

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники

УДК 621.396

Лобан  
Мария Андреевна

**Методы оптимизации характеристик радиолокатора с синтезированием  
апертуры космического базирования в режиме однопроходной  
интерферометрии**

**АВТОРЕФЕРАТ**

на соискание степени магистра технических наук  
по специальности 1-39 80 01  
«Радиосистемы и радиотехнологии»

\_\_\_\_\_ М. Лобан

Научный руководитель  
Козлов Сергей Вячеславович  
доктор технических наук, профессор

Минск 2023

## ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени доступно большое число исследований, посвященных радиолокационной интерферометрии – относительно новой методике измерения рельефа земли и ее деформации с использованием радиолокаторов с синтезированием апертуры авиационного и космического базирования. Эта техника оказалась чрезвычайно полезной для широкомасштабных измерений высот и деформации труднодоступных участков земной поверхности с высокой точностью в интересах составления цифровых моделей рельефа (ЦМР) и цифровых моделей местности (ЦММ).

Достижения в области геодезии за последние пару десятилетий можно охарактеризовать рядом событий. Во-первых, происходит расширение пространственных масштабов, в которых могут выполняться измерения. Использование искусственных спутников ускорило определение и использование глобальных систем отсчета и позволило составить карту больших территорий на Земле. Оптическое дистанционное зондирование с космических платформ привело к быстрому развитию геодезии, особенно с использованием стереографических методов, в то время как точечное позиционирование вступило в новую эру с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS).

Признание динамики земли характеризует второе развитие. Всеобщее признание глобальной тектоники плит не только делает каждое измерение функцией времени, но и подрывает определение систем отсчета.

В более локальных масштабах существует значительный интерес к мониторингу деформаций, вызванных землетрясениями, извержениями вулканов, динамикой ледников, послеледниковым восстановлением и антропогенной деформацией в результате разведки минеральных ресурсов, геотермальной энергии и воды. Лучшее понимание этих процессов требует регулярного повторения измерения, высокая точность и прекрасное пространственное разрешение. Эти требования продиктованы соображениями общественной безопасности и мониторинга опасностей, повышением уровня моря и глобальным потеплением, а также спорными вопросами, такими как подземное хранение ядерного материала. В этом контексте геодезические наблюдения служат важнейшим источником информации для геофизической интерпретации.

В течение десятилетия радиолокационная интерферометрия изображений превратилась в широко используемый геодезический метод измерения рельефа и деформации земли. В частности, анализ и интерпретация интерферометрических данных требуют тщательного понимания принципов метода, (потенциальных) источников ошибок и их распространения.

Радиолокационные станции с синтезированием апертуры (РСА) космического базирования (КБ) представляют собой интенсивно развивающееся решение получения достоверной информации независимо от метеорологических условий, времени суток, естественной освещенности,

наличия дыма, пыли, растительного или снежного покрова.

Традиционным для РСА космического базирования в настоящее время является режим двух- и многовитковой интерферометрии, когда искусственный спутник Земли (ИСЗ) с установленным на нем РСА пролетает вблизи выбранного участка земной поверхности и наблюдает его в примерно одинаковых условиях (угол отклонения от надира, дальность и т.д.) на разных витках орбиты с интервалом времени между ними от единиц до десятков суток. Это позволяет достаточно измерять высоты элементов земной поверхности со стабильными за указанный период характеристиками отражений. При изменении характеристик отражений, например, при развитии растительности, точность измерения высот существенно снижается. Кроме того, неудовлетворительным для ряда задач, например, контроля ледовой обстановки, является периодичность измерений.

Для РСА авиационного базирования в последнее время находит применение способ однопроходной интерферометрии при построении пары РЛИ с заданной интерферометрической базой на маршруте полета [1].

Применение этого способа для РСА космического базирования до недавнего времени ограничивалось реализованными в РСА космического базирования только маршрутным и детальным режимами при боковом обзоре и относительно невысоких радиальных скоростях взаимного перемещения РСА и участка земной поверхности в процессе наблюдения. Увеличение точности баллистического обеспечения, снятия ряда аппаратных ограничений и появление новых способов построения радиолокационных изображений обуславливает актуальность рассмотрения режима одновитковой интерферометрии для современных РСА космического базирования.

В работе были поставлены задачи по рассмотрению способов реализации и рациональных параметров одновитковой радиолокационной интерферометрии для РСА космического базирования, а также пересматривается процедура обработки для получения интерферометрических продуктов, таких как цифровая модель рельефа или карта деформаций.

Целью работы является повышение оперативности измерения высот точек земной поверхности и расположенных на ней объектов за счет оптимизации параметров получения и обработки радиолокационной информации в режиме однопроходной интерферометрии для РСА космического базирования.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Связь работы с научными программами, темами**

Работа выполнена в учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» на кафедре информационных радиотехнологий в рамках развития на предприятиях радиотехнического профиля Республики Беларусь промышленного производства радиоэлектронных систем с техническими, конструктивными и эксплуатационными характеристиками, соответствующие мировым функциональным требованиям, стандартам и технологическим нормам построения радиоаппаратуры XXI века.

Тема соответствует Перечню приоритетных направлений научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2023-2025 гг. в области приборостроения и инновационных материалов (п. 4), обеспечения безопасности человека, общества и государства (п. 6).

Результаты диссертационных исследований могут быть использованы при оптимизации характеристик радиолокаторов с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии и исследованию их эффективности.

### **Цель, задачи, объект и предмет исследования**

*Цель работы* – повышение оперативности измерения высот точек земной поверхности и расположенных на ней объектов за счет оптимизации параметров получения и обработки радиолокационной информации в радиолокаторе с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии.

*Задачи* исследования:

анализ требований к качеству радиолокационной информации и особенностей функционирования РСА КБ в режиме однопроходной интерферометрии и выявление ограничений по реализации режима;

разработка методики и оптимизация параметров получения и алгоритмов обработки радиолокационной информации в режиме однопроходной интерферометрии;

разработка математической модели и исследование эффективности функционирования РСА космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии в различных условиях с разработкой рекомендаций по реализации режима однопроходной интерферометрии в перспективной радиолокационной аппаратуре дистанционного зондирования Земли.

*Объект* – радиолокатор с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии.

*Предмет* – алгоритмы обработки сигналов и характеристики радиолокатора с синтезированием апертуры в режиме однопроходной интерферометрии.

**Научная новизна** полученных результатов заключается в следующем:

1. Получены математические соотношения, связывающие пространственные и энергетические условия наблюдения, ограничения на сектор электронного сканирования в азимутальной плоскости, характеристики декорреