, каждый из которых направлен под азимутальным углом α^k к нормали, работает с сигналом на несущей частоте f^k и после регистрации на прием поступает в соответствующий канал обработки.

2.4 Анализ техники многолучевого приема сигнала в РСА

При описанном подходе в каждый из K независимых антенных лучей имеет угловые размеры обычной приемо-передающей ДН АФАР, а, значит, в каждом из цифровых лучей ДН обеспечивается аналогичный по ширине доплеровский спектр частот $\Delta F_д^k$ (ширина Доплеровского спектра, возникающего за счет движения РСА, охватываемого областью главного лепестка одного луча ДН) (рисунок 2.11).

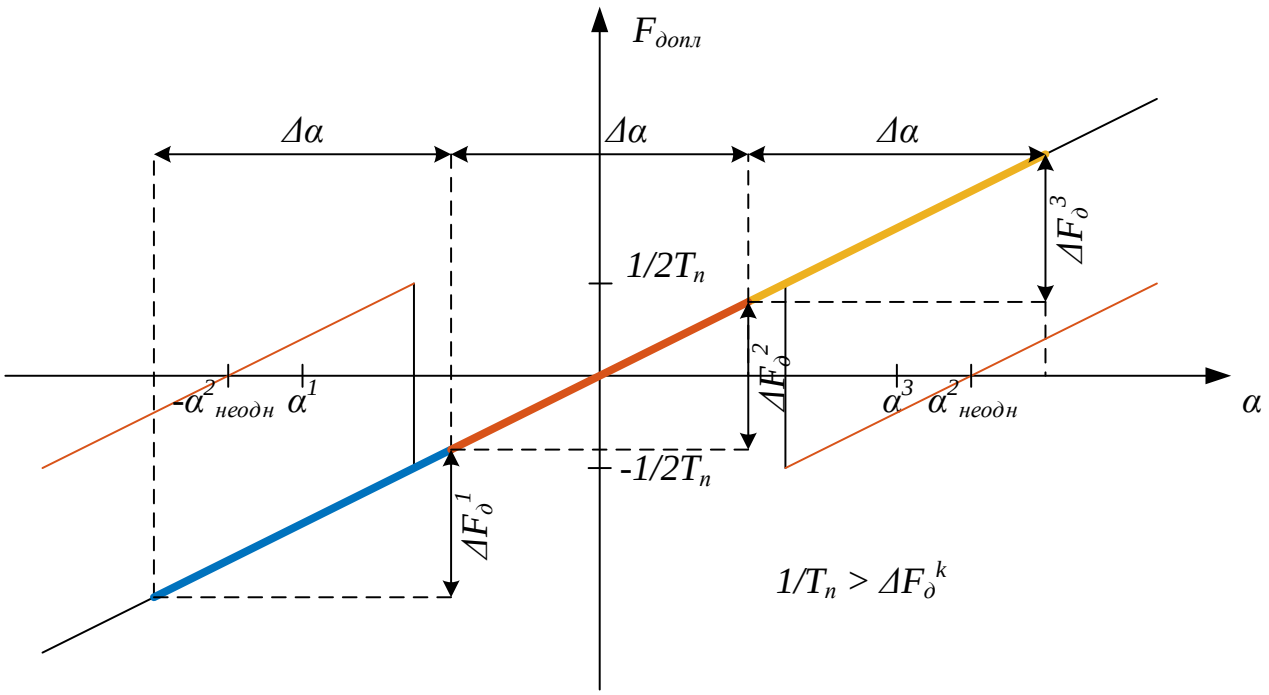

Рисунок 2.11 – Доплеровский спектр многолучевого визирования при K = 3

Ширина спектра доплеровских частот $\Delta F_д^k$ и угловой шаг разнесения зон неоднозначности $\alpha^k_{неодн}$ (угловой интервал по азимуту, в котором визируется вся ширина доплеровского спектра частот создающего неоднозначность по азимуту) в каждом из K лучей определяется аналогично однолучевому режиму визирования:

$$\Delta F_д^k \approx \frac{2V}{\lambda^k} \cdot \Delta\alpha^k, \tag{2.6}$$

где V – линейная скорость движения РСА; λ – длина волны; $\Delta\alpha^k$ – ширина ДН k-ого луча в азимутальной плоскости,

$$\Delta\alpha_{неодн}^k = \frac{\lambda^k}{2 \cdot V \cdot T_n} \tag{2.7}$$

где T_n – период повторения зондирующих импульсов.

Уровень неоднозначности, обусловленный излучением и приемом сигналов данным лучом ДН оценивается в этом случае по соотношениям (1.13)-(1.14). Однако с угловых направлений, в которых расположены зоны неоднозначности, боковыми лепестками рассматриваемого приемного луча ДН будут

регистрироваться относительно интенсивные помеховые эхо-сигналы, порожденные соседними передающими лучами, что будет увеличивать уровень азимутальной неоднозначности.

Неоднозначность по азимуту, вызванная одновременным приемом сигналов с разных направлений несколькими лучами при азимутальном разнесении приемных цифровых ДН, подавляется за счет частотного разнесения приемных каналов. В данном случае имеет место оценка межканальной неоднозначности, анализ которой представлен в разделе 2.5.

Азимутальная ориентация приёмо-передающих лучей и их параллельная обработка приводят к увеличению визируемого участка местности в K раз по путевой дальности. Это дает возможность увеличить время синтеза апертуры в каждом из лучей (по сравнению с однолучевым визированием) и, тем самым, повысить характеристики визирования в прожекторном и сканирующем режимах съемки по сравнению с однолучевой системой РСА. Построение режимов съемки на базе многолучевого визирования рассматривается в главе 3.

Использование полноразмерной передающей и приемной апертуры, сохраняющих коэффициент усиления излучающей системы при формировании лучей, является неоспоримым преимуществом перед технологиями, основанными на применении различных форм ДН на излучение и прием, (например сканирование на прием (SCORE), описанной в разделе 1.4). Однако необходимо принимать во внимание, что сокращение длительности зондирующего субимпульса, (по сравнению с однолучевой системой РСА) в соответствии с выражением (2.1), ведет к уменьшению мощности зондирующего субимпульса по сравнению однолучевым вариантом визирования примерно в K раз и, следовательно, к соответствующим энергетическим потерям в многолучевом визировании:

$$P_{loss} = \frac{\tau_{зи} - (K-1)\cdot \Delta\tau_{си}}{\tau_{зи}\cdot K}. \qquad (2.8)$$

Параллельная обработка сигналов для цифрового формирования лучей ведет к повышению в *K* раз информационного потока на выходе каждого ЦРМ (по сравнению с однолучевыми режимами визирования), а значит и всей системы РСА в целом.

2.5 Оценка уровня межканальной неоднозначности

Как отмечалось выше, в цифровой АФАР происходит одновременная регистрация сигналов, приходящих с *K* азимутальных направлений. Пространственная селекция на прием обеспечивается ориентированием луча, соответствующего данному каналу обработки, в направлении источника эхо-сигнала данного канала.

Рассмотрим процесс пространственной селекции на прием и образования межканальной неоднозначности на примере луча 2 (рисунок 2.12), уровень неоднозначности которому увеличивает луч 1 (при визировании двумя антенными лучами). Главный и боковые лепестки луча 2 (оранжевый) обеспечивают относительно интенсивный уровень принимаемого эхо-сигнала с азимутального направления, в котором соседним лучом 1 был излучен зондирующий сигнал. При этом, после цифрового формирования луча 2, в отсчеты сигнала, зарегистрированные лучом 2, содержат как полезный сигнал (который был излучён и принят лучом 2), так и сигнал, порожденный соседним антенным лучом 1 (при излучении зондирующего сигнала в данном направлении) и принятый лучом 2. Если данный помеховый сигнал приходит с углового направления в которой находится зоны неоднозначности по азимуту и/или с направления главного максимума рассматриваемого луча 2, то данный сигнал образует межканальную неоднозначность.

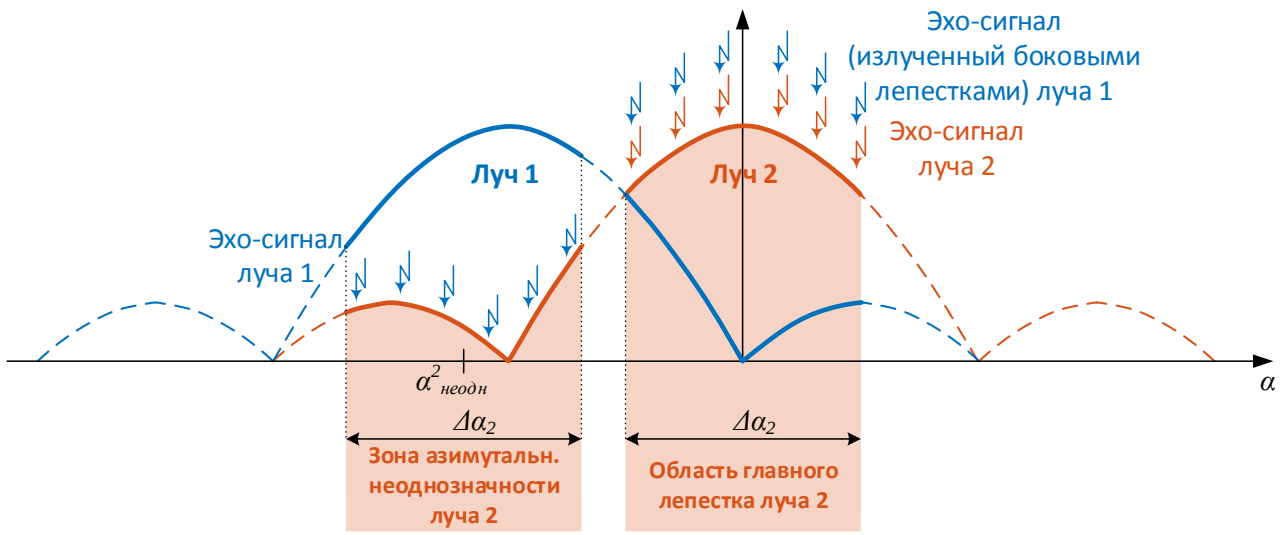

Рисунок 2.12 – Принцип образования межканальной неоднозначности

В данном случае уровень межканальной неоднозначности по азимуту, вызванных близким расположением лучей, оценивается следующим соотношением:

$$A_{мк}=\frac{\sum_k\sum_n\int_{-\frac{\Delta\alpha}{2}+n\cdot\Delta\alpha_{неодн}}^{\frac{\Delta\alpha}{2}+n\cdot\Delta\alpha_{неодн}} Ft_x^k(\theta)\cdot Fr_x(\theta)d\theta}{\int_{-\frac{\Delta\alpha}{2}}^{\frac{\Delta\alpha}{2}} Ft_x(\theta)\cdot Fr_x(\theta)d\theta} \qquad (2.9)$$

где $Ft_x(\theta)$ и $Fr_x(\theta)$ – ДН рассматриваемого луча на излучение и прием в азимутальной плоскости, $Ft_x^k(\theta)$ – ДН соседнего луча на передачу, k – номер антенного луча (для всех k кроме антенного луча, для которого оценивается уровень межканальной неоднозначности), n = -1, 0, 1 – порядковый номер зоны неоднозначности (где при $n < 0$ – зона неоднозначности находится в области отрицательных значений α, при $n = 0$ – случай когда зона межканальной неоднозначности попадает в область главного лепестка рассматриваемого луча ДН, при $n > 0$ – зона неоднозначности находится в области положительных значений α), $Fx_k(\alpha)$ – ДН соседнего луча в азимутальной плоскости, образующего

межканальную неоднозначность, $Fx(\alpha)$ – ДН на прием рассматриваемого антенного луча в азимутальной плоскости.

На рисунке 2.13 представлена зависимость уровня межканальной неоднозначности для случая визирования K = 4 антенными лучами (рисунок 2.14) рассматриваемой системы РСА от величины азимутального интервала угловго разноса следования ДН (углового интервала между направлениями максимумов ДН соседних антенных лучей) при величине периода повторения T_n = 210 мкс.

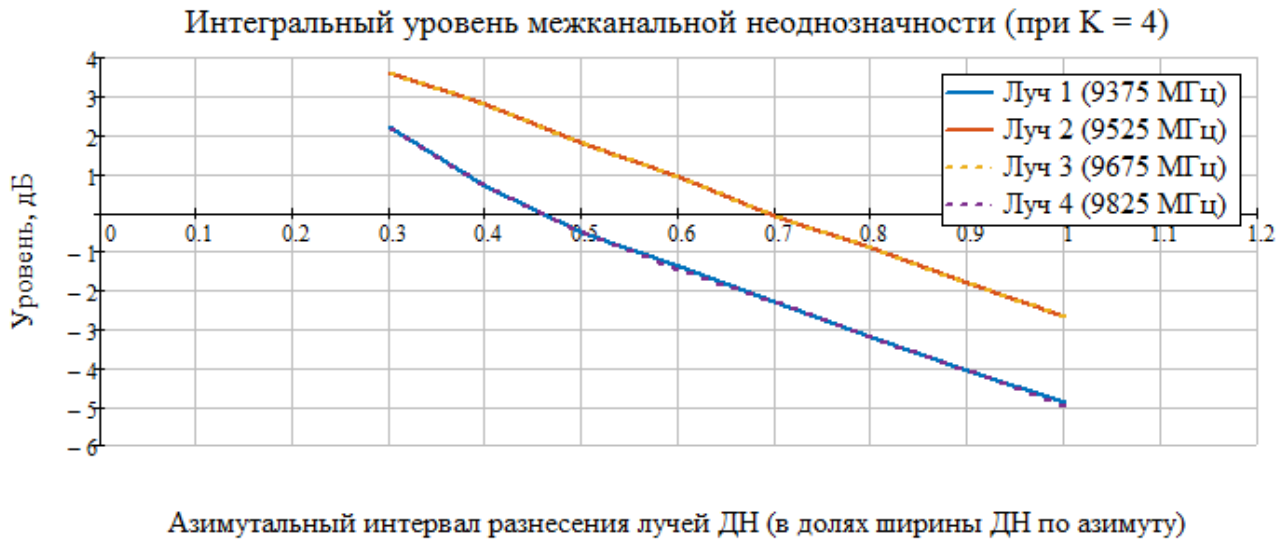

Рисунок 2.13 – Уровень межканальной неоднозначности при различном интервале следования лучей ДН по азимуту (при K = 4)

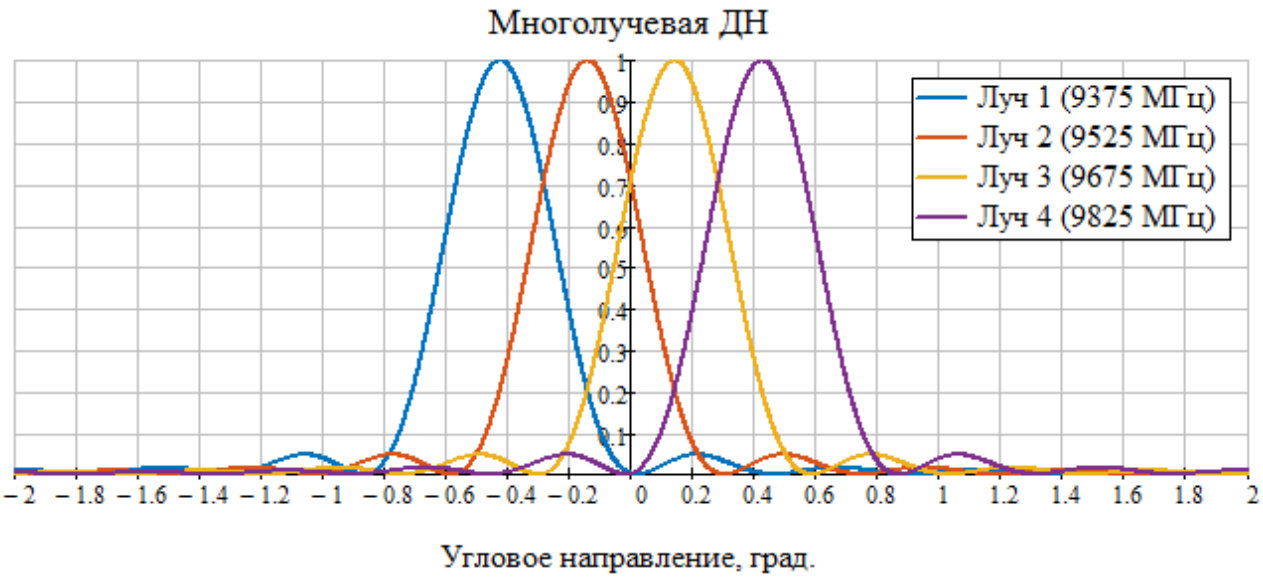

Рисунок 2.14 – Амплитудная многолучевая ДН при K = 4 и угловом интервале следования лучей ДН равному ширине главного лепестка одного луча ДН

Интегральный уровень межканальной неоднозначности пропорционален числу антенных лучей, поэтому для исследования величины данного параметра рассмотрен случай визирования всеми K = 4 антенными лучами, доступными для использования в рассматриваемой системе РСА. Уровень межканальной неоднозначности внутренних лучей (k = 2, 3) составляет -2,5…3,5 дБ – что значительно превосходит условие приемлемого уровня неоднозначности -20 дБ.

Как указывалось в разделах 2.2 - 2.3 при формировании многоканальной обработки на излучение вводится частотное разделение субимпульсов, а на прием – низкочастотная фильтрация. Сигналы соседних приемных каналов (лучей) отличаются номиналом поднесущей частоты f_k поэтому эффективное подавление межканальной неоднозначности достигается в цифровом ФНЧ приемного тракта, как было показано на рисунке 2.9, при этом ФНЧ с идентичными характеристиками может быть применен во всех каналах обработки.

Полоса пропускания $\Delta F_{ФНЧ}$ ФНЧ согласуется с максимальной шириной полосы канала обработки $\Delta F_{кан} \leq \Delta F_{ФНЧ}$, переходная полоса ФНЧ $\Delta F_{перех}$ согласуется с защитным частотным интервалом между соседними спектрами $\Delta F_{мк} = \Delta F_{перех}$ вводимых при формировании зондирующего сигнала (раздел 2.2) –

что ведет к прямой зависимости характеристик многолучевого визирования от характеристик ФНЧ (рисунок 2.15), поскольку ширина спектра зондирующего сигнала определяет разрешающую способность по горизонтальной дальности.

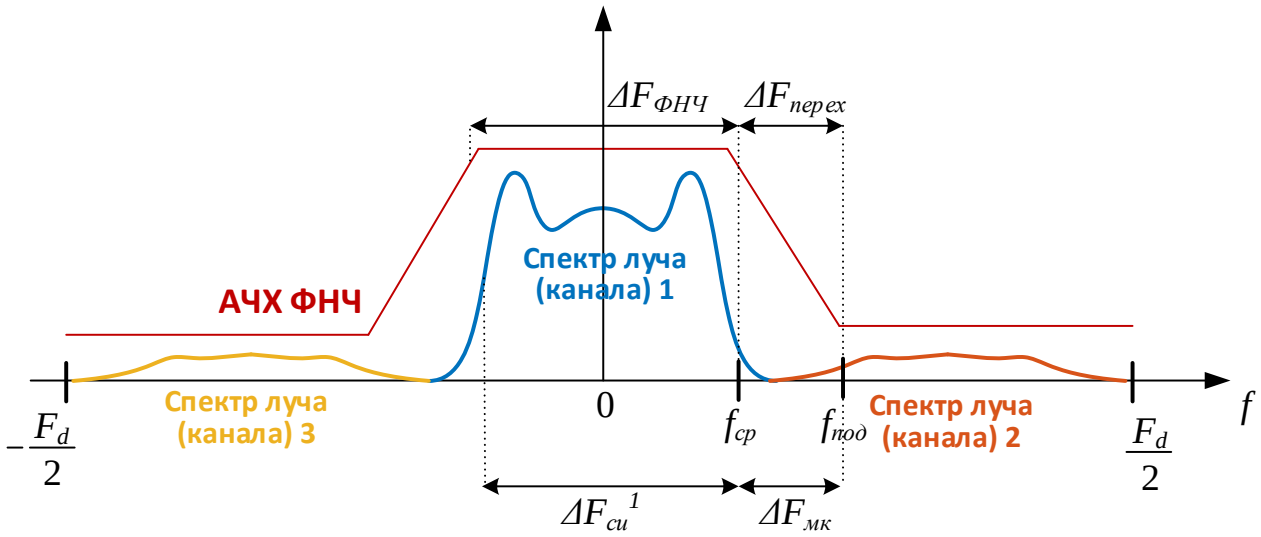

Рисунок 2.15 – Характеристики ФНЧ тракта обработки одного канала при использовании максимально допустимой полосы сигнала ($\Delta F_{си} = \Delta F_{ФНЧ}$)

Обрабатываемые цифровые сигналы в РСА представлены в комплексной форме (отсчетами каналов I и Q), поэтому на рисунке 2.15 спектр отображен в положительной и отрицательной области частот в диапазоне от $-F_d/2$ до $F_d/2$. При использовании максимальной допустимой, с учетом соотношения (2.2), ширины спектра субимпульсов, устанавливается следующая зависимость между величиной частоты среза ФНЧ $f_{срез}$, шириной частотной полосы приемо-передающего тракта РСА тракта $\Delta F_{тракт}$, количеством используемых лучей многолучевого режима съемки K и защитным частотным интервалом $\Delta F_{мк}$:

$$f_{ср} = \frac{\Delta F_{тракт} - (K-1)\cdot \Delta F_{мк}}{2\cdot K} \qquad (2.10)$$

ФНЧ должен обеспечивать требуемое затухание спектральных составляющих соседних каналов на частотах выше частоты подавления $f_{под}$. Значение частоты подавления определяется следующим соотношением:

$$f_{под}=f_{ср}+\Delta F_{мк}\,. \qquad (2.11)$$

Поскольку для расчета фильтра задается ряд исходных данных (частота среза, неравномерность амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в полосе пропускания и т.д.), то синтез ФНЧ представляет собой задачу оптимизации значений входных параметров и выходных величин (ширина полосы зондирующего субимпульса $\Delta F_{си}$ и ширина частотного интервала $\Delta F_{мк}$), определяющих характеристики радиолокационного визирования.

Номиналы поднесущих частот f^k каждого субимпульса определяется по следующему правилу:

$$f^{k}=F_0+\frac{1}{2}\Delta F_{кан}+\left(k-1\right)\cdot\left(\Delta F_{кан}+\Delta F_{мк}\right)-\frac{1}{2}\cdot\Delta F_{тракт} \qquad (2.12)$$

где $k = 1\ldots K$; F_0 – центральная частота выделенного частотного диапазона; $\Delta F_{кан}$ – максимальная полоса одного канала обработки эхо-сигнала (одного луча):

$$\Delta F_{кан}=\frac{\Delta F_{тракт}-\left(K-1\right)\cdot\Delta F_{мк}}{K} \qquad (2.13)$$

Соотношения (2.12) и (2.13) определяют частотный портрет многолучевого режима съемки, поскольку величина защитного частотного интервала $\Delta F_{мк}$ определяется шириной переходной полосы ФНЧ, то качество данного фильтра будет во многом определять способность системы по работе с широкополосными сигналами (субимпульсами).

Как отмечалось при рассмотрении рисунка 2.11, азимутальная и межканальная неоднозначность порождаются одними и теми же участками земной поверхности. Алгоритм оценки уровня межканальной неоднозначности реализуется следующими соотношениями для оценки уровня неоднозначности по азимуту в пределах одного антенного луча ДН (учитывающее специфику многолучевого визирования в соответствии с выражением (2.9)) с учетом обработки отсчетов эхо-сигнала в ФНЧ:

$$A_x=\frac{\frac{A_{stop}}{A_{pass}}\cdot L_{мк}+L_{неодн}}{L_{сиг}} \qquad (2.14)$$

где A_{pass} и A_{stop} – коэффициенты усиления ФНЧ, соответственно, в полосе пропускания и полосе подавления, подставляемые в разах,
$L_{мк}$ – относительный уровень межканальной неоднозначности (вызванной близким расположением приемо-передающих лучей), определяемый по форме многолучевой ДН:

$$L_{мк}=\sum_{k}\sum_{n}\int_{-\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}+n\cdot\alpha_{неодн}}^{\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}+n\cdot\alpha_{неодн}} Ft_x^k(\theta)\cdot Fr_x(\theta)d\theta \qquad (2.15)$$

где $\Delta\alpha_{допл}$ – визируемый главным лучом ДН азимутальный угловой сектор в котором формируется доплеровский спектр частот, $\alpha_{неодн}^k$ – угловое положение зоны неоднозначности по азимуту (в соответствии с соотношением (2.7)), n – номер зоны доплеровской неоднозначности (обычно не более $n = \pm1$), $Ft_x^k(\theta)$ – азимутальная ДН k-ого луча на передачу по мощности, $Fr_x(\theta)$ – азимутальная ДН рассматриваемого луча по мощности;
$L_{неодн}$ – уровень сигнала неоднозначности (вызванной собственной формой ДН), определяемый по форме ДН рассматриваемого приемо-передающего луча:

$$L_{неодн}=\sum_{n}\int_{-\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}+n\cdot\Delta\alpha_{неодн}}^{\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}+n\cdot\Delta\alpha_{неодн}} Ft_x(\theta)\cdot Fr_x(\theta)d\theta \qquad (2.16)$$

где n = ±1;
$L_{сигн}$ – уровень полезного сигнала, определяемый по форме ДН рассматриваемого приемо-передающего луча:

$$L_{сигн}=\sum_{n}\int_{-\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}}^{\frac{\Delta\alpha_{допл}}{2}} Ft_x(\theta)\cdot Fr_x(\theta)d\theta \qquad (2.17)$$

Подавление межканальной неоднозначности в ФНЧ, должно обеспечивать общий уровень доплеровской неоднозначности не хуже -20 дБ. Для формирования требований к АЧХ ФНЧ необходимо предварительно определить уровень межканальной неоднозначности по соотношениям (2.14)-(2.17).

Уровень межканальной неоднозначности снижается с уменьшением периода повторения зондирующих импульсов – поскольку в этом случае расширятся полоса однозначно наблюдаемого доплеровского спектра частот в соответствии с соотношением (2.7). На рисунке 2.16 представлена зависимость уровня межканальной неоднозначности от периода повторения для случая визирования $K = 4$ лучами (из примера на рисунке 2.14 одного луча ДН).

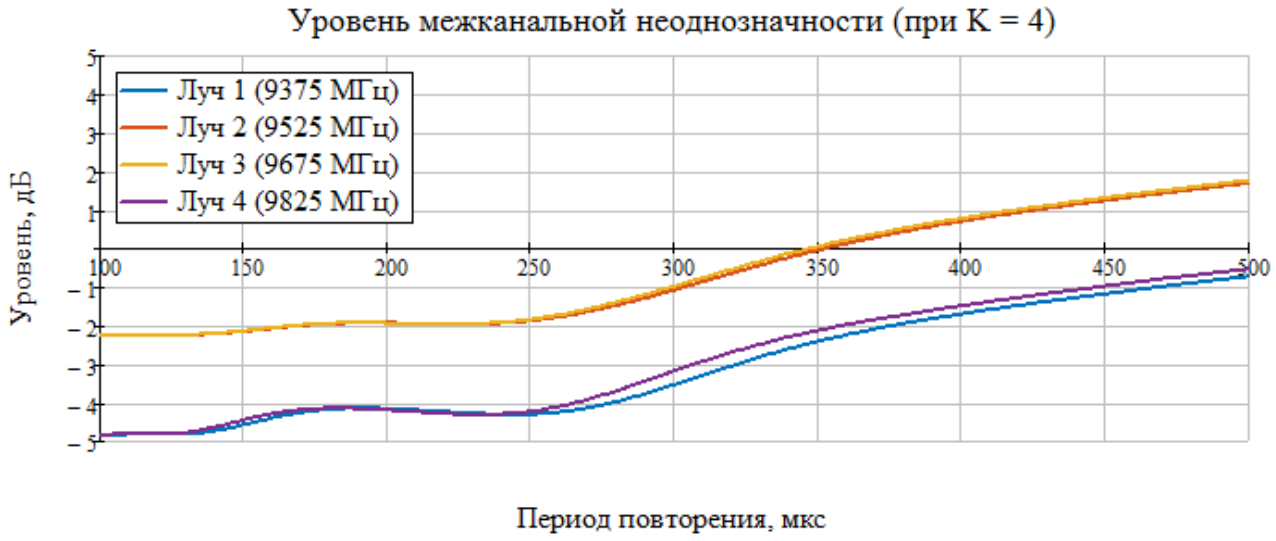

Рисунок 2.16 – Зависимость уровня межканальной неоднозначности от величины периода повторения для случая $K = 4$ лучей, следующих с угловым интервалом, равным ширине одного луча ДН

Данная зависимость получена для случая разнесения лучей ДН на величину ширины одного луча ДН в горизонтальной плоскости и должна учитываться при выборе рабочего периода повторения зондирующего сигнала с учетом взаимного расположения антенных лучей при реализации режима многолучевой съемки. При уменьшении величины азимутального разнесения приемо-передающих лучей ДН уровень межканальной неоднозначности увеличится на 5…6 дБ (рисунок 2.13). Условие однозначного наблюдения всего спектра доплеровских частот накладывает ограничение на выбор периода повторения $T_n \leq 268$ мкс. При данном периоде достигается относительный уровень межканальной неоднозначности не

более -1,5 дБ (в соответствии с рисунком 2.16). Общее подавление в полосе подавления ФНЧ, с учетом запаса на 6 дБ, должно составлять около 30 дБ.

Для варианта 4-лучевого визирования с использованием приложения Filter Design & Analysis Tool программного пакета MATLAB автором синтезирован ФНЧ с конечной импульсной характеристикой (КИХ), удовлетворяющий условию линейности фазо-частотной характеристики (ФЧХ) [90] с полосой пропускания $\Delta F_{ФНЧ}$ = 127 МГц (то есть максимальная допустимая полоса одного зондирующего субимпульса составит $\Delta F_{кан}$ = 12 МГц) и переходной полосой $\Delta F_{перех}$ = $\Delta F_{мк}$ = 23 МГц. На рисунке 2.17 представлена амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и ФЧХ фильтра. Характеристики синтезированного фильтра представлены в таблице 2.3.

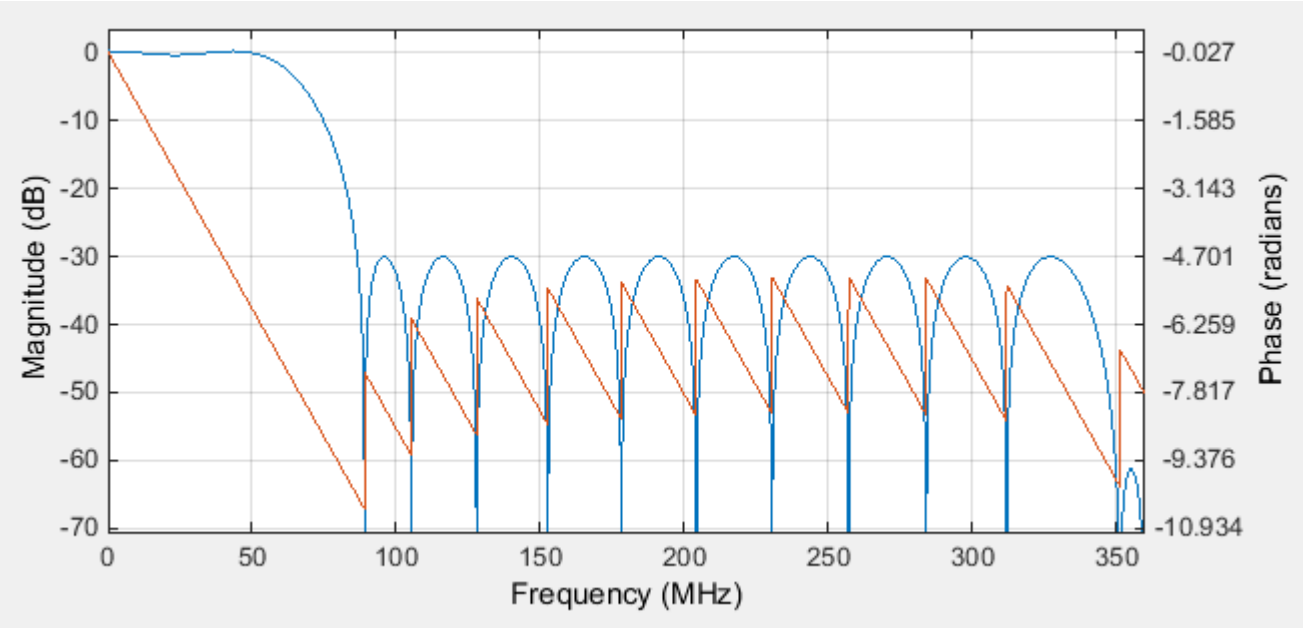

Рисунок 2.17 – АЧХ (синяя) и ФЧХ (оранжевая) ФНЧ

Таблица 2.3 – Характеристики КИХ-фильтра для случая K = 4

Параметр	Значение
Тип фильтра	КИХ
Порядок	27
Количество отсчетов импульсной характеристики	28
Частота дискретизации	720 МГц
Неравномерность АЧХ в полосе пропускания	±0,3 дБ
Частота среза (по уровню АЧХ минус 3 дБ)	63,5 МГц
Частота подавления	86,5 МГц
Уровень АЧХ в полосе пропускания, A_{pass}	0 дБ
Уровень АЧХ в полосе подавления, A_{stop}	-30 дБ
Ширина переходной полосы, $\Delta F_{перех}$	23 МГц

Данный фильтр также обужает спектр сигнала перед операцией прореживания отсчетов сигнала данного канала обработки, как было показано на рисунке 2.9. Полученное значение затуханий в полосе задерживания A_{stop} по результатам синтеза ФНЧ будет определять величину дополнительного ослабления межканальной неоднозначности.

ФНЧ может обладать и более узкой переходной полосой, чем в представленном примере, для этого, например, может быть увеличен его порядок (длина импульсной характеристики). Однако это выливается в повышение требований к ресурсам ПЛИС, реализующей низкочастотную фильтрацию [91].

В соответствии с соотношением (2.12) получаем следующие номиналы поднесущих частот: f_1 = 9367,5 МГц, f_2 = 9522,5 МГц, f_3 = 9677,5 МГц, f_4 = 9832,5 МГц.

При функционировании РСА ширина полосы зондирующего субимпульса ΔF (соотношение (1.10)) может быть меньше ширины полосы пропускания ФНЧ, то есть не должна превышать максимальную полосу одного канала обработки сигнала в МФОС $F_{кан}$ (соотношение (2.13)):

$$\Delta F_{кан} \geq \frac{c}{2 \cdot l_z \cdot Ks \cdot sin(\varepsilon)} \tag{2.18}$$

Ширина полосы одного канала $\Delta F_{кан}$ определяет максимальное разрешение по горизонтальной дальности при использовании сигналов с ЛЧМ. При формировании равновеликой сетки разрешения РЛИ по путевой и горизонтальной дальности обеспечивают равенство соответствующих разрешающих способностей $l_x = l_z$, то есть увеличение числа формируемых лучей, ведущее к повышению разрешения по путевой дальности, ограничивает максимальную полосу сигнала, что, в свою очередь, ведет к ограничению максимально реализуемой разрешающей способности по горизонтальной дальности:

$$l_z \geq \frac{K \cdot c}{2 \cdot Ks \cdot sin(\varepsilon) \cdot \left(\Delta F_{тракт} - \left(K - 1\right) \cdot \Delta F_{мк}\right)} \qquad (2.19)$$

Данное обстоятельство должно учитываться при реализации многолучевых режимов съемки. На рисунке 2.18 представлена зависимость предельного реализуемого разрешения по горизонтальной дальности рассматриваемой системы РСА в зависимости от количества используемых антенных лучей в соответствии с соотношением (2.13).

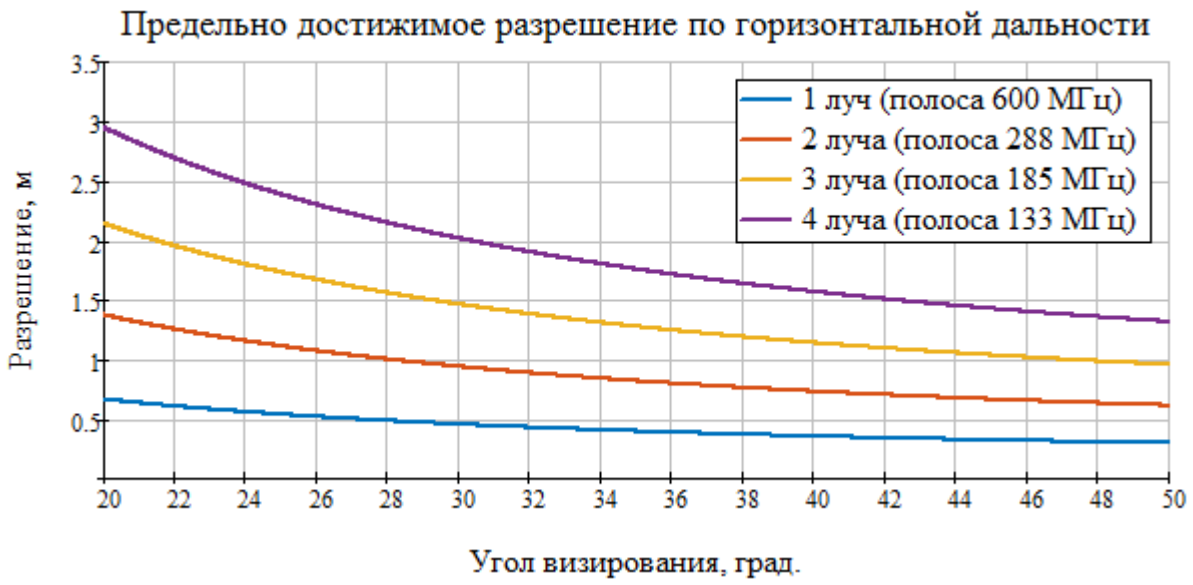

Рисунок 2.18 – Предельно достижимое разрешение по горизонтальной дальности в зависимости от угла визирования при различном количестве используемых антенных лучей

Реализуемое разрешение, в данном примере, практически обратно пропорционально числу используемых лучей. Однако влияние ширины переходной полосы фильтра может оказывать более существенное влияние на величину реализуемого поперечного разрешения в РСА, где ширина полосы тракта меньше, чем в рассматриваемой системе или при переходе в другие частотные диапазоны, где отведенная полоса частот значительно меньше. Также, для соблюдения идентичной разрешающей способности по путевой дальности (определяемой протяженностью апертуры синтеза) и по горизонтальной дальности, необходимо согласовывать величину апертуры синтеза каждого луча с полосой зондирующего субимпульса.

2.6 Анализ аналогового тракта АФАР при многолучевом визировании

Вертикальная антенная решетка в исследуемой системы РСА представлена аналоговым трактом из 64-х приемо-передающих каналов с шагом h_y = 0,025 м. Приращение фаз между элементами решетки, задаваемое фазовращателям, определяется соотношением:

$$\Delta\varphi t_y^k = \frac{2\pi \cdot f^k \cdot h_y \cdot \sin(\theta t_y)}{c}, \qquad (2.20)$$

где f^k – центральная частота излучаемого зондирующего субимпульса, c – скорость распространения радиоволн, θt_y^k – угол отклонения луча ДН в вертикальной плоскости.

Поскольку зондирующие субимпульсы следуют на различных несущих частотах и излучаются последовательно, то своевременная перестройка фазовращателей антенной решетки (в соответствии с центральной частотой f_k субимпульса) позволяет реализовать излучение зондирующего сигнала в требуемом по вертикали направлении.

Однако, на прием эхо-сигналы от каждого азимутального направления поступают в АФАР одновременно, лишая возможности своевременной

подстройки фазовращателей для приема сигналов каждой частоты аналогично излучению.

Данный эффект, приводящий к отклонению приемных лучей ДН (каждый из которых реализует приём сигналов в своем азимутальном направлении на своей поднесущей частоте f^k) от заданного направления в вертикальной плоскости в обусловлен частотной дисперсией АФАР на прием (зависимостью углового положения луча от несущей частоты). На рисунке 2.19 представлена конфигурация приёмо-передающей многолучевой ДН в вертикальной плоскости при номинальном отклонении луча ДН на угол -15°, полученная по результатам моделирования.

Рисунок 2.19 – Многолучевая приемо-передающая ДН в вертикальной плоскости при номинальном отклонении лучей на угол -15° в вертикальной плоскости

Результирующая приемо-передающая ДН одного луча получает дополнительное отклонение по вертикали и дополнительные амплитудные потери. В случае настройки антенной решетки по вертикали на каждую из частот f_k, все лучи ДН в данном примере получили бы идентичное отклонение по вертикали на величину -15°. Получим количественную оценку данных эффектов.

При работе на прием, приращение фаз между элементами решетки определяется следующим соотношением:

$$\Delta\varphi r_y = \frac{2\pi \cdot F_0 \cdot h_y \cdot \sin(\theta r_y)}{c}, \qquad (2.21)$$

где F_0 – центральная частота всего рабочего частотного диапазона (в данном случае – частота на которую настроена АФАР по вертикали на прием), h_y – шаг антенной решетки по вертикали, θr_y – угол отклонения фазового фронта (отклонения луча ДН) в вертикальной плоскости на прием.

В случае приема сигнала с частотой f^k при неизменном приращении фаз между каналами $\Delta\varphi r_y$ и шаге антенной решетки h_y соотношение (2.21) преобразуется к следующему виду:

$$\Delta\varphi r_y = \frac{2\pi \cdot f^k \cdot h_y \cdot \sin(\theta r_y^k)}{c}. \qquad (2.22)$$

Из соотношений (2.21), (2.22) и с учетом корректного нацеливания луча ДН на излучение получаем следующую зависимость углового положения максимума приемо-передающей ДН для сигналов с частотой f^k при его регистрации в АФАР, каналы которого настроены на прием сигнала частотой F_0 с направления θ_{0y}:

$$\theta_y^k = \frac{1}{2} \cdot \left(\arcsin\left(\frac{F_0}{f^k} \cdot \sin\left(\theta_{0y}\right) \right) + \theta_{0y} \right). \qquad (2.23)$$

Полная ширина многолучевой ДН в вертикальной плоскости (за счет данного эффекта):

$$\Delta\varepsilon_{полн} = \frac{1}{2} \cdot \left| \arcsin\left(\frac{F_0}{min(f)} \cdot \sin\left(\theta_{0y}\right) \right) - \arcsin\left(\frac{F_0}{max(f)} \cdot \sin\left(\theta_{0y}\right) \right) \right| + \Delta\varepsilon, \qquad (2.24)$$

где $\Delta\varepsilon$ – номинальная ширина одного луча приемо-передающей ДН по вертикали.

Для количественной оценки данного отклонения, вызванного частотной дисперсией АФАР при приеме, выразим его в долях относительно ширины луча ДН в вертикальной плоскости $(\theta_y^k - \theta_{y0})/\Delta\varepsilon$. Рисунок 2.20 иллюстрирует зависимость ошибки нацеливания приемо-передающих лучей ДН, вызванную указанным эффектом, при использовании номиналов поднесущих частот полученными в разделе 2.5, отличных от частоты на которую настроена АФАР на прием в зависимости от исходного отклонения лучей ДН в вертикальной плоскости.

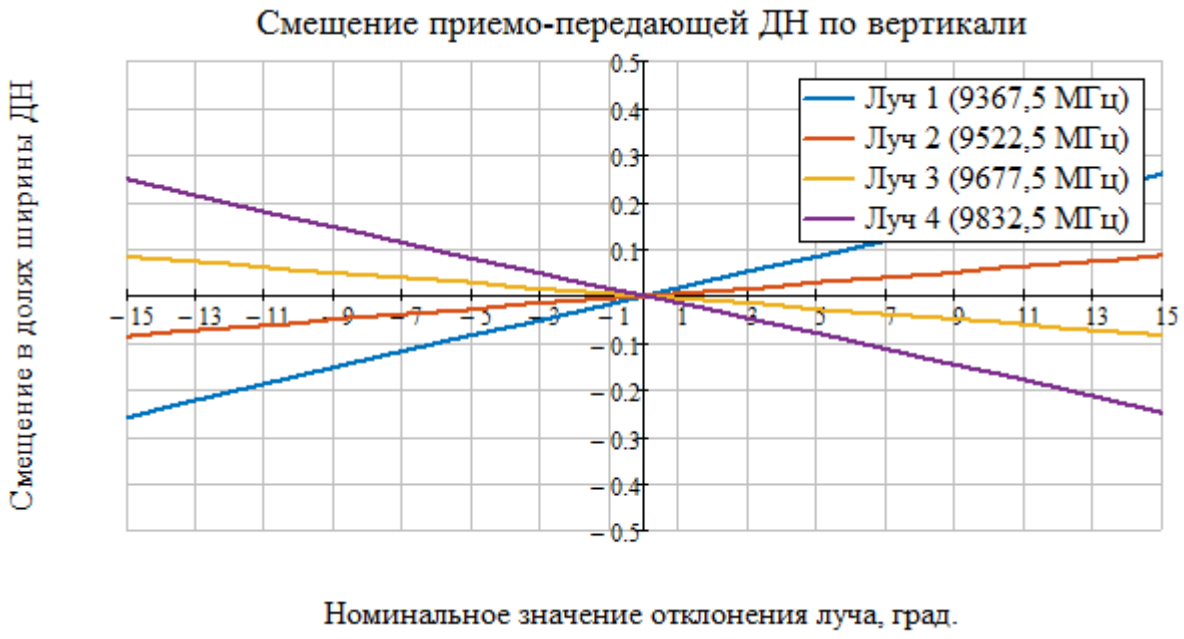

Рисунок 2.20 – Относительные отклонения (смещения) $(\theta_y^k - \theta_{y0})/\Delta\varepsilon$ приёмо-передающей ДН по вертикали за счет приема в АФАР сигнала с частотой, отличной от частоты на которую настроены фазовращатели

Проиллюстрируем влияние данного эффекта на характеристики радиолокационного визирования. Для этого в рамках диссертационного исследования автором разработана имитационная модель исследуемой РСА, позволяющая определить относительную интенсивность эхо-сигнала, отраженного от земной поверхности, с учетом характеристик и конфигурации аналого-цифрового тракта АФАР.

Данная модель реализует комплексное суммирование монохроматического эхо-сигнала по апертуре АФАР рассматриваемого РСА, порожденного отражением зондирующего сигнала (излученного АФАР) каждой точкой на поверхности Земли (в пределах границ моделирования данной поверхности). Моделирование проводится с учетом дискретов аналоговых и цифровых фазовращателей АФАР, а также возможных амплитудно-фазовых нестабильностей каналов АФАР. В результате формируется диаграмма расположения следа луча ДН на поверхности Земли, по которому оценивается размеры реализуемого кадра и амплитудные потери (в максимуме луча ДН и интегральные в пределах реализуемого кадра). Здесь под кадром понимается участок земной поверхности, границы которого определяются шириной ДН по вертикали и горизонтали – как для прожекторного режима съемки.

Также имеется возможность визуализации взаимного расположения кадров, формируемых в различных режимах съемки для подтверждения корректности функционирования бортовых алгоритмов. Подробное описание модели представлено в Приложении Приложение А.

На рисунке 2.21 представлено геометрическое расположение кадров на поверхности Земли (в координатах путевая-горизонтальная дальность) при перекрытии азимутальных ДН по уровню минус 3 дБ и использованию номиналов поднесущих частот, полученных в разделе 2.5; кадры расположены на ближнем краю полосы обзора (отклонение луча ДН по вертикали -15°). На рисунке 2.21 указаны геометрические размеры каждого кадра (определяемые по ширине каждого луча ДН по уровню минус 3 дБ от максимума) по путевой и горизонтальной дальности, потери в максимуме ДН и интегральный уровень по всему кадру.

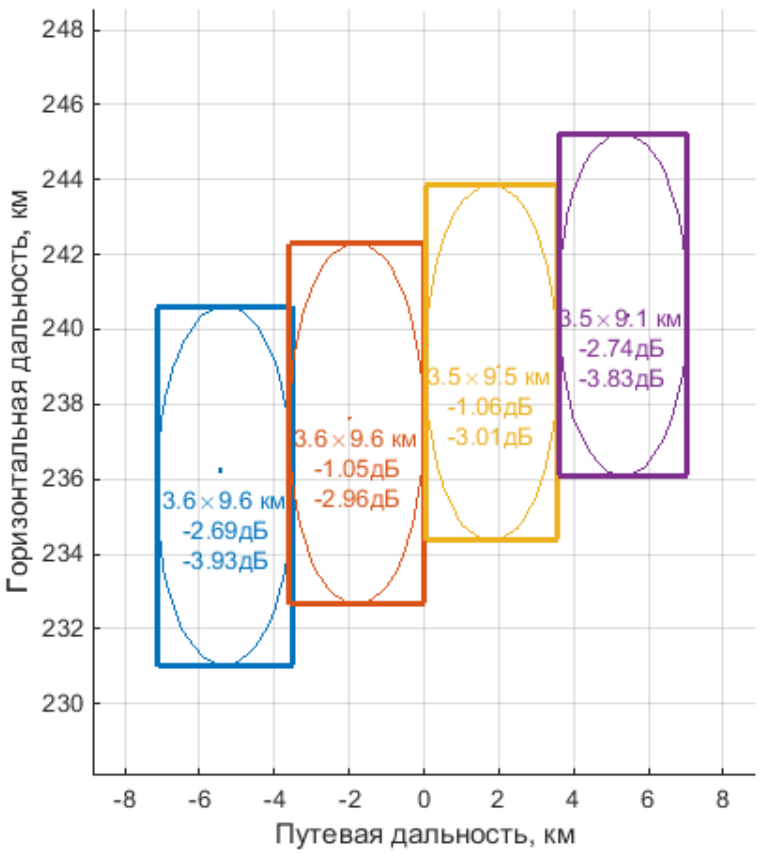

Рисунок 2.21 – Расположение кадров на поверхности Земли образованные K = 4 антенными лучами (Синий – луч 1 (9367,5 МГц); оранжевый – луч 2 (9522,5 МГц); желтый – луч 3 (9677,5 МГц); фиолетовый – луч 4 (9832,5 МГц)).

Эффективная ширина многолучевой ДН в вертикальной плоскости, в пределах которой формируется прямоугольный участок местности:

$$\Delta\varepsilon_{эфф} = \Delta\varepsilon_{ном} - \frac{1}{2}\cdot\left|\arcsin\left(\frac{F_0}{min(f)}\cdot\sin\left(\theta_{0_y}\right)\right) - \arcsin\left(\frac{F_0}{max(f)}\cdot\sin\left(\theta_{0_y}\right)\right)\right| \quad (2.25)$$

,

Как было показано в разделе 1.2 полоса захвата при радиолокационной съемке представляет собой прямоугольный участок местности. В случае, представленном на рисунке 2.21 поперечная протяженность полосы съемки сократится с $Lз_z^{ном}$ = 9,6 км (в соответствии с соотношением (1.8)) до Lc_z = 4,5 км

(диапазон горизонтальных дальностей 236,1 км … 240,6 км). В этом случае эффективная полоса съемки выражается следующим соотношением:

$$L_{c_{эфф\,z}}(\varepsilon) = L\left(\varepsilon + \frac{\Delta\varepsilon_{эфф}}{2}\right) - L\left(\varepsilon + \frac{\Delta\varepsilon_{эфф}}{2}\right), \qquad (2.26)$$

где $Lл$ – горизонтальная дальность в соответствии с выражением (1.3), ε – угол визирования, $\Delta\varepsilon_{эфф}$ – эффективная ширина ДН в соответствии с выражением (2.25) вычисляемое для угла отклонения θ_{0y}, реализующего нацеливание ДН на угол визирования ε:

$$\theta_{0_y} = \varepsilon - \varepsilon_{кр}, \qquad (2.27)$$

где $\varepsilon_{кр}$ – угол крена, под которым ориентирована апертура АФАР РСА.

Величина эффективной полосы съемки, в соответствии с выражением (2.26) для данных условий визирования в рассматриваемой системе РСА составляет 4,7 км – что совпадает с результатами моделирования, ошибка не превышает 4%.

Представленные соотношения реализуют алгоритм алгоритмы оценки влияния частотной дисперсии АФАР на геометрию радиолокационного визирования. Для компенсации указанного сокращения полосы съемки возможно снизить уровень, по которому отсчитывается ширина ДН антенны по вертикали – то есть допустить дополнительные энергетические потери на краю полосы съемки в пользу расширения ширины луча ДН. Данная мера применима при реализации конкретного режима съемки с одновременным контролем энергетических и геометрических характеристик.

Дополнительные амплитудные потери, вызванные эффектом частотной дисперсии АФАР на прием, оцениваются по форме приемо-передающей ДН АФАР по вертикали:

$$A_{loss}{}^{k} \approx Ft_y\left(\theta t_y^k - \theta_{0_y}\right) \cdot Fr_y\left(\theta r_y^k - \theta_{0_y}\right), \qquad (2.28)$$

где $Ft_y(\theta)$ и $Fr_y(\theta)$ – ДН АФАР, соответственно, на излучение и прием в вертикальной плоскости (без отклонения), $\theta t_y{}^k$ и $\theta t_y{}^k$ – угловое положение максимумов, соответственно, передающей и приемной ДН, определяемое по соотношению (2.23), θ_{0y} – номинальное значение отклонения ДН по вертикали.

2.7 Выбор рабочего периода повторения зондирующих импульсов

Как было указано выше (раздел 2.5), величина периода повторения T_n влияет на уровень неоднозначности РСА и должна выбираться с учетом времени прихода надирных помех и эхо-сигнала от визируемого участка местности [38]. Алгоритм выбора рабочего значения периода повторения разбивается на два этапа: 1) определение диапазона допустимых значений периода повторения по результатам анализа расчётного уровня неоднозначности; 2) расчет рабочего значения периода повторения на основе исходных данных на радиолокационную съемку [93].

На первом этапе определяются границы допустимых значений периодов повторений [$T_{Пmin}$ $T_{Пmax}$] исходя из соблюдения порогового уровня неоднозначности, например, не более -20 дБ, а также определяется оптимальное значение периода $T_{Пopt}$ при котором уровень неоднозначности минимален в рамках данного диапазона. На рисунке 2.22 представлены зависимости уровня дальностной, доплеровской и суммарной неоднозначности в зависимости от периода повторения зондирующих импульсов при угле визирования ε = 30°, полученные в соответствии с выражениями (1.13), (2.14)-(2.17) с учетом характеристик ФНЧ, синтезированного в разделе 2.6. Зависимости получены при реализации разрешения 2 м для луча k=3 (в котором уровень доплеровской неоднозначности максимален) многолучевого режима визирования с формой ДН, представленной на рисунке 2.14.

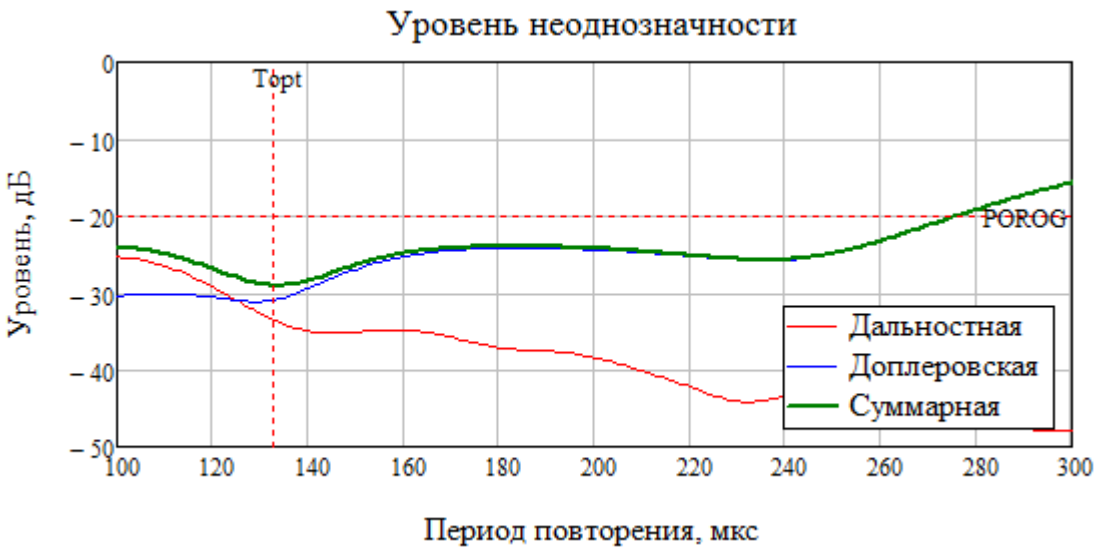

Рисунок 2.22 – Уровень неоднозначности в зависимости от периода повторения при угле визирования ε = 30°.

В данном случае уровень неоднозначности не превышает -20 дБ в диапазоне периодов 66 мкс … 275 мкс. Оптимальное значение периода, с точки зрения минимизации уровня неоднозначности, достигается при $T_{Попт}$ = 133 мкс (суммарный уровень неоднозначности -29,0 дБ). При этом зависимость суммарного уровня неоднозначности имеет еще один локальный минимум при $T_П \approx 235$ мкс (суммарный уровень неоднозначности -25,7 дБ).

Уровень неоднозначности по дальности увеличивается с ростом угла визирования ε. На дальнем краю полосы обзора допустимый диапазон периодов повторения существенно сокращается до 187 мкс … 270 мкс при ε = 47° (рисунок 2.23). Оптимальное значение периода повторения при данных условиях визирования $T_{Попт}$ = 232 мкс (суммарный уровень неоднозначности -22,6 дБ).

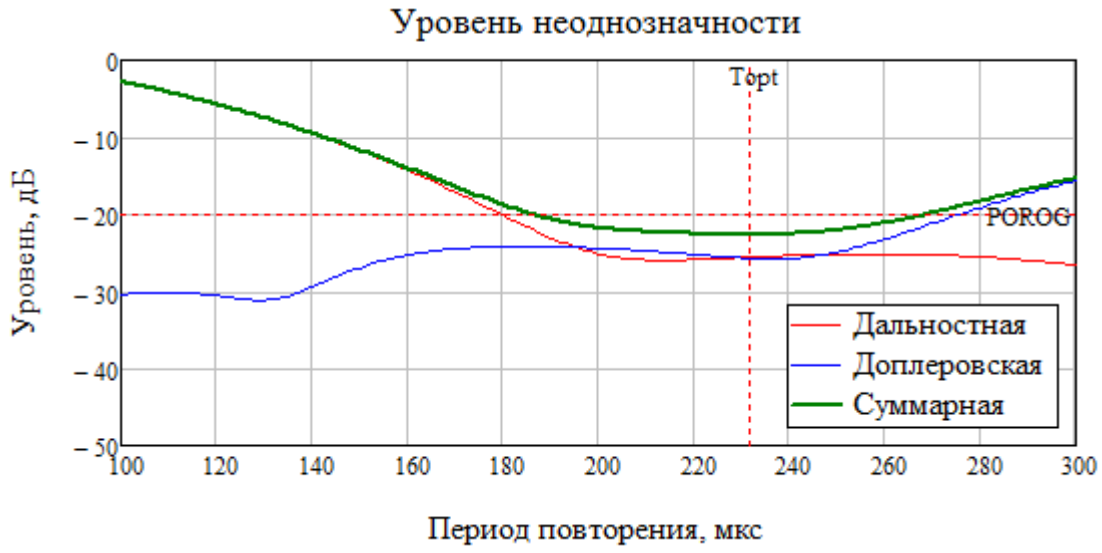

Рисунок 2.23 – Уровень неоднозначности в зависимости от периода повторения при угле визирования ε = 47°

Проиллюстрируем влияние угла визирования на ширину допустимого диапазона периодов повторения. На рисунке 2.24 представлены зависимостями величин допустимых и оптимального периода от угла визирования ε. Зависимость суммарного уровня неоднозначности от периода, представленная на рисунке 2.22, имеет два локальных минимума при $T_n \approx 133$ мкс и $T_n \approx 235$ мкс. На рисунке 2.24 представлены 2 зависимости оптимального значения T_n: для локального минимума данной зависимости (который существует при ε = 20°…34° при $T_n \approx$ 240 мкс, отмеченный тонкой линией) и абсолютного минимума (отмеченный на жирной линией). Верхняя граница допустимых значения периодов повторений $T_{Пmax}$ = 268 мкс (при условии соблюдения уровня неоднозначности -20 дБ) определяется из условия однозначного наблюдения всего спектра доплеровских частот (в соответствии с соотношением (2.7) при $\alpha_{неодн} = \Delta\alpha$. Нижняя граница допустимых значений периода определяется исключительно из условия соблюдения порогового значения уровня неоднозначности -20 дБ, однако при дальнейшем расчете необходимо учитывать, что величина периода ограничивает диапазон визируемых наклонных (горизонтальных) дальностей [41].

Рисунок 2.24 – Граничные и оптимальное значения периода повторения в рабочем диапазоне углов визирования

Из зависимостей, представленных на рисунке 2.24, следует оптимальное значение периода для всего диапазона углов визирования $T_{Попт}$ = 238 мкс и граничные значения периода 208…268 мкс. При таких значениях обеспечивается уровень неоднозначности, рассматриваемого многолучевого визирования, не выше -20 дБ практически во всей полосе обзора.

Данный анализ, проведенный по результатам оценок уровня неоднозначности, должен осуществляться для каждого режима съемки, реализуемого в РСА. Значения границ диапазона периодов $T_{Пmin}$, $T_{Пmax}$ и оптимального значения $T_{Попт}$ могут закладываться в бортовую память радиолокатора и использоваться в качестве исходных данных для оперативного расчета рабочего значения периода на втором этапе с учетом геометрии визирования в заданных условиях съемки.

Второй этап расчета периода повторения осуществляется на основе анализа распределения моментов излучения зондирующего сигнала, времени прихода

эхо-сигнала и моментом прихода надирного отражения во времени. Удобным инструментом такого анализа являются временные диаграммы, выстриваемые в координатах «период повторения (частота повторения) – горизонтальная дальность» на которой отмечаются «слепые» зоны и надирные помехи [92].

На рисунке 2.25 представлена диаграмма помех, на которой отмечено положение визируемого участка местности, при угле визирования ε = 35° для скважности 10. На рисунке отмечен рабочий период повторения 237,5 мкс отличный от оптимального значения 238 мкс, поскольку при выборе оптимального периода в качестве рабочего, во время регистрации эхо-сигнала от полосы съемки в антенну РСА поступает надирное отражение.

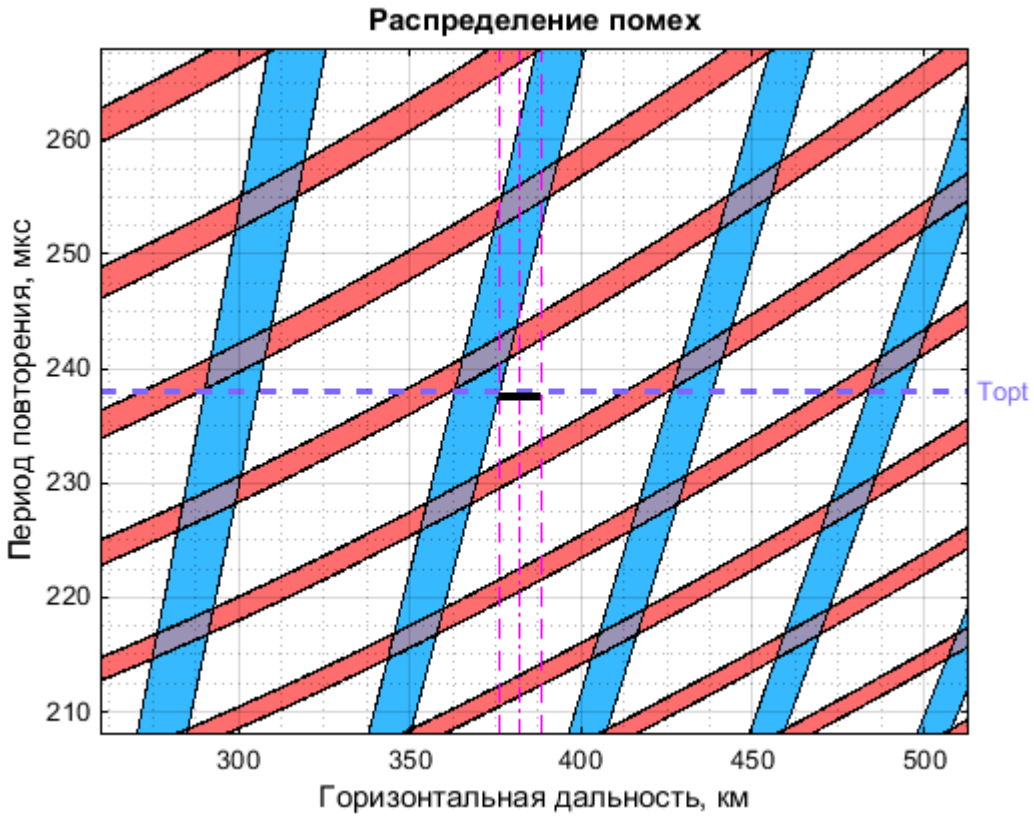

Рисунок 2.25 – Диаграмма помех при выборе периода повторения ε = 35°. Красный – слепая зона, синий – надирные отражения.

На рисунке 2.26 представлена диаграмма помех в полосе обзора исследуемого РСА, отображающая распределение помех в пределах ширины луча

ДН при нацеливании максимума на заданный угол визирования при скважности 10. В нижней части рисунка индицируется наличие рабочего периода повторения (обеспечивающего в пределах ширины луча ДН по вертикали отсутствие попадания «слепых» дальностей и надирных отражений) в зависимости от угла визирования, где значение «1» соответствует наличию такого периода, «0» – отсутствию рабочего периода повторения.

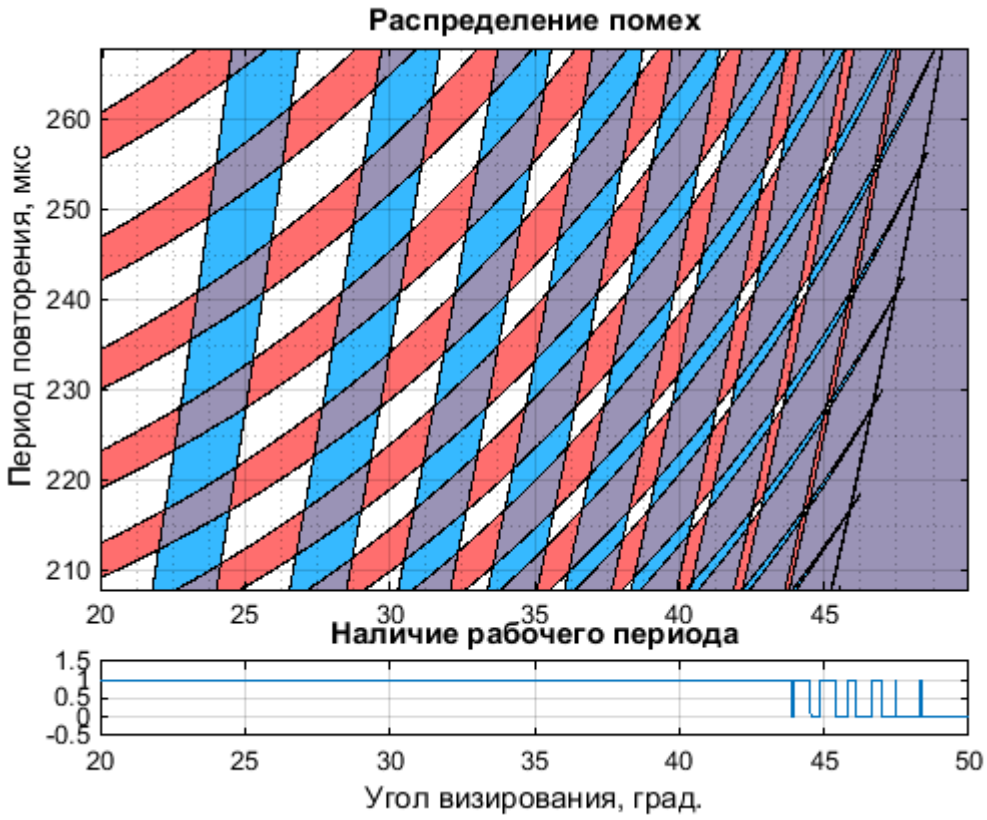

Рисунок 2.26 – Диаграмма помех в полосе обзора

При построении диаграммы, представленной на рисунке 2.26, учитывалось расширение многолучевой приемо-передающей ДН по вертикали в соответствии с соотношением (2.24) за счет влияния частотной дисперсии АФАР, рассмотренного в разделе 2.6. Рабочий период повторения может быть найден в диапазоне углов ε = 20°…47° – что соответствует диапазону горизонтальных дальностей 233 км … 762 км.

Реализация широкой полосы съемки в многолучевых режимах, может быть достигнута, например, многократным наблюдением в нескольких парциальных полосах (аналогично режиму ScanSAR), при этом в каждой парциальной полосе будет выбран свой рабочий период. В конечном счете это позволяет реализовать широкую полосу съемки при многолучевом визировании, без появления «слепых» зон и надирных помех практически во всей полосе обзора – что является преимуществом по сравнению с широкозахватными режимами высокого разрешения HRWS, рассмотренными в разделе 1.4, где одновременное визирование протяженного диапазона горизонтальных дальностей ограничивалось сложным взаимным распределением «слепых» дальностей и надирных отражений. Дальнейшее расширение полосы обзора (в область углов визирования (ε = 47°…50°) достижимо за счет сокращения рабочей ширины луча ДН по вертикали (сужения каждой парциальной полосы съемки).

2.8 Выводы по главе

1. Цифровая антенная решетка исследуемого РСА, организуемая в горизонтальной плоскости, позволяет реализовывать подсистему цифрового формирования лучей ДН на прием, с азимутальной ориентацией лучей. Это позволяет использовать подходы пространственно-временного разделения зондирующих импульсов и многоканальной обработки эхо-сигналов на прием с цифровым формированием лучей ДН для ведения высокодетального радиолокационного визирования протяжённых участков земной поверхности.

2. Сочетание пространственно-временного разделения зондирующих импульсов и многоканальной обработки сигналов с формированием цифровых лучей ДН на прием реализуют методику многолучевого визирования, которая позволяет увеличить время визирования в каждом из антенных лучей (по сравнению с однолучевым визированием) и, соответственно, увеличивать время

синтеза апертуры в различных режимах съемки для обеспечения улучшения характеристик радиолокационного визирования.

3. Увеличение времени синтеза апертуры достигается за счет уменьшения длительности зондирующего сигнала каждого антенного луча, что ведет к энергетическим потерям радиолокационного визирования. Ведение многоканальной обработки сигналов повышает требования к вычислительным средствам РСА, обеспечивающим такую обработку и формирование многолучевой ДН на прием, а также ведет к увеличению объема информации.

4. При многолучевом визировании происходит образование межканальной неоднозначности, уровень которых ослабляется при низкочастотной фильтрации в приемном тракте. При этом характеристики фильтра определяют частотный портрет режима съемки и ограничивают максимальную полосу зондирующего субимпульса. Баланс данных параметров при разработке многолучевых систем РСА достигается использованием алгоритма оценки уровня межканальной неоднозначности и алгоритма расчета частотного портрета многолучевого визирования. При проектировании ФНЧ необходимо проводить оптимизацию формы АЧХ для увеличения реализуемого разрешения по горизонтальной дальности с учетом объемов задействуемых ресурсов ПЛИС, реализующей обработку сигналов в приемном тракте.

5. Применение многолучевых режимов с частотным разделением в РСА ведет к искажению геометрии радиолокационного визирования и дополнительным амплитудным потерям при паразитном отклонении многолучевой ДН по вертикали. Разработанный алгоритм оценки влияния частотной дисперсии АФАР показывает, что данные искажения существенно сокращают реализуемую полосу съемки. Восстановление номинальной полосы съемки достижимо за счет расширения рабочей ширины луча ДН по вертикали, что приводит к дополнительным энергетическим потерям на краю полосы съемки.

6. Величина рабочего периода повторения должна минимизировать суммарный уровень неоднозначности при одновременном недопущении появления «слепых» зон и надирных отражений. За счет формирования

многолучевой ДН только в горизонтальной плоскости, вертикальная ширина многолучевой ДН меняется незначительно, что позволяет производить радиолокационное визирование во всей полосе обзора производя выбор периода повторение аналогично однолучевому режиму съемки.

ГЛАВА 3 РЕАЛИЗАЦИЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ РЕЖИМОВ СЪЕМКИ

3.1 Режим многолучевой сканирующей съемки

3.1.1 Алгоритмы расчета параметров качества многолучевого сканирующего визирования

Алгоритм многолучевой сканирующей съемки основывается на комбинации многоканального описанного выше (разделы 2.2-2.3) принципа визирования и, получившей широкое распространение в современных РСА технологии ScanSAR. В данном варианте съемки визирование в каждой парциальной полосе осуществляется несколькими антенными лучами, с сохранением принципов сканирования, описанных в разделе 1.3. На рисунке 3.1 представлен принцип формирования парциальных кадров в одной парциальной полосе визирования многолучевой ДН при использовании K = 2 антенных лучей [45].

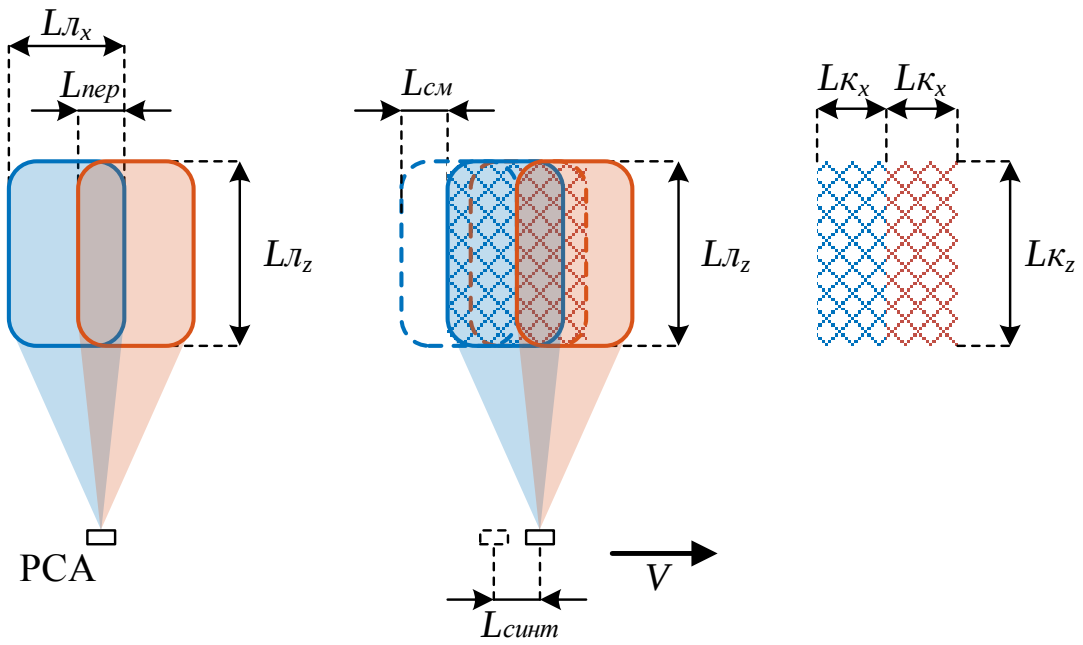

Рисунок 3.1 – Визирование в многолучевом сканирующем режиме съемки при $K = 2$

Антенные лучи в данном варианте съемки отклоняются друг относительно друга в азимутальном направлении на угол, меньший, чем ширина одного луча в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha$, что приводит к перекрытию следов лучей на поверхности Земли на величину $L_{пер}$, необходимое для обеспечения визирования без пропусков. За счет движения РСА по траектории осуществляется синтез апертуры $L_{синт}$, а следы лучей ДН на поверхности Земли смещаются на расстояние $L_{см}$, формируя на поверхности Земли одновременно два парциальных кадра съемки протяженностью $L\kappa_x$. По окончании визирования данной парциальной полосы многолучевая ДН перенацеливается на следующую парциальную полосу и визирования нескольких парциальных кадров повторяется. При этом угловое положение лучей по горизонтали остается неизменным. Просканировав все М парциальных полос (один цикл сканирования) многолучевая ДН нацеливается на первую парциальную полосу, и процесс синтеза апертуры для соседних парциальных кадров повторяется (рисунок 3.2)

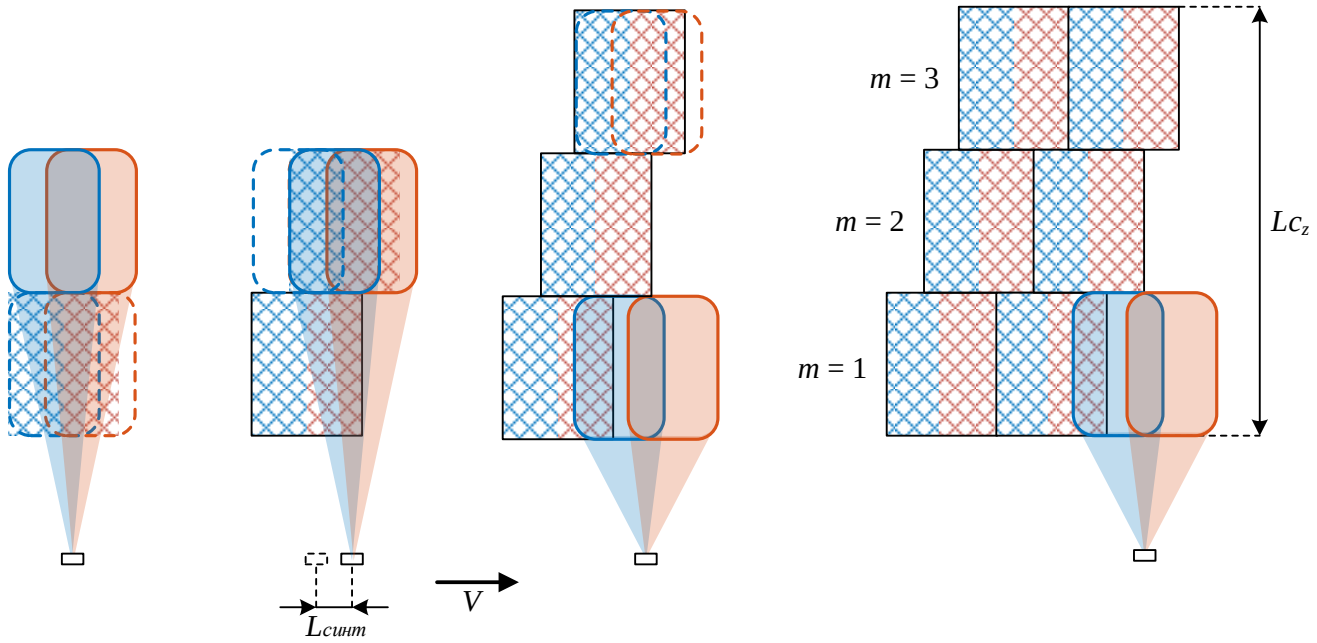

Рисунок 3.2 – Сканирование в M = 3 парциальных полосах многолучевой ДН (при K = 2)

Данный режим съемки имеет специфику, заключающуюся в особых требованиях к параметрам горизонтального перекрытия следов антенных лучей, обеспечивающих радиолокационное визирование местности без пропусков, что достигается путем согласования величины смещения следов лучей на поверхности Земли $L_{см}$ (в процессе визирования парциальных кадров) и их горизонтального перекрытия $L_{пер}$ с горизонтальным размером следа луча ДН на поверхности Земли $Lл_x$ при заданном количестве лучей K и парциальных полос визирования M:

$$K \cdot L_{л_x} = M \cdot L_{см} + K \cdot L_{пер}, \tag{3.1}$$

при этом условие съемки без пропусков для любых K и M выполняется только при равенстве $L_{см} = L_{пер}$. Выполнение данного условия с учетом выражения (3.1) приводит к следующим соотношениям для величины смещения антенных лучей в процессе синтеза апертуры $L_{синт}$ [45]:

$$L_{пер} = \frac{K}{M+K} \cdot L_{л_x}, \tag{3.2}$$

для путевого размера, формируемого одним лучом, кадра:

$$L_{к_x} = \frac{M}{M+K} \cdot L_{л_x}, \tag{3.3}$$

для величины апертуры синтеза (с учетом соотношений (1.12) и (3.2)):

$$L_{синт} = \frac{K}{M+K} \cdot K_s \cdot L_{л_x}, \tag{3.4}$$

Путевое разрешение в многолучевом сканирующем режиме съемки:

$$l_x = l_{x_0} \cdot \left(\frac{M}{K} + 1 \right), \tag{3.5}$$

где lx_0 – разрешение по путевой дальности, реализуемое одним антенным лучом РСА в полосовом режиме съемки. Для исследуемой системы РСА lx_0 = 2,65 м (таблица 2.2).

Суммарная полоса съемки определяется соотношением (1.3).

Для соблюдения необходимого перекрытия следов ДН на поверхности Земли $L_{пер}$ необходимо соответствующим образом отклонять антенные лучи по горизонтали (рисунок 3.3).

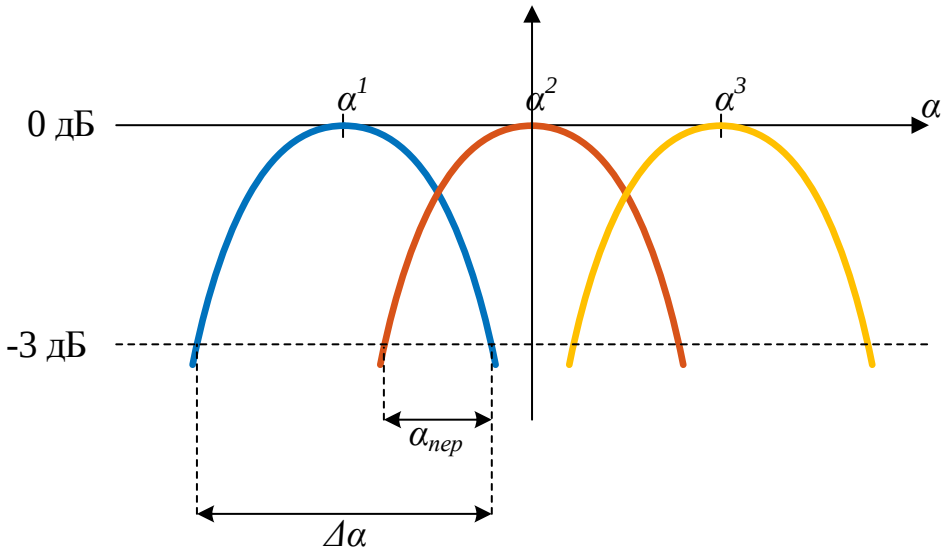

Рисунок 3.3 – Многолучевая ДН в многолучевом сканирующем режиме съемки (при K = 3)

Взаимное перекрытие ДН по азимуту в угловых координатах составит:

$$\Delta\alpha_{пер}=\frac{K}{M+K}\cdot\Delta\alpha\,, \tag{3.6}$$

при $K\geq 2$, где $\Delta\alpha$ – ширина ДН одного луча по горизонтали. Угловой интервал между максимумами соседних лучей ДН $\Delta\alpha_{мл}$:

$$\Delta\alpha_{мл}=\frac{M}{M+K}\cdot\Delta\alpha\,. \tag{3.7}$$

Полная ширина всех лучей многолучевой ДН по горизонтали:

$$\Delta\alpha_{млдн}=K\cdot\Delta\alpha-\left(K-1\right)\Delta\alpha_{пер}\,. \tag{3.8}$$

С учетом соотношений (3.6), (3.7), (3.8) угловое положение каждого луча ДН α^k по горизонтали относительно нормали к раскрыву АФАР в многолучевом режиме при произвольном количестве антенных лучей K и парциальных полос сканирования M определяется следующим соотношением:

$$\alpha^k = \Delta\alpha \cdot \frac{M}{2} \cdot \frac{2 \cdot k - (K+1)}{M+K}. \qquad (3.9)$$

Угловой сектор визирования $\Delta\alpha_{виз}$, в пределах которого осуществляется отклонение лучей ДН в данном режиме съемки

$$\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha \cdot \left(\frac{2 \cdot M \cdot K}{M+K} - \frac{M}{M+K} \cdot (K+1) \right). \qquad (3.10)$$

Данный параметр не должен превышать сектор сканирования $\Delta\alpha_{скан}$ в котором АФАР исследуемого РСА обеспечивает отклонение максимума луча ДН в горизонтальной плоскости, то есть необходимо контролировать выполнение условия $\Delta\alpha_{виз} \leq \Delta\alpha_{скан}$.

В соответствии с соотношением (2.21) для рассматриваемой системы РСА, максимальное количество лучей K, при котором обеспечивается эквивалентность разрешений по горизонтальной и путевой дальности (соотношение (3.5)) $l_x = l_z$ во всей полосе обзора составляет $K = 4$. При $K = 5$ диапазон углов визирования сокращается до 21,3°…50° (разрешение $l_x = l_z = 3{,}7$ м на ближнем краю полосы обзора при $M = 2$), при $K = 6$ диапазон углов визирования сокращается до 28,8°…50° (разрешение $l_x = l_z = 3{,}5$ м на ближнем краю полосы обзора при $M = 2$). В таблице 3.1 представлены реализуемое азимутальное разрешение в многолучевом сканирующем режиме съемки в зависимости от количества используемых антенных лучей K и парциальных полос сканирования M.

Таблица 3.1 – Реализуемое путевое разрешение в многолучевом сканирующем режиме съемки

Количество парциальных полос, M	Ширина полосы съемки Lc_x (при $\varepsilon_ц = 30°$), км	Путевая разрешающая способность l_x при количестве антенных лучей (каналов) K, м			
		$K = 1$	$K = 2$	$K = 3$	$K = 4$
1	12,3	2,7	-	-	-
2	24,7	8,0	5,3	4,4	4,0
3	37,1	10,6	6,6	5,3	4,6
4	49,4	13,3	8,0	6,2	5,3
5	61,8	15,9	9,3	7,1	6,0
6	74,2	18,6	10,6	8,0	6,6
7	86,6	21,2	11,9	8,8	7,3
8	99,0	23,9	13,3	9,7	8,0

Увеличение количества формируемых антенных лучей K и при сохранении числа парциальных полос сканирования M позволяет улучшать путевое разрешение l_x. Например, при использовании 3-4 антенных лучей достигается улучшение разрешения в 2-3 раза (в зависимости от количества парциальных полос визирования).

На рисунке 3.4 представлена эффективность применения многолучевой сканирующей съемки в рассматриваемом РСА, выражающаяся реализуемым улучшение разрешения по путевой дальности l_x (соотношение (3.5)) в зависимости от энергетических потерь P_{loss}^{-1}, вызванных сокращением длительности зондирующего субимпульса (соотношение (2.8)) при количестве формируемых лучей K от 1 до 6 для различного количества парциальных полос M. Зависимость рассчитана для скважности зондирующего сигнала рассматриваемой системы РСА $Q = 10$ и периода повторения зондирующих импульсов $T_п = 230$ мкс.

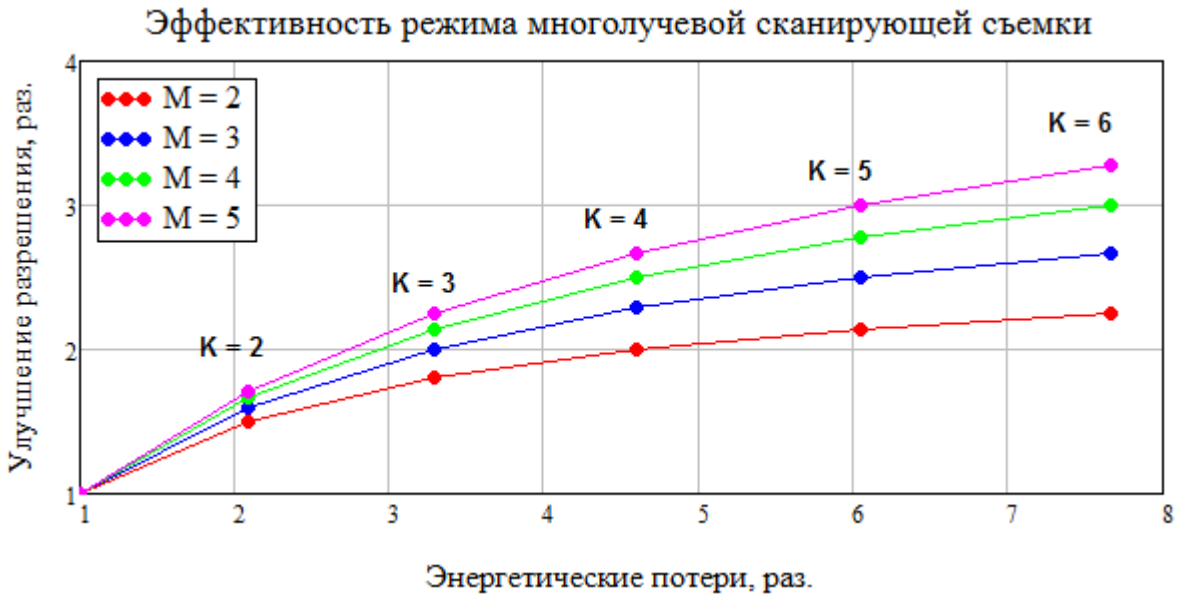

Рисунок 3.4 – Энергетические потери и реализуемое улучшение путевого разрешения в зависимости от количества используемых лучей (K = 1...6) многолучевого сканирующего режима съемки при различном количестве парциальных полос М

Рисунок 3.5 поясняет принцип формирования полосы съемки в многолучевом сканирующем режиме съемки. Время $\Delta t_{съем}$ между началом съемки (излучением первого зондирующего импульса) и визированием начальной границы маршрута на траверзе для многолучевого сканирующего режима съемки вычисляется следующим образом:

$$\Delta t_{съем} = \frac{L_{лx}}{V_л} \cdot \frac{K \cdot (M-1)}{2 \cdot (M+K)}, \qquad (3.11)$$

где $L_{лx}$ – размер следа ДН на поверхности Земли по путевой дальности при визировании ближней парциальной полосы, $V_л$ – скорость движения следа луча ДН на поверхности Земли.

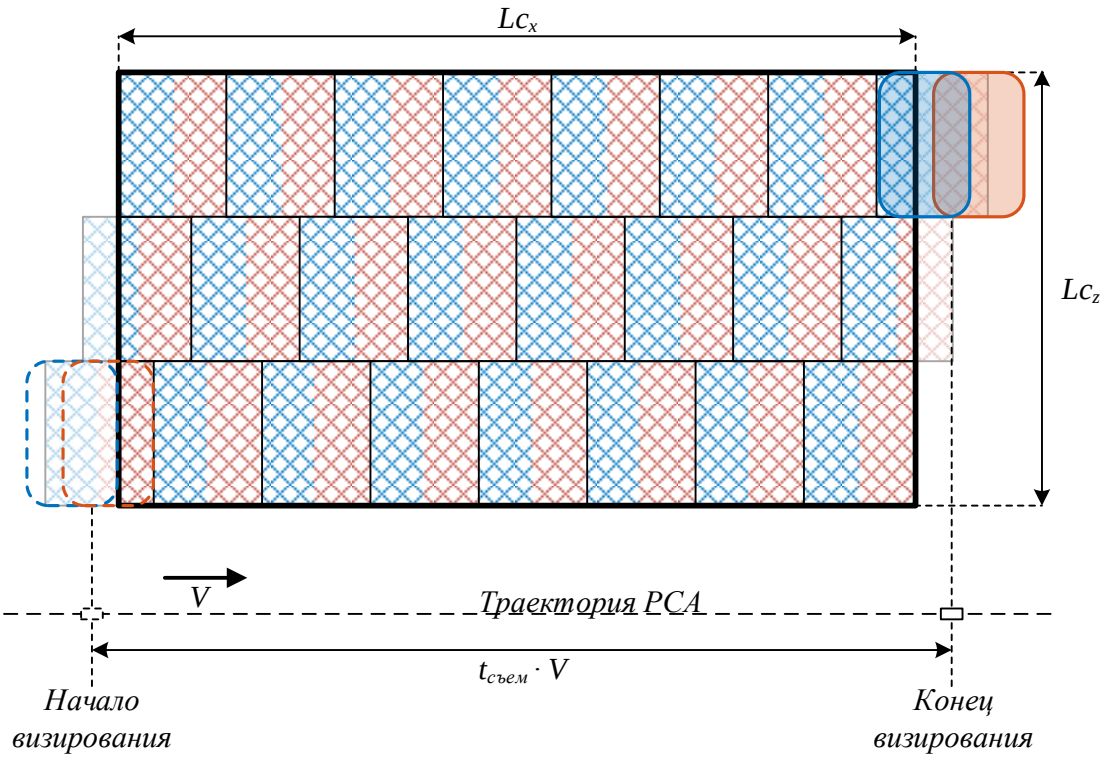

Рисунок 3.5 – Формирование полосы съемки в многолучевом сканирующем режиме

Длительность режима многолучевой сканирующей съемки, соответствующая временному интервалу между излучением первого зондирующего импульса и приемом последнего эхо-импульса, рассчитывается по заданной протяженности полосы съемки по путевой дальности Lc_x:

$$t_{съем} = \frac{Lc_x}{V_g} + 2 \cdot \Delta t_{съем}, \tag{3.12}$$

где $\Delta t_{съем}$ – время между началом съемки и визированием начала полосы съемки на траверзе, рассчитываемое по соотношению (3.11).

3.1.2 Влияние эффекта частотной дисперсии АФАР в режиме многолучевой сканирующей съемки

Как было показано на рисунке 3.2, границы кадров по путевой дальности в соседних парциальных полосах смещены друг относительно друга на величину

смещения следов лучей на поверхности Земли $L_{см}$. С учетом влияния эффекта частотной дисперсии АФАР на прием (раздел 2.6) геометрия визирования при отклонении многолучевой ДН по вертикали (например, на ближнем краю полосы обзора при отклонении лучей на -12°, угол визирования ε = 23°) искажается нарушается прямоугольная структура формируемого в сканирующем режиме кадра в результате чего возникают пропуски при радиолокационной съемке (рисунок 3.6).

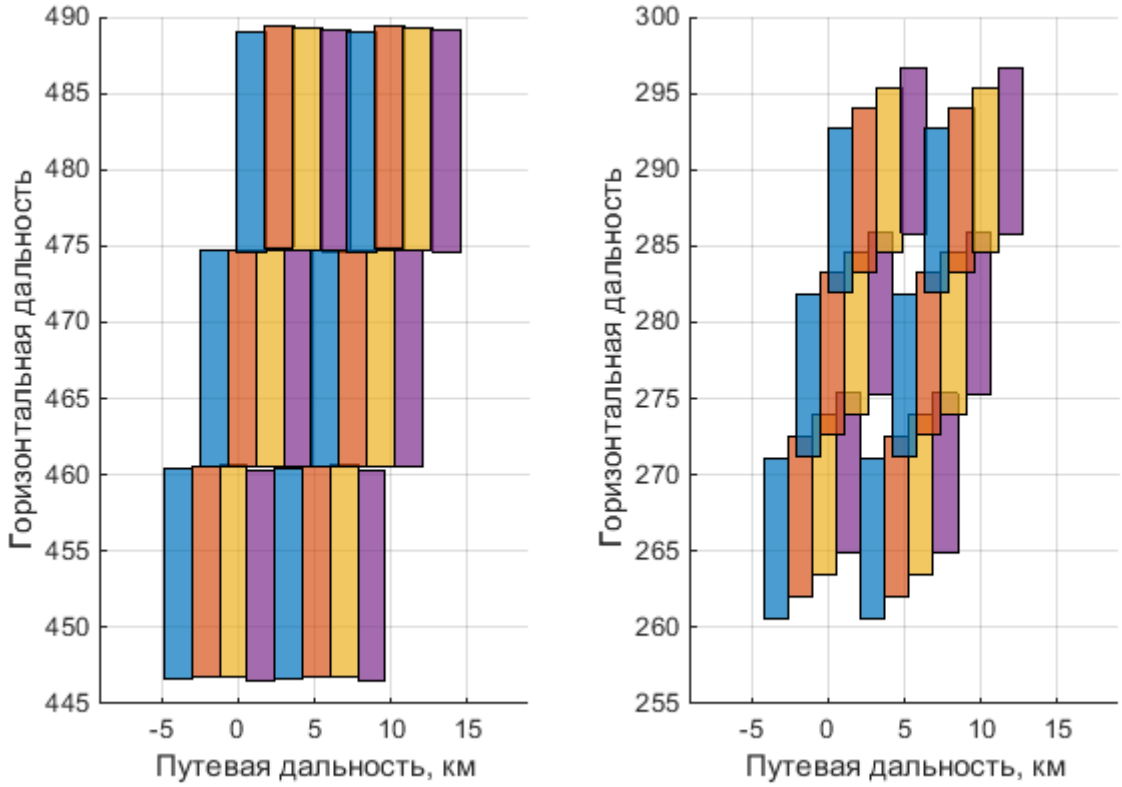

Рисунок 3.6 – Моделирование расположения парциальных кадров при многолучевой сканирующей съемке. Слева – в середине полосы обзора (визирование без отклонения многолучевой ДН по вертикали, $\varepsilon_ц$ = 35°), справа – на ближнем краю полосы обзора (при отклонении многолучевой ДН по вертикали на угол θy_0 = -12°, $\varepsilon_ц$ = 23°) при M = 3, K = 4.

Эффект частотной дисперсии АФАР на прием оказывает существенное влияние на геометрию радиолокационного визирования, приводящую к

появлению пропусков при многолучевой сканирующей съемке. Компенсация данных пропусков возможна двумя способами [96].

Первый способ предполагает ведение специального чередования номиналов поднесущих частот f^k всех K лучей при переключении на следующую парциальную полосу, реализующегося следующим образом. k-ый луч (где k = 1…K) при визировании m-ой парциальной полосы (где m = 1…M) для компенсации частотной дисперсии АФАР на прием будет иметь номинал поднесущей частоты $f^k_{комп} = f^{n(k)}$, где $f^k = f^1, f^2, \ldots f^K$ – массив номиналов частот данного многолучевого режима (определяемый по соотношению (2.12)), $n(k)$ – порядковый номер номинала поднесущей частоты в массиве f^k, определяемый соотношением:

$$n(k) = \mathrm{mod}(k - 1 + m, K), \tag{3.13}$$

где k – номер антенного луча, для которого определяется номинал поднесущей частоты, m – порядковый номер парциальной полосы съемки в которой осуществляется визирование, mod(A, B) – операция взятия остатка от деления A на B, K – количество антенных лучей многолучевого визирования.

На рисунке 3.7 представлена геометрия визирования при применении алгоритма чередования номиналов поднесущих частот.

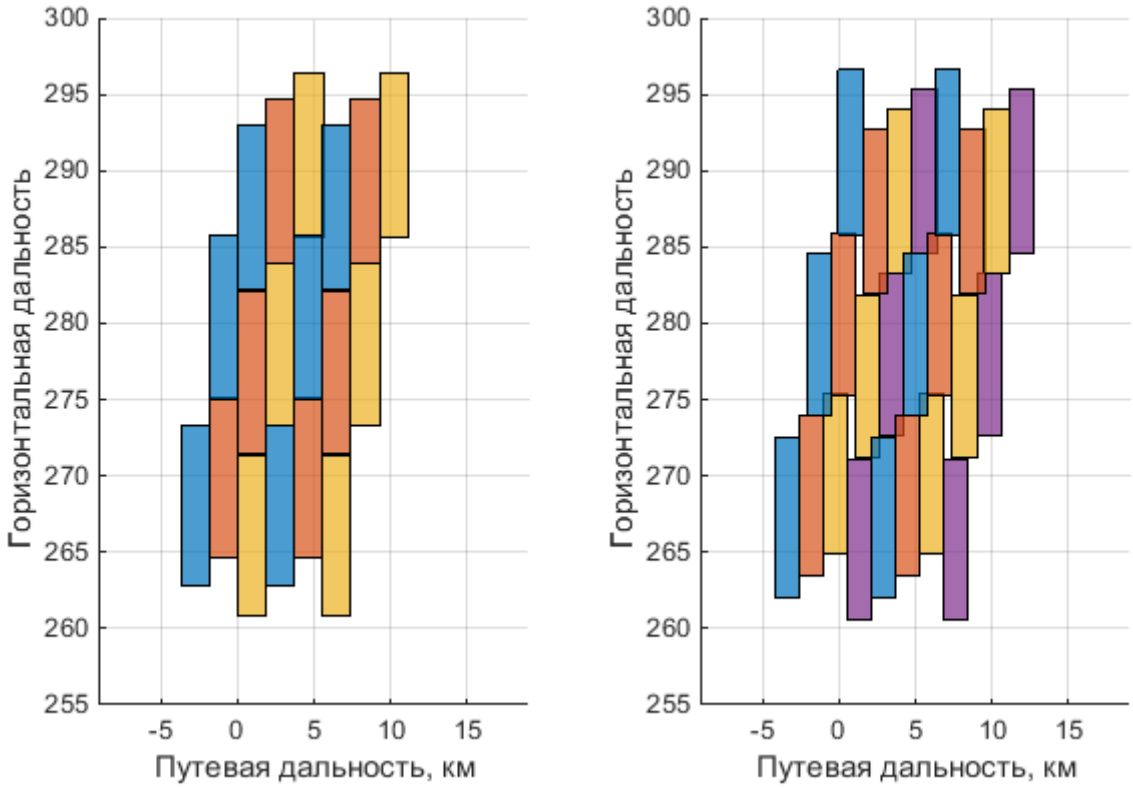

Рисунок 3.7 – Моделирование геометрии визирования M = 3 парциальных полос в многолучевом сканирующем режиме съемки с применением алгоритма чередования номиналов поднесущих частот. Слева – визирование K = 3 антенными лучами, справа – K = 4 антенными лучами.

Данный способ применим для визирования без пропусков только при соблюдении равенства $M = K$ – что существенно ограничивает возможность применения многолучевой сканирующей съемки для повышения характеристик визирования в РСА. Однако не требует введения дополнительных отклонений лучей ДН по горизонтали для ведения радиолокационной съемки без потерь фрагментов визируемого участка местности.

Второй способ компенсации пропусков предполагает оперативное управление положением многолучевой ДН в горизонтальной плоскости при перенацеливании на последующую парциальную полосу. Для этого при визировании антенные лучи ориентируются по горизонтали в направлениях α^k, которые определяются преобразованием соотношения (3.9) в следующему виду:

$$\alpha^{k}(m)=\Delta\alpha\cdot\left(\frac{M}{2}\cdot\frac{2\cdot k-(K+1)}{M+K}-\frac{K}{M+K}\cdot\left(m-\frac{M-1}{2}\right)\right), \qquad (3.14)$$

где $\Delta\alpha$ – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости, k – номер антенного луча, для которого определяется угловое положение, M – количество парциальных полос визирования, K – количество антенных лучей многолучевого режима, m – номер парциальной полосы в которой осуществляется визирование. В процессе синтеза апертуры парциальных кадров положение антенных лучей остается неизменным.

Соотношение (3.10) для вычисления полного сектора $\Delta\alpha_{виз}$, в котором осуществляется перенацеливание антенных лучей в горизонтальной плоскости принимает следующий вид:

$$\Delta\alpha_{виз}=\Delta\alpha\cdot\left(\frac{2\cdot M\cdot K}{M+K}-1\right), \qquad (3.15)$$

В результате компенсации пропусков при съемке на ближнем краю полосы обзора за счет азимутального нацеливания антенных лучей реализуется геометрия визирования, представленная на рисунке 3.8.

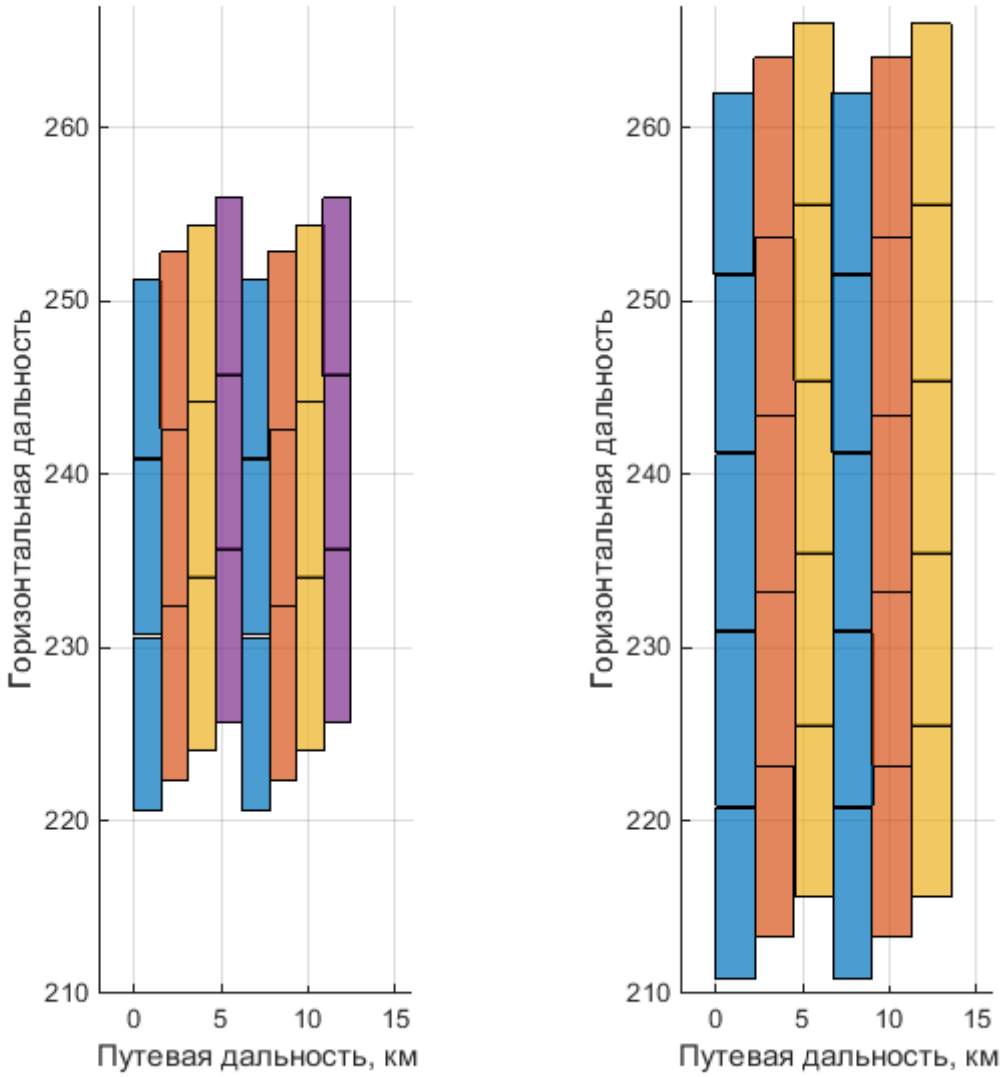

Рисунок 3.8 – Моделирование геометрии визирования в многолучевом сканирующем режиме съемки с применением дополнительного отклонения антенных лучей по азимуту. Слева – визирование K = 4 антенными лучами в M = 3 парциальных полосах, справа – K = 3 антенными лучами в M = 5 парциальных полосах.

Для реализации данного варианта многолучевой сканирующей съемки зондирование начинается при визировании начала полосы съемки на траверзе, т.е. $\Delta t_{съем}$ = 0, длительность съемки определяется исключительно требуемой протяжённостью полосы съемки и возможностями РСА по непрерывному визированию:

$$t_{съем} = \frac{L_{c_x}}{V_g}, \qquad (3.16)$$

Однако дополнительное отклонение многолучевой ДН в азимутальной плоскости может быть ограничено возможностями антенной системы по сканированию антенным лучом в горизонтальной плоскости. На рисунке 3.9 представлены зависимости суммарного углового сектора, в котором осуществляется перенацеливание лучей по азимуту $\Delta\alpha_{виз}$, в зависимости от количества визируемых парциальных полос M при различном числе формируемых антенных лучей K для двух описанных выше способов компенсации пропусков в многолучевом сканирующем режиме съемки.

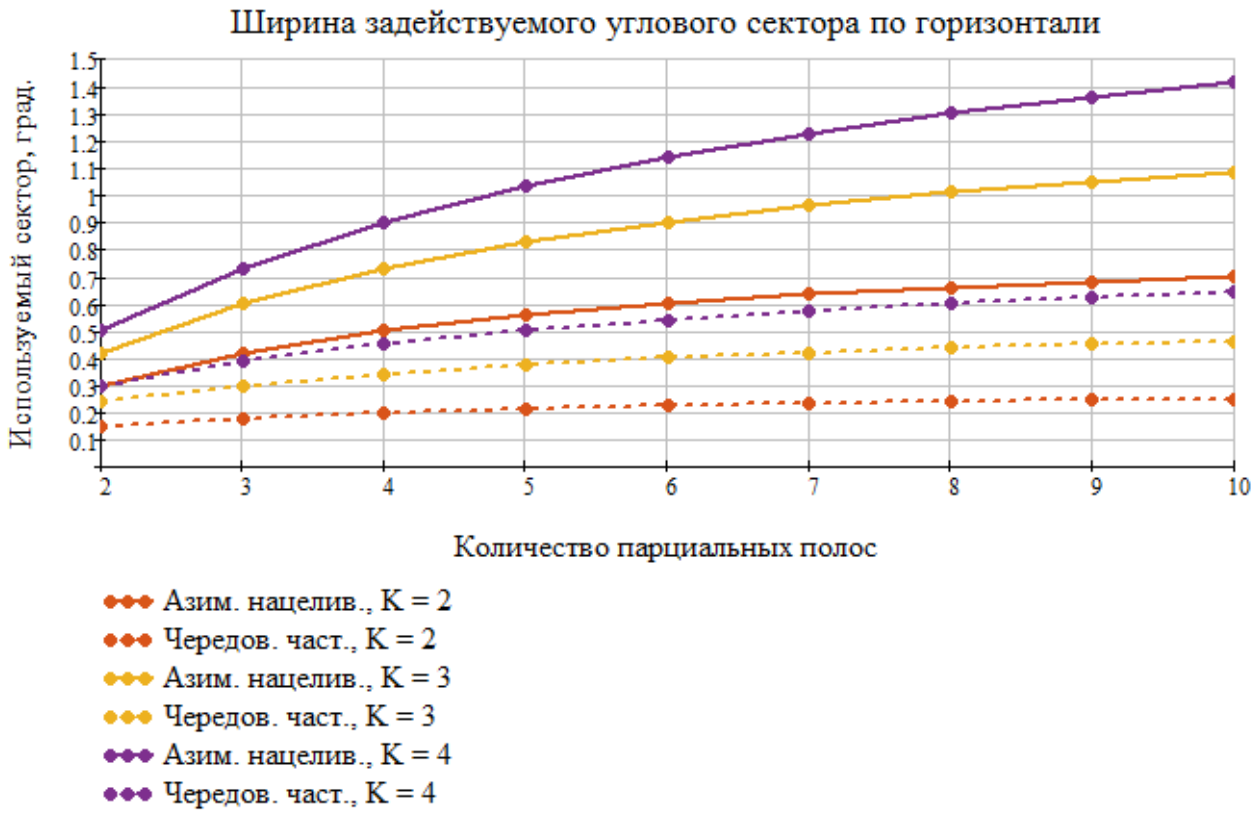

Рисунок 3.9 – Угловая ширина сектора в горизонтальной плоскости в котором осуществляется визирование в многолучевом сканирующем режиме при различных способах компенсации пропусков при радиолокационной съемке, вызванных частотным частотной дисперсией АФАР на прием

Использование алгоритма чередования частот задействует в 2-2,5 раза меньший угловой сектор визирования $\Delta\alpha_{виз}$ в горизонтальной плоскости, чем алгоритм азимутального нацеливания многолучевой ДН, поскольку величина углового сектора визирования не может превышать сектор, в котором АФАР осуществляет отклонение луча ДН в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha_{виз} \leq \Delta\alpha_{скан}$. Учет данного обстоятельства и выбор способа компенсации пропусков при съемке, возникающих из-за частотной дисперсии АФАР на прием должен осуществляться на этапе проектирования режимов съемки с учетом ограничений, накладываемых выбранным алгоритмом компенсации пропусков на реализуемые характеристики визирования.

Поперечный размер реализуемой полосы съемки в многолучевом сканирующем режиме:

$$L_{c_z} = L\left(\varepsilon_{m=M} + \frac{\Delta\varepsilon_{эфф}}{2}\right) - L\left(\varepsilon_{m=1} - \frac{\Delta\varepsilon_{эфф}}{2}\right), \qquad (3.17)$$

где ε_m – угол визирования центра m-ой парциальной полосы сканирующего режима (m = 1 соответствует визированию первой парциальной полосы, расположенной на ближнем краю полосы обзора, $m = M$ – последней парциальной полосе), $\Delta\varepsilon_{эфф}$ – эффективная ширина ДН (для данного угла визирования ε_m) в соответствии с выражением (2.25).

3.2 Многолучевой прожекторный режим съемки

3.2.1 Алгоритмы расчета параметров качества многолучевого прожекторного визирования

Метод многолучевой прожекторной съемки основывается на комбинации классического прожекторного режима съемки с принципом многолучевого визирования, позволяющий увеличивать размеры визируемого участка местности [95]. На рисунке 3.10 представлена геометрия визирования полосы съемки,

состоящей из $Nк$ = 4 парциальных кадров при визировании K = 2 антенными лучами.

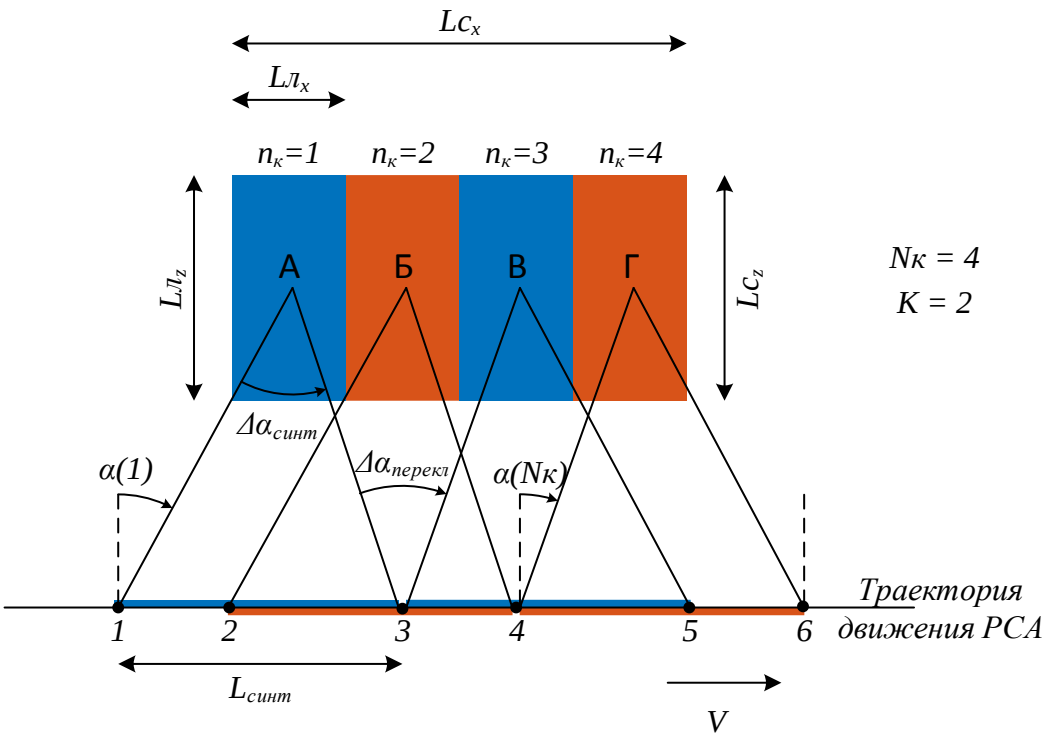

Рисунок 3.10 – Режим многолучевой прожекторной съемки при K = 2 и $Nк$ = 2

В начале визирования луч 1 ориентируется в горизонтальном направлении на центр парциального кадра А, апертура которого синтезируется на угловом интервале величиной $\Delta\alpha_{синт}$ (интервал 1-3 на рисунке 3.10), при этом луч 1, в процессе движения РСА, отслеживает центр кадра в секторе $\Delta\alpha_{отслеж}$:

$$\Delta\alpha_{синт} = K_s \cdot \Delta\alpha_{отслеж}\,. \qquad (3.18)$$

где Ks – коэффициент сферичности.

Во время отслеживания кадра А параллельно лучом 2 начинается синтез апертуры для кадра Б (в точке 2). В момент окончания синтеза апертуры кадра А (точка 3) визирование в данном направлении прекращается, луч 1 переориентируется в направлении кадра В (преодолевая угловой сектор $\Delta\alpha_{перекл}$) и процесс синтеза апертуры (интервалы 3-5) повторяется. Аналогично происходит и с кадром Г который отслеживается на интервале 4-6 лучом 2. В результате антенные лучи АФАР перенацеливаются в процессе визирования в секторе $\Delta\alpha_{виз}$.

Угловой интервал, на котором производится отслеживание одним антенным лучом одного кадра:

$$\Delta\alpha_{отслеж}=\frac{\lambda}{2\cdot Ks\cdot l_x}. \qquad (3.19)$$

где λ – средняя длина волны зондирующего сигнала (соответствующая центральной частоте рабочего диапазона частот F_0), Ks – коэффициент сферичности, l_x – требуемая продольная разрешающая способность.

Угловой интервал, в котором осуществляется переориентирование антенного луча в азимутальном направлении для переключения на следующий парциальный кадр:

$$\Delta\alpha_{перекл}=K\cdot\Delta\alpha, \qquad (3.20)$$

где $\Delta\alpha$ – ширина ДН одного луча в горизонтальной плоскости.

Задействуемый угловой сектор по горизонтали, в котором перенацеливание визирование $N_к$ парциальных кадров K антенными лучами, в данном режиме съемки:

$$\Delta\alpha_{виз}=\begin{cases}\mathrm{ceil}\left[\dfrac{N_к}{K}\right]\cdot\dfrac{\lambda}{2\cdot Ks\cdot l_x}- & \\ -K\cdot\Delta\alpha\cdot\left(\mathrm{ceil}\left[\dfrac{N_к}{K}\right]-1\right), & \text{если } \Delta\alpha_{перекл}\geq\Delta\alpha_{отслеж}\\ \dfrac{\lambda}{2\cdot Ks\cdot l_x}, & \text{если } \Delta\alpha_{перекл}<\Delta\alpha_{отслеж}\end{cases}, \qquad (3.21)$$

где ceil() – операция округления в большую сторону до ближайшего целого.

Случай $\Delta\alpha_{перекл} < \Delta\alpha_{отслеж}$ представляет собой вариант визирования, когда после окончания синтеза апертуры луч переориентируется на следующий парциальный кадр, и начинает его визирование не сразу, а через паузу. На рисунке 3.11 представлен вариант многолучевого прожекторного визирования K = 2 антенными лучами $N_к$ = 6 парциальных кадров при уменьшенной протяженности апертуры синтеза, чем в примере на рисунке 3.10. Данный вариант многолучевого визирования может использоваться при пониженных требованиях к величине путевого разрешения и сохранении двухлучевого визирования для

расширения размеров составного кадра. При этом азимутальный сектор отслеживания сокращается и становится меньше сектора, в котором осуществляется перенацеливание, то есть выполняется условие $\Delta\alpha_{перекл} < \Delta\alpha_{отслеж}$.

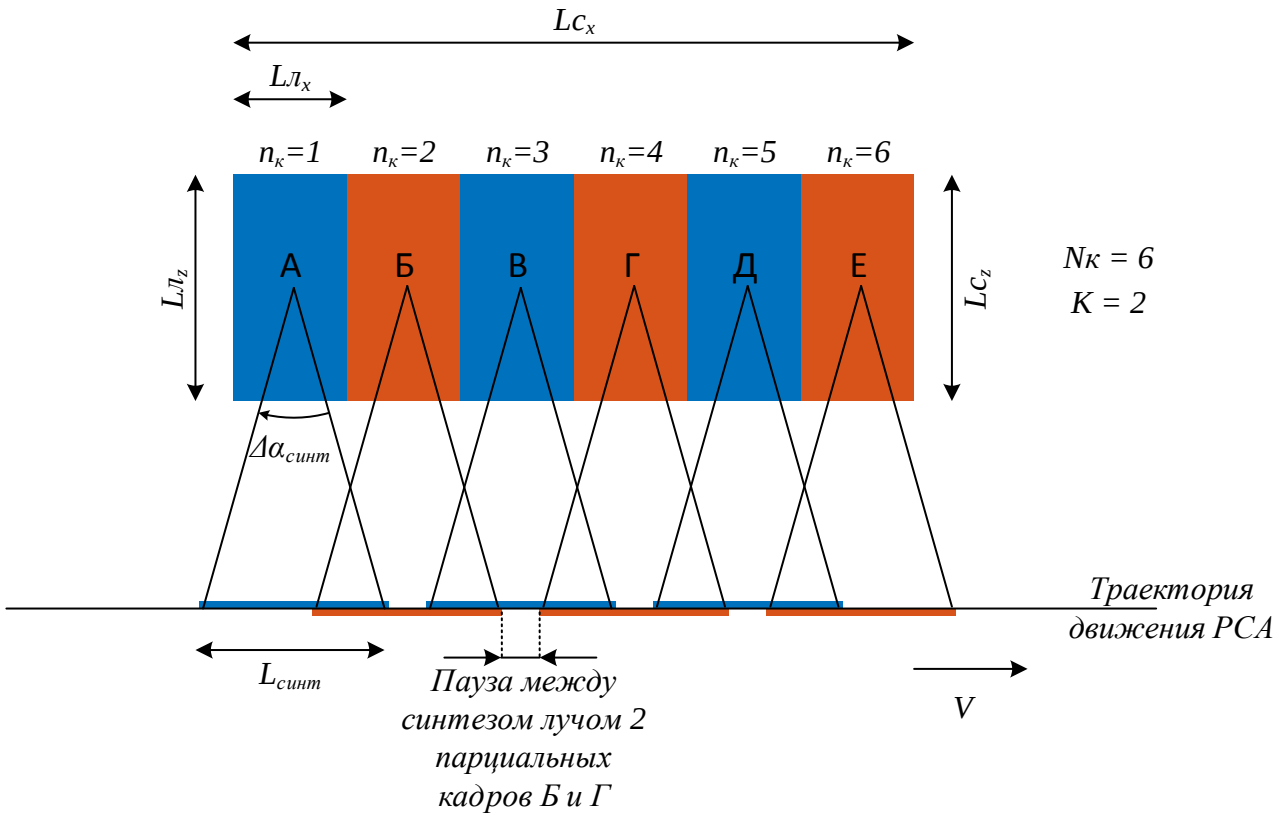

Рисунок 3.11 – Режим многолучевой прожекторной съемки при K = 2 и $Nк$ = 6 при уменьшенной протяженности апертуры синтеза, чем в примере представленном на рисунке 3.10

Поскольку величина $\Delta\alpha_{виз}$ определяет полный сектор, в котором осуществляется визирование в данном режиме съемки, то необходимо производить его согласование с возможностями антенной системы по отклонению луча ДН в горизонтальной плоскости, то есть производить контроль выполнения условия $\Delta\alpha_{виз} \leq \Delta\alpha_{скан}$.

Для количественной оценки увеличения протяженности суммарного кадра в режиме многолучевой прожекторной съемки в соответствии с выражением (3.21) определим предельно реализуемое путевое разрешение в данном режиме для

рассматриваемой системы РСА в зависимости от количества последовательно визируемых парциальных кадров (рисунок 3.12).

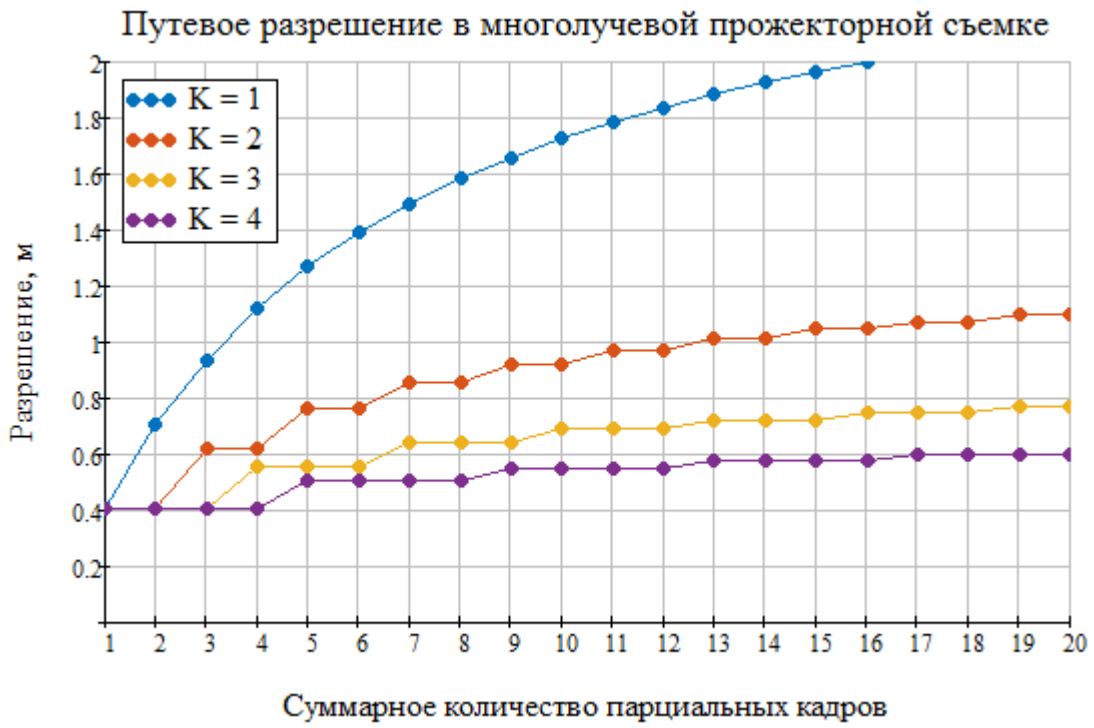

Рисунок 3.12 – Реализуемое путевое разрешение в режиме многолучевой прожекторной съемки в зависимости от суммарного количества формируемых парциальных кадров *Nк* при различном количестве антенных лучей *K* и использовании полного азимутально сектора визирования $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2$ рассматриваемого РСА

При *K* = 1 реализуется однолучевой режим составной прожекторной съемки (в котором одним антенным лучом последовательно синтезируется апертура для нескольких парциальных кадров, примыкающих друг к другу). Как видно из данного рисунка путевое разрешение 1 м может быть реализовано в *Nк* = 3 парциальных кадрах, наблюдаемых подряд одним антенным лучом. При использовании *K* = 2 антенных лучей достигается увеличение протяженности в 4 раза до *Nк* = 12 парциальных кадров и энергетических потерях, вызванных сокращением длительности зондирующего сигнала, в 2,1 раза (при скважности зондирующего сигнала рассматриваемой системы РСА *Q* = 10 и периоде

повторения зондирующих импульсов T_n = 240 мкс в соответствии с соотношением (2.8)).

При ведении многолучевой прожекторной съемки K = 2 антенными лучами с разрешением l_x = 1,33 м – вдвое выше, чем в классической полосовой съемке рассматриваемого РСА, угловой сектор $\Delta\alpha_{отслеж}$, в котором каждый луч отслеживает парциальные кадры в процессе синтеза апертуры, становится равным угловому сектору $\Delta\alpha_{перекл}$, в котором производится перенацеливание антенного луча для визирования последующего парциального кадра. То есть реализуется составной кадр, протяженность которого по путевой дальности ограничивается способностями РСА по непрерывному ведению радиолокационной съемки – как и в случае с полосовой съемкой. Таким образом, в многолучевых РСА использование K = 2 антенных лучей в режиме многолучевой прожекторной съемки, позволяет улучшить путевое разрешение аналогичной однолучевой полосовой съемки в 2 раза при энергетических потерях в 2,1 раза (для случая скважности зондирующего сигнала Q = 10 и величине периода повторения 240 мкс).

Большее расширение визируемого участка при сохранении путевого разрешения возможно при дальнейшем увеличении количества антенных лучей K, однако необходимо принимать во внимание, что в этом случае ограничивается максимально реализуемое поперечное разрешение в соответствии с выражением (2.19) (рисунок 2.18).

Для ведения многолучевого прожекторного визирования реализуется следующий алгоритм съемки:

– номер луча (канала обработки) k при визировании парциального кадра $n_к$:

$$k(n_к) = \mathrm{mod}(n_к - 1, K) + 1, \qquad (3.22)$$

– горизонтальный угол визирования α в момент начала синтеза апертуры для парциального кадра $n_к$:

$$\alpha(n_к)=\begin{cases}\dfrac{\Delta\alpha_{виз}}{2}+\left(K\cdot\Delta\alpha-\dfrac{\lambda}{2\cdot K_S\cdot l_x}\right)\cdot\mathrm{floor}\left(\dfrac{n_к-1}{K}\right), & \text{если}\ \Delta\alpha_{перекл}\geq\Delta\alpha_{отслеж}\\ \dfrac{\Delta\alpha_{виз}}{2} & \text{если}\ \Delta\alpha_{перекл}\leq\Delta\alpha_{отслеж}\end{cases}, \qquad (3.23)$$

– момент времени t начала синтеза апертуры для парциального кадра $n_к$:

$$t(n_к)=\begin{cases}\mathrm{mod}(n_к-1,K)\cdot\dfrac{\Delta\alpha\cdot R(\varepsilon)\cdot K_S}{V}+\\ +\dfrac{\lambda\cdot R(\varepsilon)}{2\cdot V\cdot l_x}\cdot\mathrm{floor}\left(\dfrac{n_{к_x}-1}{K}\right), & \text{если}\ \Delta\alpha_{перекл}\geq\Delta\alpha_{отслеж}\\ (n_к-1)\cdot\dfrac{\Delta\alpha\cdot R(\varepsilon)\cdot K_S}{V}, & \text{если}\ \Delta\alpha_{перекл}<\Delta\alpha_{отслеж}\end{cases}, \qquad (3.24)$$

где mod(A, B) – операция вычисления остатка от деления A на B, $n_к$ = 1… $Nк$ – порядковый номер визируемого парциального кадра, K – количество антенных лучей многолучевого визирования, $\Delta\alpha_{виз}$ – полный угловой сектор, в котором осуществляется визирование в соответствии с соотношением (3.21), $\Delta\alpha$ – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости, λ – средняя длина волны зондирующего сигнала, Ks – коэффициент сферичности, l_x – реализуемое путевое разрешение, floor() – операция округления в меньшую сторону до ближайшего целого, $R(\varepsilon)$ – наклонная дальность до визируемого участка местности, V – скорость движения РСА.

В данном режиме угловой интервал между положениями максимумов соседних лучей равен ширине ДН одного луча $\Delta\alpha$, то есть соседние приемо-передающие лучи перекрываются друг относительно друга по уровню -3 дБ. Пример многолучевой ДН в данном режиме съемки при K = 4 был представлен на рисунке 2.14.

Для рассматриваемой системы РСА разрешение 1 м при соблюдении эквивалентности продольного и поперечного разрешений при использовании K = 2 антенных лучей достижимо в диапазоне углов визирования ε = 28º…50º. Возможность использования K = 3 антенных лучей, при соблюдении эквивалентности продольного и поперечного разрешений, в рамках рассматриваемой системы РСА ограничено диапазоном углов ε = 47º…50º.

В целом выражение (3.21) позволяет разработчикам режима многолучевой прожекторной съемки определить требования к характеристикам РСА на основе того или иного набора исходных данных, либо провести оценку характеристик, основываясь на известных параметрах системы РСА.

Время $\Delta t_{съем}$ между началом съемки маршрута (излучением первого зондирующего импульса) и визированием начальной границы маршрута на траверзе для многолучевого прожекторного режима съемки вычисляется следующим образом:

$$\Delta t_{съем} = \frac{\left(\Delta\alpha_{виз} - \Delta\alpha\right) \cdot R\left(\varepsilon\right) \cdot K_S}{2 \cdot V}, \tag{3.25}$$

где $\Delta\alpha_{виз}$ – полный угловой сектор, в котором осуществляется визирование в соответствии с соотношением (3.21), $\Delta\alpha$ – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости, $R(\varepsilon)$ – наклонная дальность до визируемого участка местности, Ks – коэффициент сферичности, V – скорость движения РСА.

Длительность режима многолучевой прожекторной съемки, соответствующая временному интервалу между излучением первого зондирующего импульса и приемом последнего эхо-импульса, рассчитывается по заданной протяженности полосы съемки по путевой дальности Lc_x:

$$t_{съем} = t\left(N\kappa\right) - t\left(1\right) + \frac{\lambda \cdot R\left(\varepsilon\right)}{2 \cdot V \cdot l_x}, \tag{3.26}$$

где, $t(n_к)$ – времени начала синтеза апертуры для парциального кадра $n_к$ в соответствии с соотношением (3.24), $N\kappa$ – количество парциальных кадров визирования по путевой дальности, λ – средняя длина волны зондирующего сигнала, $R(\varepsilon)$ – наклонная дальность до визируемого участка местности, V – скорость движения РСА, l_x – реализуемое путевое разрешение

Протяженность реализуемого составного кадра по путевой дальности:

$$Lc_x = N\kappa \cdot 2 \cdot R(\varepsilon) \cdot \mathrm{tg}\left(\frac{\Delta\alpha}{2}\right), \tag{3.27}$$

где $N_к$ – количество парциальных кадров визирования, $R(\varepsilon)$ – наклонная дальность до визируемого участка местности, $\Delta\alpha$ – ширина ДН одного луча в горизонтальной плоскости.

3.2.2 Влияние эффекта частотной дисперсии АФАР в режиме многолучевой прожекторной съемки

Поперечная протяженность формируемого составного кадра с учетом влияния эффекта частотной дисперсии АФАР на прием рассчитывается по соотношению (2.26). На рисунке 3.13 представлена зависимость реализуемого поперечного размера формируемого составного кадра рассматриваемой системы РСА в зависимости от угла визирования.

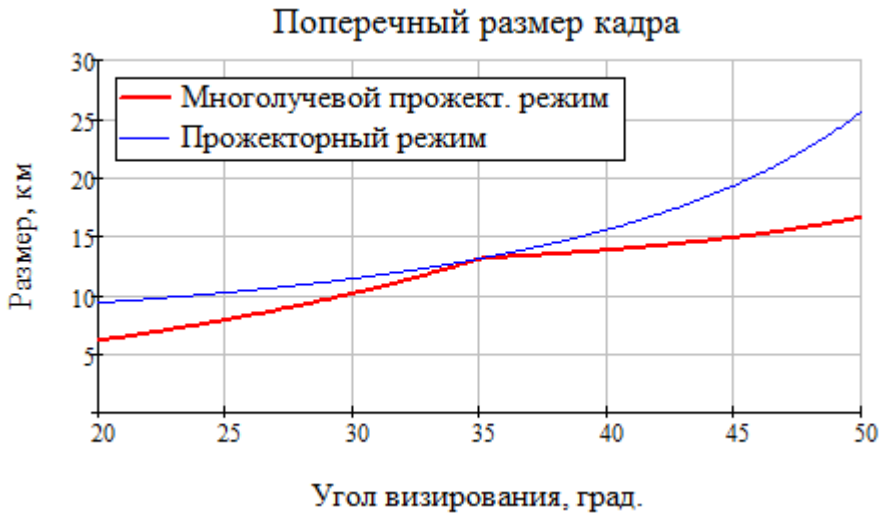

Рисунок 3.13 – Реализуемый поперечный размер формируемого составного кадра в многолучевом прожекторном режиме съемки при K = 2 (при номиналах поднесущих частот лучей f^1 = 9444 МГц и f^2 = 9756 МГц)

С учетом влияния частотной дисперсии АФАР на прием в РСА на реализуемые размеры составного кадра (рисунок 3.13) эффективность применения режима многолучевой прожекторной съемки целесообразно выразить

в отношении площадей визируемых кадров. На рисунке 3.14 представлено достижимое увеличение площади визируемого участка местности при ведении описанной многолучевой прожекторной съемки (наблюдение K = 2 антенными лучами $N\kappa$ = 12 кадров) по сравнению с одноканальной составной прожекторной съемкой (визирование одним лучом $N\kappa$ = 3 кадров) при полном использовании возможностей исследуемого РСА по отклонению антенного луча в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2°$ и реализации путевого разрешения l_x = 1 м. Дополнительные потери, вызванные сокращением длительности зондирующего импульса составляют 2,1 раза (при скважности зондирующего сигнала рассматриваемой системы РСА Q = 10 и периоде повторения зондирующих импульсов T_n = 240 мкс в соответствии с соотношением (2.8)).

Рисунок 3.14 – Увеличение площади визируемого кадра формируемого в многолучевом прожекторном режиме при визировании K = 2 антенными лучами (энергетические потери 2,1 раза) $N\kappa$ = 12 кадров по сравнению с составным одноканальным прожекторным режимом съемки при визировании $N\kappa$ = 3 парциальных кадров с разрешением l_x = 1 м

Например, для рассматриваемой системы режим классической прожекторной съемки позволяет реализовать кадр размером 5,20 км × 20,92 км с разрешением $l_x = l_x$ = 1 м при угле визирования ε = 45º (рисунок 2.3). Составная

одноканальная прожекторная съемка при визировании максимально доступного количества парциальных кадров $N_к$ = 3 обеспечивает расширение суммарного кадра до размеров 15,60 км × 20,92 км.

Ведение многолучевой прожекторной съемки при K = 2 антенных лучах (рисунок 3.15) позволяет реализовать составной кадр размерами 52,30 км × 16,48 км ($N_к$ = 12 кадров). То есть достигается увеличение путевой протяжённости формируемого кадра в 4 раза при энергетических потерях, вызванных сокращением длительности зондирующего сигнала, в 2,1 раза. Сокращение поперечной протяженности кадра за счет частотной дисперсии АФАР на прием составляет 1,27 раза, тем не менее площадь реализуемого кадра увеличивается в 3,15 раза.

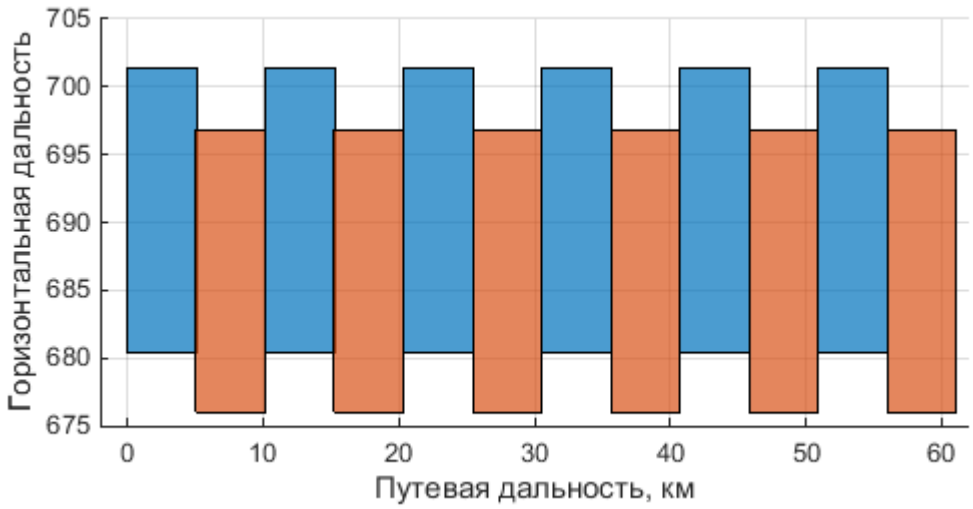

Рисунок 3.15 – Формирование составного кадра в многолучевом прожекторном режиме съемки при угле визирования ε = 45° (при визировании $N_к$ = 12 кадров K = 2 антенными лучами)

Представленный алгоритм многолучевого прожекторного визирования может эффективно применяться для увеличения визируемого участка местности в большей части полосы обзора. Повышение эффективности рассматриваемого РСА за счет ведения многолучевой прожекторной съемки обусловлена увеличением площади визируемого кадра в 3…4 раза при энергетических потерях

в 2,1 раза, достигаемой в большей части полосы обзора (ε = 28°…50°) при сохранении пространственного разрешения в 1 м.

3.3 Расширенный многолучевой прожекторный режим съемки

Режим многолучевой прожекторной съемки, рассмотренный в разделе 3.2, обеспечивает увеличение только путевой протяженности составного кадра. При этом, в рассмотренном примере, реализуется составной кадр, стороны которого относятся как 1 : 3 – что превосходит соотношение сторон 2,5 : 1 одного парциального кадра, образованного следом луча ДН на поверхности Земли. Данное соотношение может быть менее востребовано, чем размеры реализуемого кадра с соотношениям сторон приближенными к 1 : 1.

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. В этом случае закон управления диаграммой направленности будет отличен от режима многолучевой прожекторной съемки, а сам процесс формирования составного кадра, например для визирования M = 2 парциальных полос в режиме с K = 2 антенными лучами, будет происходить следующим образом (рисунок 3.16).

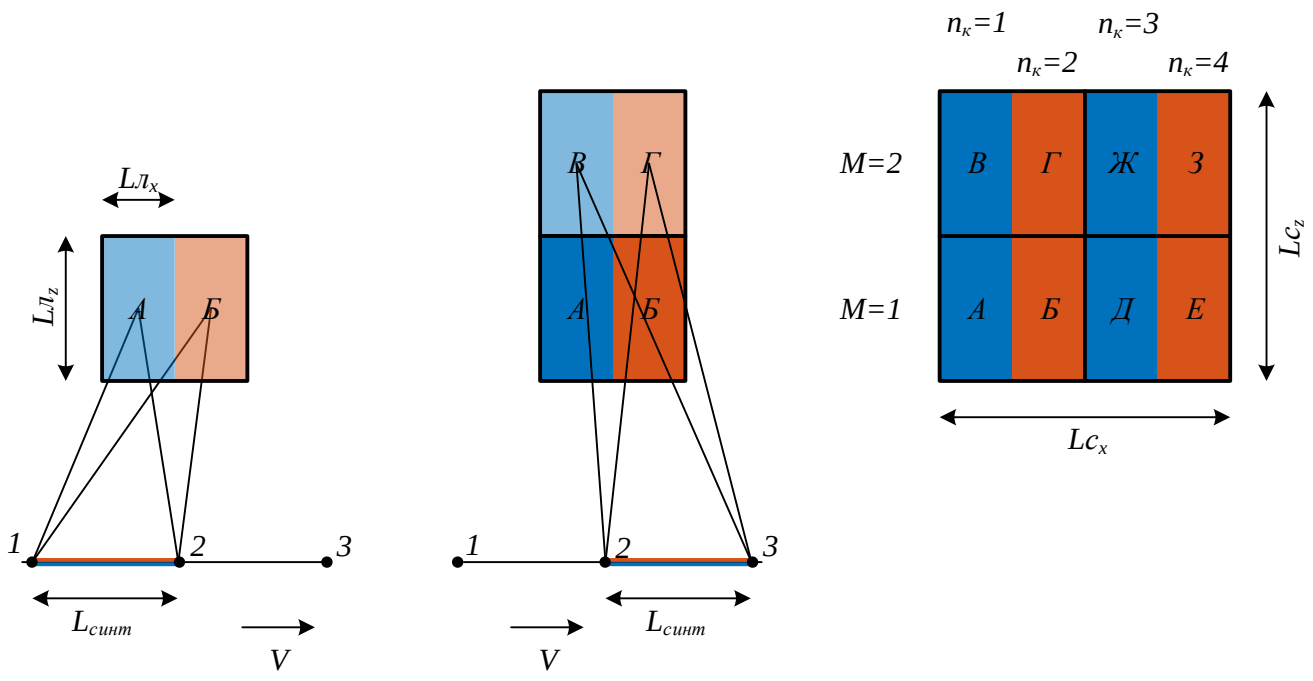

Рисунок 3.16 – Принцип радиолокационной съемки в расширенном многолучевом прожекторном режиме (при визировании K = 2 лучами в M = 2 парциальных полосах съемки)

В начале визирования оба антенных луча нацеливаются в направлении на, соответственно, парциальные кадры А и Б, после чего происходит параллельный синтез апертуры каждым из лучей. При этом оба антенных луча в процессе синтеза апертуры, преодолевают угловой сектор по горизонтали $\Delta\alpha_{отслеж}$, величина которого определяется соотношениями (3.18) и (3.18). После завершения синтеза апертуры, антенные лучи перенацеливаются в вертикальном направлении на следующую парциальную полосу (выбор углового интервал следования парциальных полос будет рассмотрен ниже и в общем случае определяется шириной многолучевой ДН в вертикальной плоскости), и процесс параллельного синтеза для парциальных кадров В и Г повторяется. Затем антенные лучи перенацеливаются по вертикали на первую парциальную полосу, а по горизонтали перенацеливаются в угловом секторе $\Delta\alpha_{перекл}$ (соотношение (3.20)) в направлении на соседний участок местности, и происходит последовательный

синтез апертур для парциальных кадров Д и Е, а затем для парциальных кадров Ж и З.

Реализуемое путевое разрешение l_x, количество парциальных полос визирования M, количество визируемых парциальных кадров вдоль траектории пути $N_к$ расширенного многолучевого прожекторного режима съемки ограничивается возможностями антенной системы по отклонению лучей ДН в горизонтальной плоскости, то есть необходимо выполнять контроль условия $\Delta\alpha_{виз} \leq \Delta\alpha_{скан}$, где $\Delta\alpha_{скан}$ – угловая ширина сектора в котором антенная система обеспечивает отклонение луча ДН, $\Delta\alpha_{виз}$ – полный угловой сектор, в котором осуществляется визирование:

$$\Delta\alpha_{виз}=\begin{cases} \mathrm{ceil}\left[\dfrac{N_к}{K}\right]\cdot\left(\dfrac{M\cdot\lambda}{2\cdot K_s\cdot l_x}-K\cdot\Delta\alpha\right)+ & \text{если}\, M\cdot\Delta\alpha_{отслеж}\geq\Delta\alpha_{перекл} \\ \Delta\alpha\cdot\left(2\cdot K-1\right), & \\ \dfrac{M\cdot\lambda}{2\cdot K_s\cdot l_x}+(K-1)\cdot\Delta\alpha & \text{если}\, M\cdot\Delta\alpha_{отслеж}<\Delta\alpha_{перекл} \end{cases}, \quad (3.28)$$

Как было отмечено выше, режим многолучевой прожекторной съемки целесообразно применять при обеспечении эквивалентности путевого и поперечного разрешений, в рамках рассматриваемой системы РСА, при количестве антенных лучей K = 2. На рисунке 3.17 представлено реализуемое путевое разрешение расширенного многолучевого прожекторного режима при визировании M = 1…3 парциальных полос визирования в зависимости от суммарного количества наблюдаемых парциальных кадров вдоль линии пути при использовании K = 2 антенных лучей. Так же, для сравнения, нанесена аналогичная зависимость для описанного выше режима многолучевой прожекторной съемки и отмечено предельно реализуемое разрешение в режиме многолучевой сканирующей съемки при визировании M = 2 парциальных полос K = 4 антенными лучами.

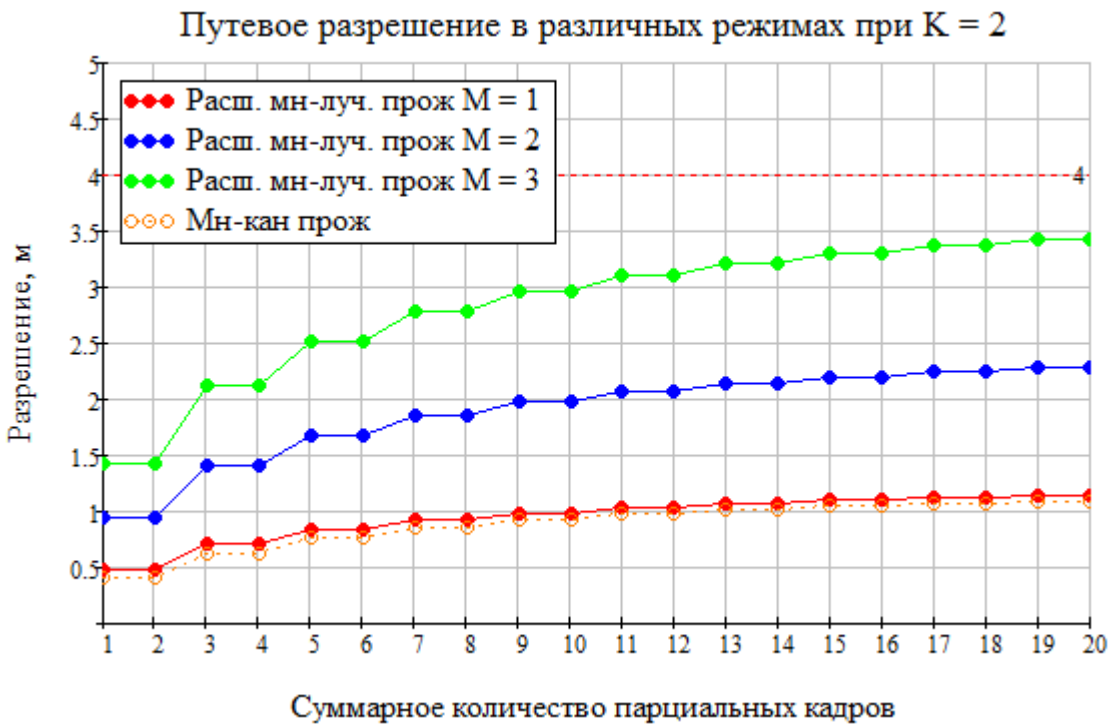

Рисунок 3.17 – Реализуемое путевое разрешение рассматриваемой системы РСА в режиме расширенной многолучевой прожекторной съемки при использовании K = 2 антенных лучей ДН и полного углового сектора визирования $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2^{o}$ в зависимости от суммарного количества визируемых вдоль линии пути парциальных кадров $N\kappa$ при различном количестве парциальных полос визирования M. Для сравнения пунктирной линией отмечена аналогичная зависимость для режима многолучевой прожекторной съемки при K = 2 и для многолучевого сканирующего режима при K = 4.

При M = 1 и расширенном многолучевом прожекторном режиме (с K = 2 антенными лучами) реализуется наблюдение составного кадра, аналогичного формируемому в режиме многолучевой прожекторной съемки. Однако за счет отличия техники визирования в режиме расширенной многолучевой прожекторной съемки путевое разрешение несколько ниже.

Для случая наблюдения M = 2 парциальных полос при увеличении путевой протяженности формируемого кадра (при увеличении количества визируемых парциальных кадров $N\kappa$) в данном режиме съемки путевое разрешение l_x приближается к величине разрешения, реализуемого в классической полосовой

съемке, в то же время визирование осуществляется в двух парциальных полосах – то есть достигается двукратное расширение реализуемой полосы съемки по горизонтальной дальности по сравнению с полосовым режимом съемки.

Для ведения расширенного многолучевого прожекторного визирования реализуется следующий алгоритм съемки:

– номер луча (канала обработки) k при визировании парциального кадра $n_к$ в любой парциальной полосе определяется соотношением (3.22);

– горизонтальный угол визирования α в момент начала синтеза апертуры для парциального кадра $n_к$ в парциальной полосе m:

$$\alpha(m,n_к)=\begin{cases}\dfrac{\Delta\alpha_{виз}-\Delta\alpha\cdot K}{2}-\dfrac{\lambda\cdot(m-1)}{2\cdot K_S\cdot l_x}+ \\ +\left(\mathrm{ceil}\left(\dfrac{n_к}{K}\right)-1\right)\cdot\left(K\cdot\Delta\alpha-\dfrac{\lambda\cdot M}{2\cdot K_S\cdot l_x}\right)+ \\ +\Delta\alpha\cdot\left(\mathrm{rem}(n_к-1,K)-\left(\dfrac{K}{2}-1\right)\right), & \text{если } M\cdot\Delta\alpha_{отслеж}\geq\Delta\alpha_{перекл} \\ \dfrac{\Delta\alpha_{виз}}{2}-\dfrac{\lambda\cdot(m-1)}{2\cdot K_S\cdot l_x}+ \\ +\Delta\alpha\cdot\left(\mathrm{rem}(n_к-1,K)-\left(\dfrac{K-1}{2}\right)\right), & \text{если } M\cdot\Delta\alpha_{отслеж}<\Delta\alpha_{перекл}\end{cases}; \quad (3.29)$$

– момент времени t начала синтеза апертуры для парциального кадра $n_к$ в парциальной полосе m:

$$t(m,n_к)=\begin{cases}\left(m-1+\left(\mathrm{ceil}\left(\dfrac{n_к}{K}\right)-1\right)\cdot M\right)\cdot\dfrac{\lambda\cdot R(\varepsilon_{m=1})}{2\cdot V\cdot l_x}, & \text{если } M\cdot\Delta\alpha_{отслеж}\geq\Delta\alpha_{перекл} \\ \mathrm{floor}\left(\dfrac{n_к-1}{K}\right)\cdot K\cdot\dfrac{\Delta\alpha\cdot R(\varepsilon_{m=1})\cdot Ks}{V}+ \\ +\dfrac{\lambda\cdot R(\varepsilon_{m=1})}{2\cdot V\cdot l_x}\cdot(m-1), & \text{если } M\cdot\Delta\alpha_{отслеж}<\Delta\alpha_{перекл}\end{cases}, \quad (3.30)$$

где m = 1…M – порядковый номер визируемой парциальной полосы, M – количество парциальных полос визирования, $n_к$ = 1… $Nк$ – порядковый номер визируемого парциального кадра, K – количество антенных лучей многолучевого визирования, λ – средняя длина волны зондирующего сигнала, $R(\varepsilon_{m=1})$ – наклонная

дальность до центра первой парциальной полосы, ceil() – операция округления в большую сторону до ближайшего целого, V – скорость движения РСА, l_x – реализуемое путевое разрешение, floor(A, B) – операция округления в меньшую сторону до ближайшего целого, $\Delta\alpha$ – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости, Ks – коэффициент сферичности.

Время $\Delta t_{съем}$ между началом съемки маршрута (излучением первого зондирующего импульса) и визированием начальной границы маршрута на траверзе для расширенного многолучевого прожекторного режима съемки вычисляется следующим образом:

$$\Delta t_{съем}=\frac{\left(\Delta\alpha_{виз}-\Delta\alpha\right)\cdot R\left(\varepsilon_{m=1}\right)\cdot K_S}{2\cdot V}, \qquad (3.31)$$

где $\Delta\alpha_{виз}$ – полный угловой сектор, в котором осуществляется визирование в соответствии с соотношением (3.28), $\Delta\alpha$ – ширина одного луча ДН в горизонтальной плоскости, $R(\varepsilon_{m=1})$ – наклонная дальность до центра первой парциальной полосы, Ks – коэффициент сферичности, V – скорость движения РСА.

Длительность режима многолучевой прожекторной съемки, соответствующая временному интервалу между излучением первого зондирующего импульса и приемом последнего эхо-импульса, рассчитывается по заданной протяженности полосы съемки по путевой дальности Lx_c:

$$t_{съем}=t\left(M,N_к\right)-t\left(1,1\right)+\frac{\lambda\cdot R\left(\varepsilon_{m=1}\right)}{2\cdot V\cdot l_x}, \qquad (3.32)$$

где $t(m,\ n_к)$ – момент времени t начала синтеза апертуры в соответствии с соотношением (3.30), M – количество парциальных полос визирования, $Nк$ – количество парциальных кадров визирования, λ – средняя длина волны зондирующего сигнала, $R(\varepsilon_{m=1})$ – наклонная дальность до центра первой парциальной полосы, V – скорость движения РСА, l_x – реализуемое путевое разрешение.

Поперечная протяженность формируемого кадра с учетом влияния частотной дисперсии АФАР на прием определяется выражением (3.17). Путевая протяженность формируемого кадра определяется соотношением (3.27).

На рисунке 3.18 представлено достижимое увеличение площади визируемого кадра в режиме расширенной многолучевой прожекторной съемки (наблюдение К = 2 антенными лучами *Nк* = 12 кадров в *M* = 2 парциальных полосах) при полном использовании возможностей исследуемого РСА по отклонению антенного луча в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2°$. Дополнительные потери, вызванные сокращением длительности зондирующего импульса составляют 2,1 раза (при скважности зондирующего сигнала рассматриваемой системы РСА *Q* = 10 и периоде повторения зондирующих импульсов T_n = 230 мкс в соответствии с соотношением (2.8)).

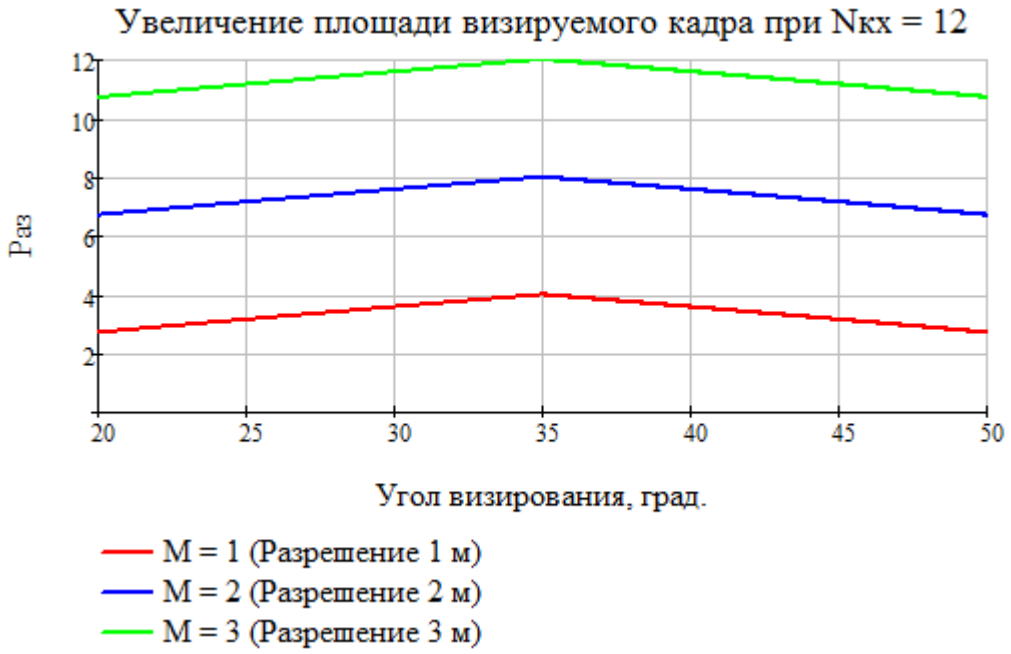

Рисунок 3.18 – Увеличение площади визируемого кадра формируемого в расширенном многолучевом прожекторном режиме при визировании *K* = 2 антенными лучами (энергетические потери 2,1 раза) *Nк* = 12 кадров по сравнению с составной одноканальной прожекторной съемкой при визировании *Nк* = 3 парциальных кадров с разрешением l_x = 1 м.

Увеличение числа парциальных полос визирования M снижает влияние эффекта частотной дисперсии АФАР при многолучевом визировании на поперечную протяжённость реализуемого составного кадра, поскольку данный эффект оказывает существенное влияние только на первую и последнюю парциальные полосы визирования.

Например, в режиме расширенной многолучевой прожекторной съемки при визировании при K = 2 антенными лучами $N\kappa$ = 8 кадров в M = 2 парциальных полосах при угле визирования центра составного кадра ε = 45º (рисунок 3.19) размер составного кадра 41,61 км × 37,40 км м пространственным разрешением 2 м при использовании полного доступного сектора визирования рассматриваемого РСА $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2°$.

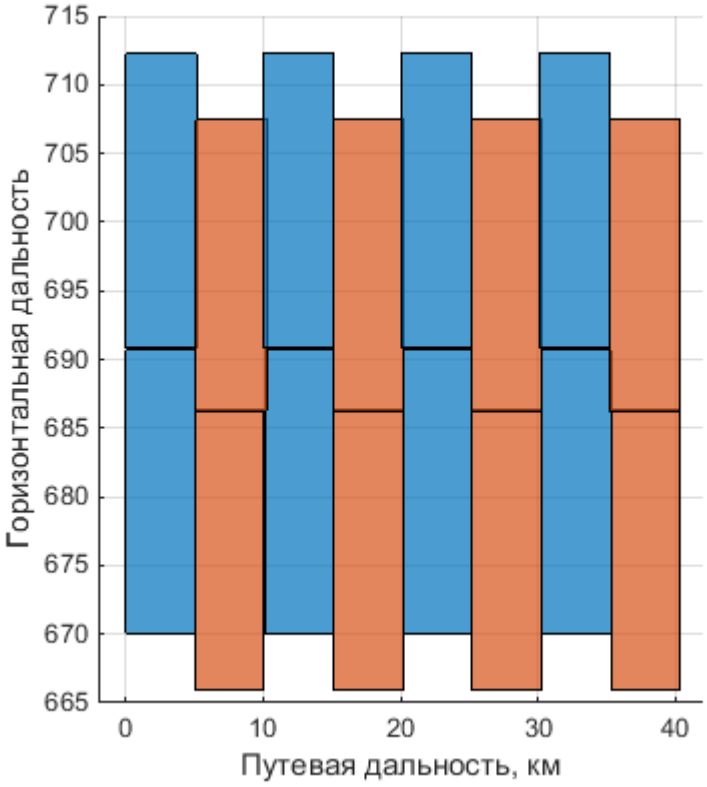

Рисунок 3.19 – Формирование составного кадра в расширенном многолучевом прожекторном режиме съемки при угле визирования ε = 45° (при визировании $N\kappa$ = 8 кадров K = 2 антенными лучами)

Алгоритм расширенной многолучевой прожекторной съемки позволяет увеличить поперечный размер визируемого кадра за счет сокращения разрешения по путевой дальности по сравнению с многолучевым прожекторным режимом съемки. На рисунке 3.19 представлена одна из возможных конфигураций составного кадра, образованного несколькими последовательными наблюдениями многолучевой ДН Земной поверхности. В рамках исследуемой системы РСА возможные и другие сочетания количества используемых антенных лучей K при наблюдении составного кадра в M парциальных полосах с путевой протяженностью $N\kappa$ и визировании центра составного кадра под углом $\varepsilon_ц$, реализующего, таким образом, размеры визируемого участка местности $Lc_x \times Lc_z$ с путевым разрешением l_x и поперечным разрешением l_z.

3.4 Сравнительный анализ многолучевых режимов съемки с разнесением антенных лучей в горизонтальной плоскости

Многообразие режимов многолучевого визирования с цифровым формированием азимутальной ДН на прием приводит к необходимости решения задачи оптимизации параметров многолучевого визирования и реализуемых характеристик съемки на этапе системного проектирования РСА космического базирования.

В таблице 3.2 и на рисунке 3.20 представлены сравнительная характеристика прожекторных режимов съемки (однолучевого и многолучевого), реализация которых возможна в рассматриваемой системе РСА при полном использовании возможностей антенной системы по отклонению лучей ДН в горизонтальной плоскости $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2°$ при визировании центра кадра под углом $\varepsilon_ц = 35°$.

Таблица 3.2 – Характеристики многолучевого визирования при различной реализации прожекторной съемки рассматриваемой системы РСА.

Характеристики визирования	Составн. прожект.	Мн-луч. прожект.	Расшир. мн-луч. прожект.	Расшир. мн-луч. прожект.
Кол-во антенных лучей, *K*	**1**	**2**	**2**	**3**
Параметры визирования – Кол-во парциальных полос, *M* – Кол-во парциальных кадров, *Nк*	 1 3	 1 10	 2 2	 2 6
Геометрические размеры кадра – Путевая протяженность, Lc_x – Поперечная протяженность, Lc_z – Площадь кадра	 13,1 км 14,2 км 186,0 км^2	 43,1 км 14,2 км 607,7 км^2	 8,7 км 28,4 км 247,1 км^2	 26,2 км 28,4 км 744,1 км^2
Увеличение площади кадра	**–**	**3,3 раза**	**1,3 раза**	**4,0 раза**
Разрешение, $l_x = l_x$	1 м	1 м	1 м	1,5 м
Ухудшение разрешения	**–**	**–**	**–**	**1,5 раза**
Дополнительные потери, P_{loss}	**-**	**3,2 дБ**	**3,2 дБ**	**5,1 дБ**

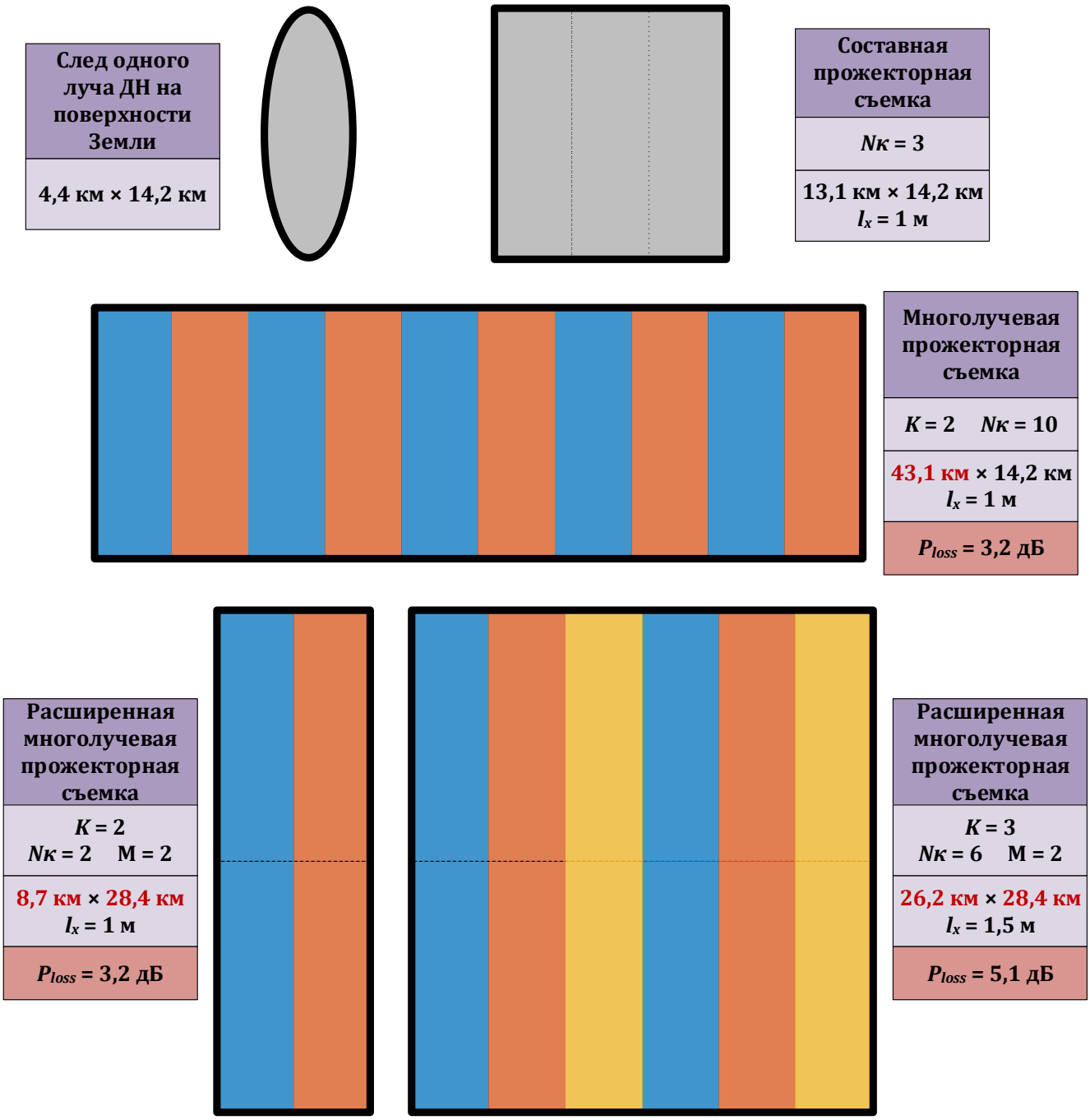

Рисунок 3.20 – Сопоставление реализуемых характеристик радиолокационного визирования в исследуемой системе РСА при реализации составной прожекторной, многолучевой прожекторной и расширенной многолучевой прожекторной съемок с различными характеристикам при визировании центра кадра под углом $\varepsilon_ц$ = 35°

Как было показано на рисунке 3.17 режим многолучевой прожекторной съемки позволяет достигать наивысшее путевое разрешение из всех

рассмотренных вариантов многолучевого визирования (в рамках исследуемой системы РСА) за счет специфики радиолокационного визирования в данном режиме съемки. Поэтому данный режим съемки целесообразно применять для достижения наивысшей разрешающей способности (десятки сантиметров) в кадровых режимах с одновременным увеличением протяженности визируемого участка местности по путевой дальности. При этом реализуемое разрешение будет обратно пропорционально количеству визируемых парциальных кадров $N_к$ вдоль траектории движения РСА.

Режим расширенной многолучевой съемки позволяет вести радиолокационное визирование при сохранении разрешения в 1 м и одновременным увеличением размеров формируемого составного кадра как по путевой, так и по горизонтальной дальности (в рамках исследуемой системы РСА). Многократное расширение визируемого участка местности возможно за счет ухудшения величины путевого разрешения. Например, как показано в таблице 3.1 в рамках исследуемого РСА, увеличение площади кадра в 4 раза (по сравнению с составной прожекторной съемкой) при ухудшении разрешения в 1,5 раза и дополнительных потерях энергетических характеристик на 5,1 дБ.

Конфигурация составного кадра в режиме расширенной многолучевой прожекторной съемки сходна с конфигурацией, реализуемой в режиме многолучевой сканирующей съемки с применением алгоритма дополнительного отклонения антенных лучей по горизонтали для компенсации частотной дисперсии АФАР на прием, рассмотренного в разделе 3.1. Режим расширенной многолучевой прожекторной съемки позволяет осуществлять визирование с разрешением в несколько раз выше, чем в многолучевой сканирующей съемке. На рисунке 3.21 представлены расчетные значения реализуемого разрешения в расширенном многолучевом прожекторном режиме (в соответствии с соотношением (3.29)) и в многолучевом сканирующем режиме (в соответствии с соотношением (3.5)) в зависимости от количества парциальных полос визирования M при различном количестве антенных лучей K. Расчет данной зависимости для расширенного многолучевого прожекторного режима выполнен

при использовании полного доступного азимутального сектора сканирования $\Delta\alpha_{виз} = \Delta\alpha_{скан} = 2°$ и количестве парциальных кадров визирования $N\kappa = 1000$.

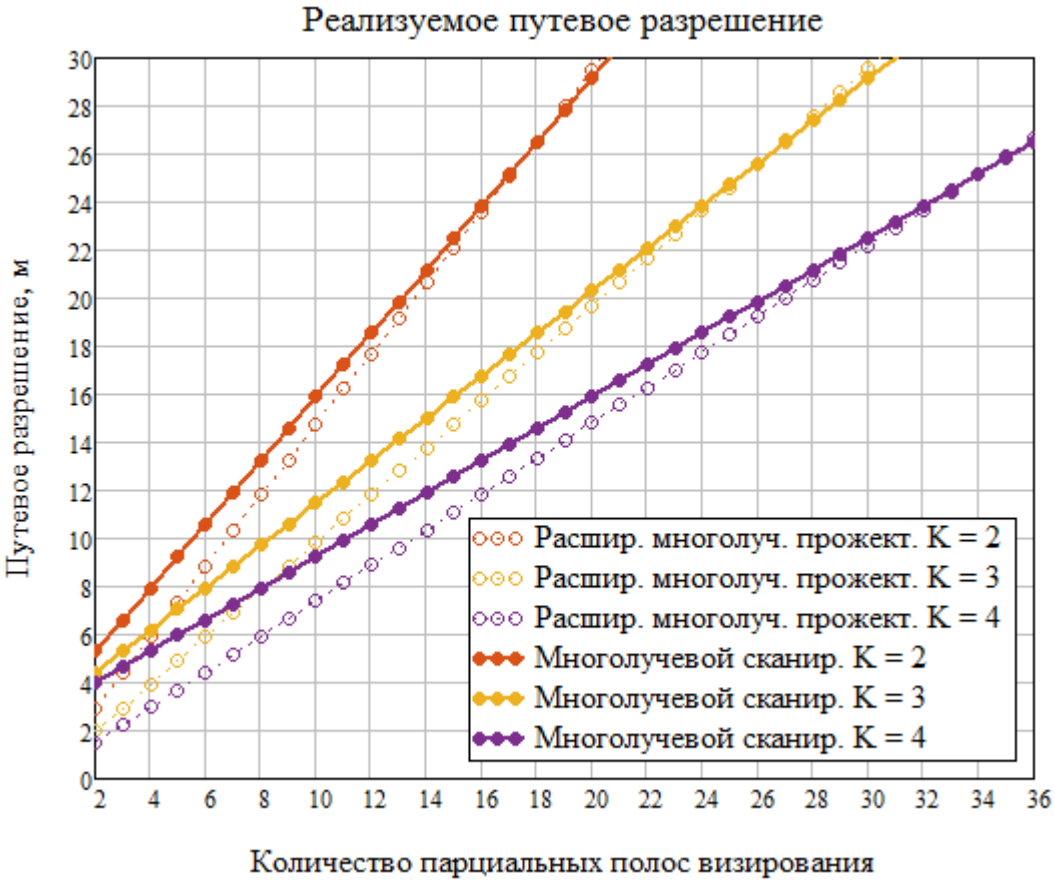

Рисунок 3.21 – Реализуемое путевое разрешение в рассматриваемой системе РСА при реализации многолучевой сканирующей съемки в сочетании с алгоритмом азимутального перенацеливания для компенсации эффекта частотной дисперсии АФАР на прием и расширенной многолучевой прожекторной съемке

Расширенный многолучевой прожекторный режим реализует разрешение выше, чем аналогичный многолучевой сканирующий режим. В то же время режим расширенной многолучевой сканирующей съемки задействует более широкий азимутальный угловой сектор визирования $\Delta\alpha_{виз}$, чем режим многолучевой сканирующей съемки в сочетании с применением дополнительного отклонения антенных лучей по горизонтали для компенсации эффекта частотной дисперсии АФАР на прием. В связи с этим данный режим съемки имеет

ограничения по количеству визируемых парциальных полос визирования M, связанные с существенным расширением задействуемых углов визирования $\Delta\alpha_{виз}$. На рисунке 3.22 представлено сравнение величин задействуемого азимутального сектора визирования $\Delta\alpha_{виз}$ для данных режимов съемки (в соответствии с соотношениями (3.29) и (3.9)) при условии соблюдения эквивалентности величин путевого разрешения, которое определяется многолучевым сканирующим режимом в соответствии с соотношением (3.5).

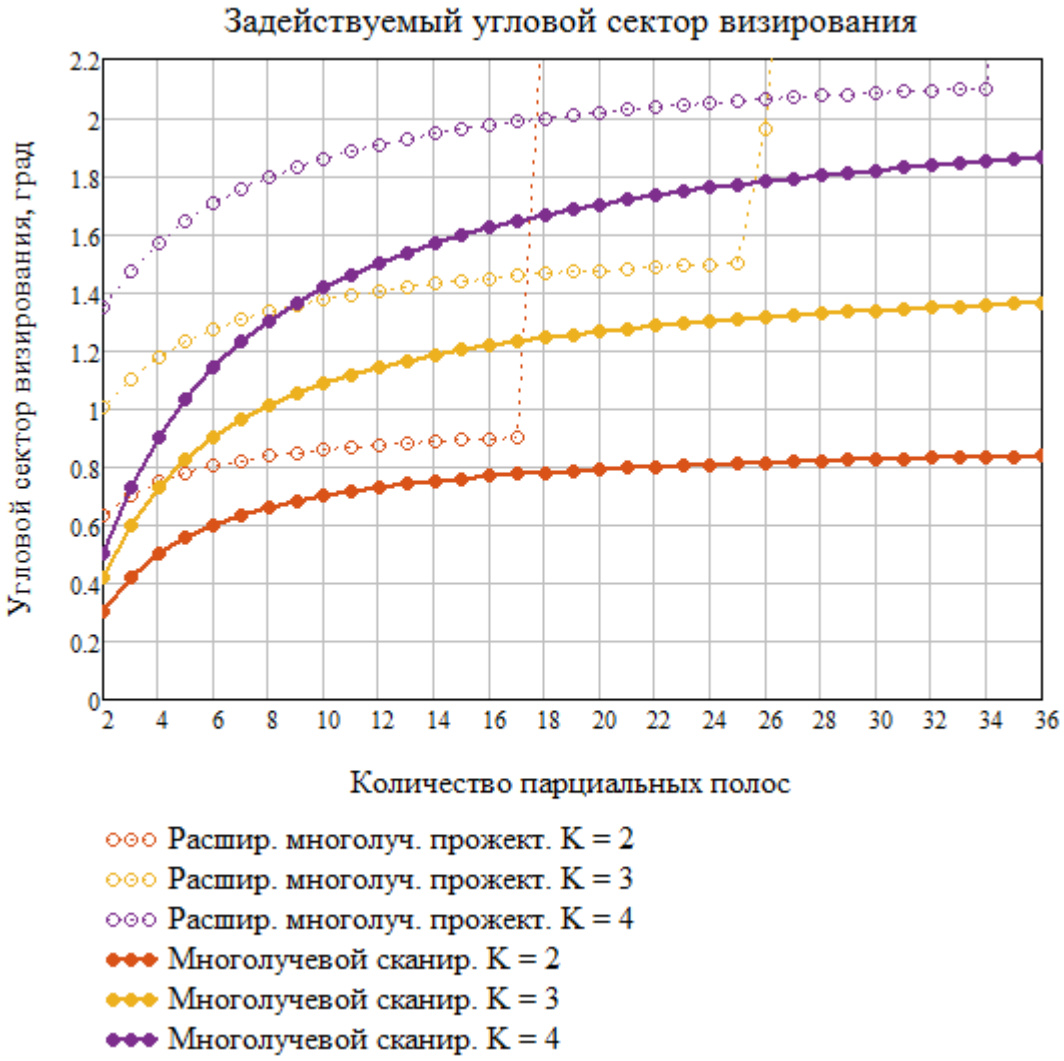

Рисунок 3.22 – Задействуемый угловой сектор визирования по азимуту $\Delta\alpha_{виз}$ в расширенном многолучевом прожекторном и многолучевом сканирующем режимах съемки в зависимости от количества парциалных полос визирования M при различном количестве используемых антенных лучей K

Например, режим расширенной многолучевой прожекторной съемки при визировании K = 2 антенными лучами M = 2…17 парциальных полос, в соответствии с соотношением (3.23) реализует визирование с паузами (когда один антенный луч после окончания синтеза апертуры парциального кадра перенацеливается на следующий парциальный кадр не по окончании визирования предыдущего, а через паузу), пример которого был проиллюстрирован рисунком 3.11. При K = 3 максимальное количество парциальных полос визирования, в рамках рассматриваемой системы РСА, M = 26, при K = 4 максимальное количество парциальных полос визирования составляет М = 18 (при заданных ограничениях на сектор горизонтального сканирования в АФАР $\Delta\alpha_{скан} = 2°$).

В этих же точках на графике, представленном на рисунке 3.21, сходятся величины реализуемых разрешений в многолучевом сканирующем и расширенном многолучевом прожекторном режимах. Это связано со спецификой наблюдения в прожекторных режимах, которая заключается в отслеживании центра кадра в процессе синтеза апертуры – что задействует более широкий азимутальный сектор визирования, чем сканирующие режимы съемки, где синтез осуществляется неподвижными антенными лучами.

Поэтому режим расширенной многолучевой прожекторной съемки целесообразно применять для увеличения размеров визируемого участка местности с реализацией разрешения порядка единиц метров. Однако необходимо принимать во внимание, что прожекторная съемка ведет к более существенным падениям энергетических характеристик РЛИ на границах парциальных кадров, чем сканирующие режимы, где используется скольжение ДН по поверхности Земли.

Режим многолучевой сканирующей съемки целесообразно применять для улучшения разрешения при обзорном визировании с широкой полосой съемки, реализуемого на базе технологии ScanSAR или при реализации визирования криволинейного маршрута [97]. Так же возможно сочетание данного подхода с технологиями TOPS, обзор которого был представлен в разделе 1.3.

Решение о целесообразности применения того или иного режима многолучевого визирования должно приниматься на основе анализа характеристик системы РСА и предварительного расчета достижимых параметров радиолокационной съемки в рамках системного проектирования космических РСА. Поскольку многолучевые режимы с пространственно-временным разделением зондирующих импульсов приводят к энергетическим потерям, то при их проектировании необходимо закладывать дополнительный энергетический потенциал антенной системы РСА.

3.5 Выводы по главе

1. Разработан алгоритм многолучевой сканирующей съемки, позволяющий улучшать разрешающую способность обзорных режимов визирования или расширять полосу съемки при сохранении путевой разрешающей способности в РСА. Достижимые показатели улучшения радиолокационного визирования, по сравнению с однолучевым сканирующим режимом, реализуются за счет дополнительных энергетических потерь. Эффективность ведения многолучевой сканирующей съемки выражается в улучшении разрешения в 2…3 раза при использовании 3-4 антенных лучей, за счет ослабления энергетических характеристик в 3,3…4,7 раза.

2. Проанализировано влияние эффекта частотной дисперсии АФАР на прием на характеристики многолучевого сканирующего визирования с частотным разделением лучей, приводящее к появлению пропусков при радиолокационной съемке. Предложены два алгоритма компенсации пропусков при радиолокационной съемке: первый заключается в специальном чередовании номиналов поднесущих частот между антенными лучами (отличающийся тем, что не требует дополнительного расширения азимутального сектора визирования); второй – во введении дополнительного отклонения многолучевой ДН по азимуту

(реализуемый при произвольном количестве антенных лучей и парциальных полос визирования).

3. Разработан алгоритм многолучевой прожекторной съемки, позволяющий сохранять в рамках исследуемой системы РСА, субметровое путевое разрешение при одновременном увеличении путевой протяженности составного кадра в 4 раза при использовании 2 антенных лучей за счет энергетических потерь в 2,1 раза. Достижимое большее увеличение протяженности кадра реализуется за счет ведения радиолокационной съемки с неэквивалентными разрешениями по путевой и горизонтальной дальностям за счет увеличения количества используемых антенных лучей и дополнительных энергетических потерь.

4. Разработан алгоритм расширенной многолучевой прожекторной съемки, позволяющий увеличивать размер формируемого составного кадра одновременно по горизонтальной и путевой дальности в 1,3 раза при сохранении разрешения в 1 м (в рамках рассматриваемой системы РСА) за счет ведения наблюдения 2 антенными лучами (дополнительные энергетические потери в 2,1 раза). Большее расширение кадра достигается за счет ухудшения разрешения и увеличения количества используемых антенных лучей, например, в 4 раза при использовании 3 антенных лучей.

5. Представленная сравнительная характеристика многолучевых режимов, предложенные алгоритмы оценки реализуемых характеристик и планирования многолучевого визирования позволяют осуществлять системное проектирование космических РСА, реализующих цифровое формирование многолучевой ДН в горизонтальной плоскости с 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 формированием азимутальной цифровой приемной ДН 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 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 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.

Результаты диссертационной работы реализованы в АО «НИИ ТП» при создании радиолокационного комплекса дистанционного зондирования Земли для космического комплекса «Обзор-Р».

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Турук В.Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / Под ред. В.С. Вербы – М.: Радиотехника, 2010 – 680 с.: ил. (Научная серия «Системы мониторинга воздушного, космического пространства и земной поверхности», редактор серии В. С. Верба).

2. Радиолокационные станции воздушной разведки / Под ред. Г.С. Кондратенкова. – М.: Воениздат, 1983. – 152 с, ил.

3. Неронский Л.Б., Михайлов В.Ф., Брагин И.В. Микроволновая аппаратура дистанционного зондирования Земной поверхности земли и атмосферы. Радиолокаторы с синтезированной апертурой антенны / Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 1999. Ч.2. 220 с.: ил.

4. Jordan, R.L. The Seasat-A Synthetic Aperture Radar System / R.L. Jordan. / IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 1980. – vol. 5, № 2. – pp. – 154-164.

5. Арманд, Н. А. Космические радары с синтезированной апертурой в дистанционном зондировании Земли современные системы и перспективные проекты / Н.А. Арманд, А. И. Захаров, Л. Н. Захарова. // Исследование Земли из космоса. – 2010. – № 2. – сс. 3-13.

6. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов, В.М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. – М.: КРАСАНД, 2012. – 248 с.

7. Л. Н. Захарова. Радиофизические методы исследования характеристик морских льдов методами радарной поляриметрии [Электронный ресурс] / Л. Н. Захарова. А. И. Захаров, М. В. Сорочинский. // Журнал радиоэлектроники. – 2017. – №2 (февраль 2017). Режим доступа: http://jre.cplire.ru/jre/feb17/1/text.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

8. Внотченко, С.Л. Возможности создания широкозахватных радиолокаторов с синтезированной апертурой для малых космических аппаратов /

С.Л. Внотченко, А.И. Коваленко, В.В. Риман, С.Н. Смирнов, А.В. Шишанов // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2013. – №3. – С. 21-26.

9. НИИ точных приборов – 65 лет на службе Отечеству / под общ. ред. генерального директора АО «НИИ ТП» А.В. Шишанова.; [сост.: Китабов Р.Г., Исполатов О.Г., Митрофанов Д.А., Корешкова Т.А.]. – М.: ООО Издательский Дом «Бедретдинов и Ко», 2017. – 288 с.: ил.

10. Космический радиолокатор «Северянин-М» с широкой полосой съемки / С. Л. Внотченко [и др.] // Зондирование земных покровов радарами с синтезированной апертурой: материалы Рос. науч. конф. (06.09–10.09.2010, г. Улан-Удэ): электрон. сб. докл. / ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН. М., 2010. – сс. 72–84.

11. Обзор современных радиолокаторов с синтезированной апертурой космического базирования и анализ тенденций их развития / М. И. Нониашвили, [и др.] // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2012. – № 8. – сс. 94-114.

12. Turuk, V. Russian Spaceborne Synthetic Aperture Radar «Strizh» for Light Satellites of «Condor-E» type / V. Turuk, V. Verba, M. Golovanova, L. Neronskiy, S. Zaitsev, E. Tolstov // Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016 – pp. 947-952.

13. Студия РОСКОСОМОС, ФГУП «ЦЭНКИ». «Касатка»: зоркое око [Сюжет программы «Космонавтика»] // YouTube (10.06.2017). – 2017. – Режим доступа: https://www.youtube.com/watch?v=NtkM1aWskWw (дата обращения 10.04.2018).

14. Ахметов Р. Н. Космический комплекс радиолокационного наблюдения Земли «Обзор-Р». Основные характеристики и состояние разработки / Р. Н. Ахметов, А. А. Журавлёв, Е. В. Иващенко, А. Н. Кирилин, / А. В. Седов, Н. Р. Стратилатов // Материалы 15-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии» 26-29 октября, 2015 г., Юкатан, Мексика. – 2015. – сс. 7-8.

15. Внотченко С.Л., Коваленко А.И., Риман В.В., Шишанов А.В. Технический облик многоапертурного космического радиолокатора с синтезированной апертурой на основе АФАР X-диапазона / Всерос. радиофизические науч. чтения-конференции памяти Н.А. Арманда. Сб. докл. науч.-практич. конф. Муром: полиграфический центр МИ ВлГУ. 2010. С. 91–95.

16. Kovalenko, A. Design of Prospective Spaceborne Multi-Aperture UWB Polarimetric High Performance SAR System / A. I. Kovalenko, V. V. Riman, A. V. Shishanov, S. L. Vnotchenko // Conference Proceedings of 4th Microwave and Radar Week MRW-2010 – 11th International Radar Symposium, IRS 2010. – 2010. – pp. 490-492.

17. Bachmann, M. TerraSAR-X Antenna Calibration and Monitoring Based on a Precise Antenna Model / M. Bachmann, M. Schwerdt, B. Brautigam // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – Vol. 48, № 2. – pp. 690-701.

18. Buckreuss, S. TerraSAR-X and TanDEM-X Mission Status / S. Buckreuss, M. Zink. // Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016 – pp. 535-540.

19. KOMPSAT-5 PRODUCT SPECIFICATIONS. Standard Products Specifications. Version 1.2. July, 2015 [Электронный ресурс] // KOREA AEROSPACE RESEARCH INSTITUDE. SI IMAGING SERVICES Co., LTD. – (июль 2015). – Режим доступа: http://www.si-imaging.com/wp-content/uploads/2016/12/KOMPSAT-5_Standard_Products_Specifications_v1.2.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

20. COSMO-SkyMed. Mission and Products Description [Электронный ресурс] // Italian Space Agency. – № 2 (31.05.2016). – Режим доступа: https://www.asi.it/sites/default/files/attach/bandi/cosmo-skymed_mission_and_products_description_update_2_1.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

21. Battagliere, M. L. Aerospace technology and Dual Use: COSMO-SkyMed mission status and future perspectives / M. L. Battagliere, M. G. Daraio, P. Sacco, M.

Virelli, A. Coletta. // Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016 – pp. 1040-1043.

22. Yokota, Y. Newly developed X-band SAR system onboard Japanese small satellite «ASNARO-2» / Y. Yokota, Y. Okada, K. Iribe, M. Tsuji, A, Ando, Y. Kunii // Proceedings of 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). – 2013. pp. – 81-83.

23. Шпенст, В. Радиолокационные станции дистанционного зондирования Земли / В. Шпенст // Компоненты и технологии. – 2013. – №3. – сс. 154-158.

24. Potin, P. Sentinel-1 Mission Status. / P. Potin, B. Rosich, P. Grimont, N. Miranda, I Shurmer, A. O'Connel, T. Torres, M. Krassenburg // Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016 – pp. 59-64.

25. Scipal, K. The SAOCOM-CS mission: ESA's first bistatic and tomographic L-band mission / K. Scipal, M. Davidson // Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2017. pp. 123-124

26. Chandrashekar, S. China's Constellation of Yaogan Satellites & the Anti-Ship Ballistic Missile: May 2016 Update [Электронный ресурс] / S. Chandrashekar and Soma Perumal // International Strategic and Security Studies Programme National Institute of Advanced Studies. Bangalore. INDIA. – (May 2016). – Режим доступа: http://isssp.in/wp-content/uploads/2016/05/Yaogan-and-ASBM-May-2016-Report.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

27. Zhang, Q.J. System design and key technologies of the GF-3 satellite / Zhang, Q.J. // Acta Geod. Cartogr. – 2017. Vol. 46. – pp. 269–277. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170049

28. 2014 NISAR Applications Workshop: Linking Mission Goals to Societal Benefit. October 28-29, 2014. Workshop Report [Электронный ресурс]. – (октябрь 2014) – Режим доступа: https://nisar.jpl.nasa.gov/files/nisar/2014_NISAR_Applications_Workshop_Report1.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

29. Dara A. Panahy. Space Business Review [Электронный ресурс] / Dara A. Panahy, Bijan Ganji. // Milbank. – (January 2018). – Режим доступа: https://www.milbank.com/images/content/9/8/v4/98555/January-2018-Space-Business-Review.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

30. Bird, R. Guida NovaSAR-S: A low cost approach to SAR applications / Rachel Bird, Philip Whittaker, Ben Stern, Nil Angli, Martin Cohen, Raffaella // 2013 Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR). – 2013. – pp. 84-87.

31. Shigeki Kuzuoka. Translated by S. Hayashi. Report: The Global Space & Technology Convention (GSTC) 2017 [Электронный ресурс]. – (09.03.2017). – Режим доступа: https://sat-biznet.com/wp-content/uploads/2017/03/gstc_2017_report_e.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

32. Sun, J. The SAR Payload Design and Performance for the GF-3 Mission / Sun, J.; Yu, W.; Deng, Y. // Sensors. – 2017. – Vol. 17. – p. 2419. DOI: 10.3390/s17102419

33. Неронский Л.Б. Перспективы развития методов и систем радиолокационного наблюдения космического базирования [Электронный ресурс] / Л.Б. Неронский // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №11 (ноябрь 2011). – Режим доступа: http://jre.cplire.ru/iso/nov11/14/text.pdf (дата обращения: 09.04.2018).

34. Orion Sky Lawlor. Synthetic Aperture Radar (SAR) Equations in the ASF User Tools. Alaska SAR Facility [Электронный ресурс] / Orion Sky Lawlor // Department of Computer Science, University of Alaska at Fairbanks. – Режим доступа: http://lawlor.cs.uaf.edu/~olawlor (дата обращения: 09.04.2018).

35. Булыгин М.Л. Построение диаграмм слепых дальностей и надирных отражений радиолокатора с синтезированной апертурой в MATLAB [Электронный ресурс] / Булыгин М.Л., Внотченко С.Л. // Труды МАИ. – 2015. – № 83 (05.10.2015). – Режим доступа: http://trudymai.ru/published.php?ID=62290 (дата обращения: 09.04.2018).

36. Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пономарев Л.И. Устройства СВЧ и антенны / Под ред. Д.И. Воскресенского. Изд. 2-е, доп. и перераб. – М.: Радиотехника, 2006. – 376 с.: ил.

37. Сосулин Ю. Г. Теоретические основы радиолокации и радионавигации: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1992. – 304 с.: ил.

38. Булыгин М.Л. Аналитический подход к построению диаграмм помех слепых дальностей и надирных отражений для космических РСА / Булыгин М.Л. // Тезисы докладов 14-ой Международной конференция «Авиация и космонавтика – 2015». – 2015. сс. 232-233.

39. Li, F. Ambiguities in spaceborne synthetic aperture radar systems / F. Li, W. T. K. Johnson // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1983. – vol. AES-19, № 3. – pp. 389–397.

40. Wollstadt, S. Nadir Margins in TerraSAR-X Timing Commanding [Электронный ресурс] / S. Wollstadt and J. Mittermayer // Proceedings of the Committee on Earth Observation Satellites (CEOS). – 2008. – pp 1-4 (17.12.2008). – Режим доступа: http://elib.dlr.de/56524 (дата обращения: 09.04.2018).

41. Freeman, A. The “myth” of the minimum SAR antenna area constraint / A. Freeman, W. T. K. Johnson, B. Huneycutt, R. Jordan, S. Hensley, P. Siqueira, and J. Curlander // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010. – vol. 38, № 1. – pp. 320–324.

42. Kuznetsov, G. Antenna beam broadening optimization in space-borne SAR with AESA / G Kuznetsov, M Miloserdov, V Temchenko, A Kovalenko, S Vnotchenko, V Riman // Proceedings of The IET International Conference on Radar Systems 2017. – 2017. – pp. 23-26.

43. Gatti, R.V. A novel phaseonly method for shaped beam synthesis and adaptive nulling / R.V. Gatti, L. Marcaccioli, R. Sorrentino // Proceedings of 33rd European Microwave Conference. – 2003, pp. 739-742.

44. Kiyo Tomiyasu. Conceptual Performance of a Satellite Borne, Wide Swath Synthetic Aperture Radar / Kiyo Tomiyasu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1981. – Vol. GE-19, № 2. – pp. 108-116.

45. Режим многоканальной съемки в многоапертурном космическом радиолокаторе с синтезированной апертурой / Булыгин М. Л. [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2015. – №5. – сс. 20-26.

46. De Zan, F. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans / F. De Zan, A. M. Guarnieri // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2006. – Vol. 44, № 9. pp 2352-2360.

47. Meta A. TerraSAR-X TOPSAR and ScanSAR comparasion / Meta A., Prats P., Steinbrecher U, Mittermayer J., Scheiber R. // Proceedings of EUSAR 2008: 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2008.

48. Pingping Huang. A New Spaceborne Burst Synthetic Aperture Radar Imaging Mode for Wide Swath Coverage. / Pingping Huang, Wei Xu // Remote Sens. – 2014. Vol. – 6. – pp. 801-814. DOI:10.3390/rs6010801

49. Mittermayer, J. Sliding spotlight SAR processing for TerraSAR-X using a new formulation of the extended chirp scaling algorithm / J. Mittermayer, R. Lord, E. Borner // Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003. IGARSS '03. – 2003. – pp. 1462-1464

50. TerraSAR-X Image Product Guide. Basic and Enhanced Radar Satellite Imagery [Электронный ресурс] // Airbus Defence and Space Geo-Intelligence Programme Line. – № 2.0 (August 2014). – Режим доступа: https://mdacorporation.com/docs/default-source/product-spec-sheets/geospatial-services/image_product_guide.pdf?sfvrsn=4 (дата обращения: 09.04.2018).

51. Moreira, A. A tutorial on synthetic aperture radar / A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, K. P. Papathanassiou // IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine. – 2013. – Vol.: 1, № 1. – pp. 6-43.

52. Jean, B. R. A multiple beam synthetic aperture radar design concept for geoscience applications / B. R. Jean, J. W. Rouse // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 1983. – vol. GRS-21, № 2. – pp. 201-207.

53. Currie, A. Wide-swath SAR / A. Currie and M. A. Brown // IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing – 1992. – vol. 139, № 2. – pp. 122-135.

54. Callaghan, G. D. Wide-swath space-borne SAR using a quad-element array / G. D. Callaghan, I. D. Longstaff // IEE Proceedings - Radar, Sonar and Navigation. – 1999. – vol. 146, № 3. – pp. 159-165.

55. Younis, M. SAR with digital beamforming on receive only / M. Younis and W. Wiesbeck // Proceedings of 1999 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 1999. – vol. 3. – pp. 1773–1775.

56. Bordoni, F. Performance investigation on the high-resolution wide-swath SAR system operating in multisubpulse mode / Federica Bordoni, Marwan Younis, Gerhard Krieger // Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2012. pp. 3568-3571.

57. Castillo, J. A HRWS SAR System Design with Multi-beam Imaging Capabilities / J. Castillo, M. Younis, G. Krieger // Proceedings of the 14th European Radar Conference. 11–13 Oct 2017, Nuremberg, Germany. – 2017. pp. 179-182.

58. Krieger, G. Potentials of digital beamforming in bi- and multistatic SAR / G. Krieger, A. Moreira // Proceedings of 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2003. – vol. 1. – pp. 527-529.

59. Younis, M. Antenna system for a forward looking SAR using digital beam forming on-receive-only / M. Younis and W. Wiesbeck // Proceedings of 2000 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2000. – vol. 5, – pp. 2343–2345.

60. Süß, M. A novel high resolution, wide swath SAR / M. Süß, B. Grafmüller, R. Zahn // Proceedings of 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2001. – vol. 3. – pp. 1013–1015.

61. Krieger, G. Unambiguous SAR signal reconstruction from non-uniform displaced phase centre sampling / G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2004. – vol. 1, № 4. – pp. 260-264.

62. Krieger, G. Digital beamforming techniques for spaceborne radar remote sensing / G. Krieger, N. Gebert, and A. Moreira // Proceedings of EUSAR 2006: 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2006.

63. Gebert, N. Digital Beamforming on Receive: Techniques and Optimization Strategies for High-Resolution Wide-Swath SAR Imaging / N. Gebert, G.Krieger, A. Moreira // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2009. – vol. 45, № 2. – pp. 564-592

64. Krieger, G. Multidimensional waveform encoding: A new digital beamforming technique for synthetic aperture radar remote sensing / G. Krieger, N. Gebert, A. Moreira // IEEE Trans. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – vol. 46, № 1. – pp. 31-46.

65. Krieger, G., e.a.: Hochauflösendes Synthetik-Apertur-SeitensichtRadarsystem mittels Digital Beamforming, German Patent Application DE 10 2006 022 814.6, 2006.

66. Krieger, e.a. High-resolution sytetic aperture side view radar system used by means of digital beamforming. United States Patent No. US 7.944.390 B2., 2011.

67. Gebert, N. Multichannel Azimuth Processing in ScanSAR and TOPS Mode Operation / N. Gebert, G. Krieger, A. Moreira // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – vol. 48, №7. – pp. 2994-3008.

68. Krieger, G. Advanced digital beamforming concepts for future SAR systems / G. Krieger, M. Younis, N. Gebert, S. Huber, F. Bordoni, A. Patyuchenko, A. Moreira // Proceedings of 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2010. – pp. 245-248.

69. Younis, M. Digital beamforming techniques for multi-channel synthetic aperture radar / Marwan Younis, Felipe Queiroz de Almeida, Federica Bordoni, Paco López-Dekker, Gerhard Krieger // Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2016. – pp. 1412-1415.

70. Bordoni, F. Performance investigation on scan-on-receive and adaptive digital beam-forming for high-resolution wide-swath synthetic aperture radar / F. Bordoni, M. Younis, E. Makhoul Varona, N. Gebert, G. Krieger // Proceedings of 2009 International ITG Workshop on Smart Antennas – WSA 2009. – 2009. – pp. 114-121.

71. Huber, S. Spaceborne reflector SAR systems with digital beamforming / S. Huber, M. Younis, G. Krieger, A. Patyuchenko, A. Moreira // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2012. – vol. 48, № 4. – pp. 3473-3493.

72. López-Dekker, P. Instrument architecture, advanced digital beamforming techniques, and operation modes for an enhanced signal mission concept / Paco López-Dekker, Marwan Younis, Sebastian Bertl, and Gerhard Krieger // Proceedings of 2013 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2013. – pp. 3475-3478.

73. Younis, M. Concept and Performance of Internal Instrument Calibration for Multi-Channel SAR / Marwan Younis, Christopher Laux, Andrea Loinger, Grzegorz Adamiuk, Michael Ludwig, Dirk Geudtner, Gerhard Krieger // Proceedings of EUSAR-2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 266-270.

74. Bordoni, F. Calibration error model for multichannel spaceborne SAR systems based on Digital Beamforming / Federica Bordoni, Piotr Laskowski, Marwan Younis, Gerhard Krieger // Proceedings of the 10th European Radar Conference. 9-11 Oct 2013, Nuremberg, Germany. – 2013. – pp 184-187.

75. De Lisle, D. RADARSAT Constellation Mission Status Update / Daniel De Lisle, Steve Iris, Éric Arsenault, Jill Smyth, Guennadi Kroupnik // Proceedings of EUSAR-2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 528-532.

76. Hui Wang. A New Airborne Ka-band DBF-SAR system and Flight test results / Hui Wang, Shichao Zheng, Shoulun Dai, Yanbin Zhao // Proceedings of EUSAR-2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 16-20.

77. Feng He. Digital Beamforming on Receive in Elevation for Multidimensional Waveform Encoding SAR Sensing / Feng He, Xile Ma, Zhen Dong, Diannong Liang // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2014. – vol. 11, № 12. – pp. 2173-2177.

78. Wei Xu. Processing of Multichannel Sliding Spotlight and TOPS Synthetic Aperture Radar Data / Wei Xu, Pingping Huang, Robert Wang, Yunkai Deng // IEEE

Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – vol. 51, № 8. – pp. 4417-4429.

79. Taoli Yang. Study on a Novel Multiple Elevation Beam Technique for HRWS SAR System / Taoli Yang, Xiaolei Lv, Yong Wang, Jiang Qian // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2015. vol. 8, № 11. – pp. 5030-5039.

80. Fan Feng. Echo Separation in Multidimensional Waveform Encoding SAR Remote Sensing Using an Advanced Null-Steering Beamformer / Fan Feng, Shiqiang Li, Weidong Yu, Pingping Huang, Wei Xu // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2012. – vol. 50, № 10. – pp. 4157-4172.

81. Rincon, R. Next generation Digital Beamforming Synthetic Aperture Radar (DBSAR-2) / Rafael Rincon, Temilola Fatoyinbo, Batuhan Osmanoglu, Seung-Kuk Lee, K. Jon Ranson, Victor Marrero, Mark Yeary // Proceedings of 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2015. – pp. 2774-2777.

82. Rincon, R. Development of Next Generation Digital Beamforming Synthetic Aperture Radar architectures / Rafael Rincon, Temilola Fatoyinbo, Batuhan Osmanoglu, Seung Kuk Lee, K. Jon Ranson, Guoqing Sun, Tobias Bollian // Proceedings of 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2016. – pp. 2109-2111.

83. Wang, R. Airborne X-band SAR for demonstrating two-dimensional digital beamforming / Robert Wang, Yunkai Deng, Pei Wang, Nan Wang // Proceedings of 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2017. – pp. 3841-3843.

84. Adamiuk, G. DBF Technology Development for Next Generation of ESA C-Band SAR mission / Grzegorz Adamiuk, Christoph Heer, Michael Ludwig // Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016.

85. Adamiuk, G. Technology demonstration for future DBF based spaceborne SAR missions / Grzegorz Adamiuk, Martina Gabele, Andrea Loinger, Christoph Heer,

Michael Ludwig // Proceedings of EUSAR-2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 21-26.

86. Suess, M. Technology developments for the next generation of spaceborne SAR instruments based on digital beamforming / Martin Suess, Michael Ludwig, Christoph Schaefer, Marwan Younis // Proceedings of 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). – 2012. – pp. 1529-1532.

87. Высокодетальный радиолокационный комплекс для космического комплекса «Обзор-Р» (Шифр СЧ ОКР «Касатка-Р»). Эскизный проект. Пояснительная записка. Книга 1. Характеристики и построение высокодетального радиолокационного комплекса // Федеральное космическое агентство. Открытое акционерное общество. «Научно-исследовательский институт точных приборов». – Рег. № 11-956. – 2013.

88. Bulygin, M. Digital radar module for digital AESA of spaceborne SAR / Bulygin, Maxim; Baranov, Alexander; Chechina, Irina; Kovalenko, Alexander; Riman, Victor; Vnotchenko, Sergey // Proceedings of EUSAR-2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 79-82.

89. Высокодетальный радиолокационный комплекс для космического комплекса «Обзор-Р» (Шифр СЧ ОКР «Касатка-Р»). Эскизный проект. Пояснительная записка. Книга 2. Построение бортовой аппаратуры высокодетального радиолокационного комплекса // Федеральное космическое агентство. Открытое акционерное общество. «Научно-исследовательский институт точных приборов». – Рег. № 11-956. – 2013 г.

90. А. Солонина. Моделирование цифровой обработки сигналов в MATLAB. Часть 1. Синтез оптимальных (по Чебышеву) КИХ-фильтров программными средствами MATLAB. / А. Солонина. // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – сс. 146-150.

91. Плотников П.В. Повышение эффективности реализации цифровых фильтров в ПЛИС / П.В. Плотников // Сборник научных трудов / под общ. ред. А.Л. Стемпковского. М.:ИППМ РАН, 2006.. – сс. 333-338.

92. William L. Melvin. Principles of Modern Radar Vol. II: Advanced Techniques / William L. Melvin, James A. Scheer. – Edison, NJ: SciTech Publishing. – 2013. – 846 p.

93. Булыгин М.Л. Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой [Электронный ресурс] / Булыгин М.Л., Муллов К.Д. // Труды МАИ. – 2015. – № 80 (26.03.2015). – Режим доступа: http://trudymai.ru/published.php?ID=57040 (дата обращения: 09.04.2018).

94. Булыгин М.Л. Реализация режима многоканальной сканирующей съемки в радиолокаторе космического базирования [Электронный ресурс] / Булыгин М.Л., Маркова А.С., Муллов К.Д. // Труды МАИ. – 2018. – № 98 (15.03.2018). – Режим доступа: http://trudymai.ru/published.php?ID=90438 (дата обращения: 09.04.2018).

95. Bulygin, M. Multi-channel modes implementation in spaceborne SAR with digital active electronically scanned array / Bulygin, Maxim; Kovalenko, Alexander; Riman, Victor; Vnotchenko, Sergey // Proceedings of 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2016. pp. 315-318.

96. Булыгин М.Л. Особенности реализации многолучевых режимов съемки с частотным разделением лучей в космических РСА на базе АФАР. [Электронный ресурс] // Труды МАИ. – 2018. – № 100 (26.06.2018). – Режим доступа: https://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=93428 (дата обращения: 30.06.2018).

97. Bulygin, M. SAR mode for extended area with an arbitrary orientation / Bulygin, Maxim; Kovalenko, Alexander; Riman, Victor; Vnotchenko, Sergey // Proceedings of EUSAR 2018: 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar. – 2018. – pp. 1108-1111.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А. Имитационная модель РСА

Имитационная модель РСА, используемая в настоящей диссертационной работе, реализована в программном пакете MATLAB в виде наборов функций и скриптов. Модель позволяет определить конфигурацию следов лучей ДН на поверхности Земли, основываясь на функциональной схеме и характеристиках исследуемого РСА, а также геометрии бокового визирования, реализуемого в заданных условиях визирования.

В состав модели входят следующие функции.

1. Функция AFAR_SignalSum, реализующая суммирование монохроматического эхо-сигнала s точечной цели или отраженного точечной целью на поверхности Земли по апертуре АФАР исследуемого РСА.

Входные данные функции: θ_x – угол визирования точечной цели по горизонтали, θ_y – угол визирования точечной цели по вертикали, θo_x – угол отклонения луча ДН в горизонтальной плоскости, θo_y – угол отклонения луча ДН в вертикальной плоскости, Fs – частота зондирующего сигнала или эхо-сигнала, отраженного точечной целью, F_x – частота в соответствии с которой рассчитываются положения фазовращателей антенной решетки по горизонтали, F_y – частота в соответствии с которой рассчитываются положения фазовращателей антенной решетки по вертикали.

Выходные данные функции: s – комплексное число определяющее амплитуду и фазу сигнала на выходе апертуры РСА или принимаемой точечной целью.

Алгоритм вычисления s реализуется следующими соотношениями:

$$s = \frac{1}{Nn_x \cdot Nn_y} \sum_{u=1}^{Nn_y} \sum_{v=1}^{Nn_x} \left(F_n\left(\theta_{вx}[v], \theta_{вy}[u]\right) \cdot \exp\left(i \cdot \left(2\pi \cdot F_s \cdot \tau_r[u,v] + \varphi_a[u,v]\right)\right)\right), \qquad (A.1)$$

где Nn_x и Nn_y – количество элементарных излучателей всей апертуры исследуемого РСА, соответственно, по горизонтали и вертикали; $v = 1\ldots Nn_x$ и $u = 1\ldots Nn_y$ – порядковые номера элементарных излучателей, соответственно, по горизонтали и вертикали; Fn ($\theta в_x[v]$, $\theta в_x[u]$) – двумерная амплитудная ДН одного элементарного излучателя; $\theta в_x[v]$ и $\theta в_x[u]$ – углы визирования точечной цели относительно элементарного излучателя с порядковым номером (v, u) по, соответственно, горизонтали и вертикали, определяемые по следующим соотношениям:

$$\theta в_x[v] = \mathrm{arctg}\left(\frac{\mathrm{tg}(\theta x)\cdot R0 - h_x\cdot(v-1)}{R0}\right), \qquad (A.2)$$

$$\theta в_y[u] = \mathrm{arctg}\left(\frac{\mathrm{tg}(\theta y)\cdot R0 - h_y\cdot(u-1)}{R0}\right), \qquad (A.3)$$

где R_0 – наклонная дальность до линии, параллельной траектории движения РСА, на которой находится точечная цель; h_x и h_y – шаг между элементарными излучателями по, соответственно, горизонтали и вертикали; $\tau_r[u, v]$ – задержка по времени распространения сигнала от/к элементарного излучателя с порядковым номером (v, u) к/от точечной цели:

$$\tau r[u,v] = \frac{1}{c}\sqrt{R0^2 + \left(h_x\cdot(v-1) - \mathrm{tg}(\theta x)\cdot R0\right)^2 + \left(h_y\cdot(u-1) - \mathrm{tg}(\theta y)\cdot R0\right)^2}; \qquad (A.4)$$

$\varphi_a[u, v]$ – суммарное величина поворота фазы в антенной решетке для излучающего элемента с позиционным номером (v, u):

$$\varphi a[u,v] = \Delta\varphi 0_x\cdot \mathrm{floor}\left[\frac{v-1}{N_{пэ}}\right] + \mathrm{round}\left[\frac{\Delta\varphi 0_y\cdot(u-1)}{\delta\varphi_y}\right]\cdot\delta\varphi_y, \qquad (A.5)$$

где $\Delta\varphi_{0x}$ – приращение фазы между элементами антенной решетки по горизонтали из состава исследуемой АФАР:

$$\Delta\varphi 0_x = \frac{\sin(\theta o_x)\cdot 2\pi\cdot N_{пэ}\cdot h_x\cdot F_x}{c}, \qquad (A.6)$$

где $Nпэ$ – количество элементарных излучателей по горизонтали, запитываемые одним приемо-передающим каналом АФАР (одним элементом антенной решетки); c – скорость распространения радиоволн; floor – операция округления в

меньшую сторону до ближайшего целого; round – операция округления до ближайшего целого; $\Delta\varphi_{0y}$ – приращение фазы между элементами антенной решетки (элементарными излучателями) по вертикали из состава исследуемой АФАР:

$$\Delta\varphi 0_y = \frac{\sin\left(\theta o_y\right) \cdot 2\pi \cdot h_y \cdot F_y}{c}, \qquad (A.7)$$

где $\delta\varphi_y$ – дискрет фазовращателей антенной решетки по вертикали.

2. Функция AFAR_Footprint реализующая расчет и визуализацию следа луча ДН на поверхности Земли в координатах путевая–горизонтальная дальность или в угловых координатах относительно раскрыва апертуры РСА реализуемая расчетом амплитуды регистрируемого апертурой сигнала (в соответствии с функцией AFAR_SignalSum) в каждой точке в пределах границ моделирования.

Входными данными функции являются: угловые границы моделирования (относительно нормали к апертуре РСА), количество точек моделирования по горизонтали и вертикали, углы отклонения луча ДН по горизонтали и вертикали, частота сигнала, частоты на которые настроены фазовращатели по вертикали и горизонтали на передачу и прием, уровень отсчета границ кадра, высота орбиты РСА над поверхностью Земли и угол крена апертуры.

Выходными данными функции являются координаты границ кадра, определяемого следующим образом. Для каждой точки моделирования функция дважды осуществляет расчет в соответствии с функцией AFAR_SignalSum (для вычисления амплитуд сигналов на излучение и прием) и представляет результаты расчетов в графическом как зависимость относительного уровня сигнала в каждой точке в пределах границ моделирования.

На рисунке А.1 представлены результаты моделирования расположения следов лучей ДН на поверхности Земли при различных углах визирования и без отклонения луча ДН по горизонтали на частоте F_s = 9600 МГц с соответствующей данной частоте настройкой фазовращателей АФАР.

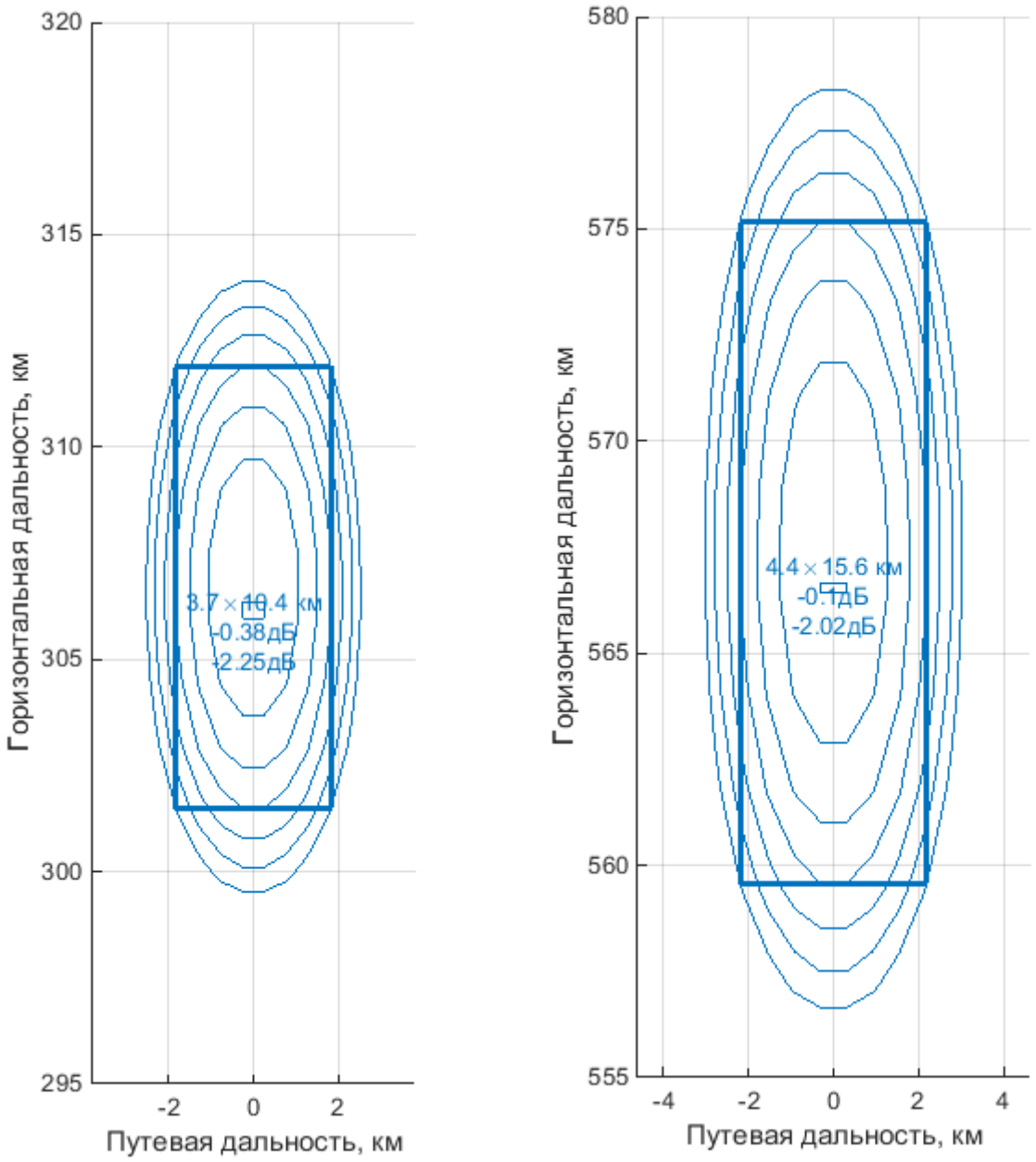

Рисунок А.1 – Результаты моделирования расположения следов луча ДН на поверхности Земли. Слева – при визировании под углом ε = 25°, справа – под углом ε = 40°. Концентрическими кругами обозначены уровни от 0 до -6 дБ относительно максимума ДН с шагом в 1 дБ. Жирными линиями обозначены границы визируемого кадра, отсчитываемые (в данном примере) по уровню -3 дБ. Для каждого следа обозначены реализуемые размеры кадров, уровень ДН в максимуме (относительно положения неотклонённого луча ДН) и интегральный уровень ДН в пределах сформированного кадра.

На рисунке А.2 представлены зависимости величины горизонтальной дальности от угла визирования, полученные по результатам моделирования (где дальность определяется положением максимума луча ДН на поверхности Земли) и по расчетному соотношению (1.3), а так же величина ошибки моделирования.

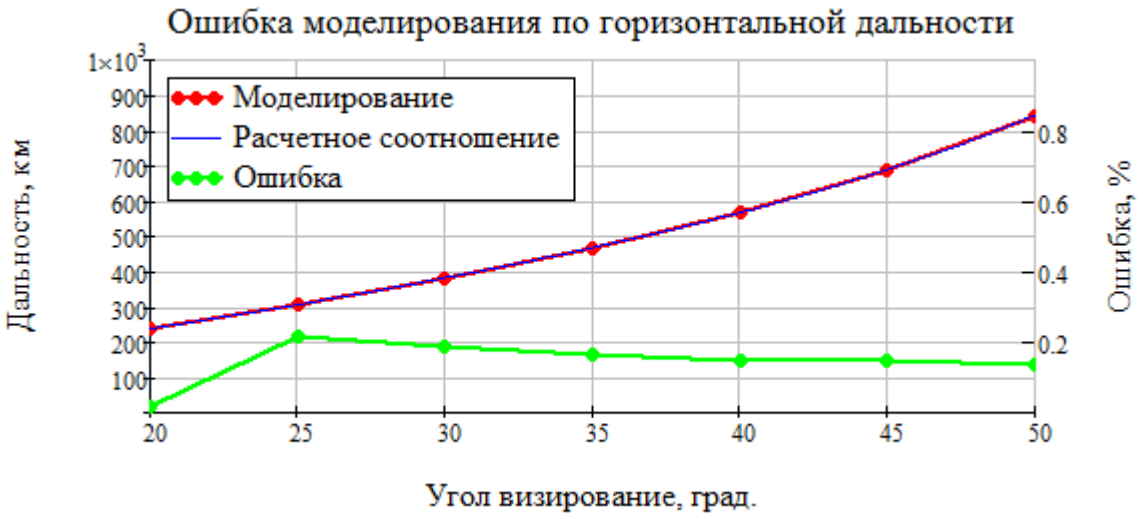

Рисунок А.2 – Ошибка моделирования по реализации горизонтальной дальности

На рисунке А.3 представлены зависимости реализуемых размеров кадра (отсчитываемые по уровню -3 дБ) в зависимости от угла визирования, полученные по результатам моделирования и в соответствии с расчетными соотношениями (1.6) и (1.7), а так же величины ошибок моделирования.

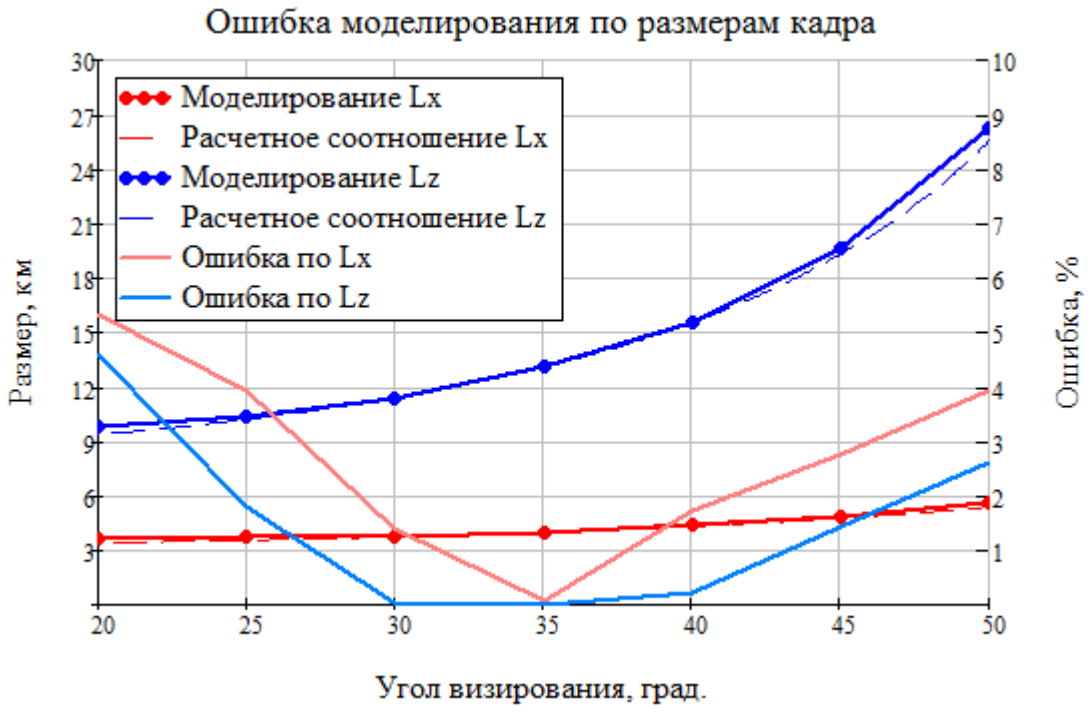

Рисунок А.3 – Ошибка моделирования по реализации размеров кадра

Величина ошибки в реализации нацеливания луча по горизонтальной дальности по результатам моделирования не превышает 0,22%, по размерам реализуемого кадра (следа луча ДН на поверхности Земли) – не превышает 5,3%.

Рост величины ошибки в реализации размеров кадра при отклонении луча ДН (в областях углов визирования, приближенных к ε = 20° и ε = 50°) вызвано естественной деградацией формы ДН антенной решетки за счет отклонения луча от нормали [36], в результате чего ширина по уровню -3 дБ от максимума будет уменьшаться – что и происходит в модели. В то же время в расчетных соотношениях (1.6) и (1.7) используются номинальные величины ширины ДН при неотклонённом луче ДН.

Указанные ошибки в реализации координат границ кадров позволяют использовать данную модель для анализа геометрии визирования в многолучевых режимах съемки, оценки реализуемых характеристик визирования и контроля корректности алгоритмов визирования.

На рисунке 2.21 содержится пример многократного использования данной функции (с различными исходными данными) для анализа эффекта частотной дисперсии АФАР.

3. Скрипты MultibeamSpootlight_footprint, MultibeamScanSAR_footprint и ExtendedMultibeamSpootlight_footprint осуществляют, соответственно, для режимов многолучевой сканирующей, многолучевой прожекторной и расширенной многолучевой прожекторной съемки построение в координатах путевая-горизонтальная дальность составных кадров, реализуемых алгоритмами управления РСА в данных режимах, которые были рассмотрены в главах 2 и 3. Примеры результатов работы данных скриптов содержатся на рисунках 3.6, 3.7, 3.8, 3.15 и 3.19.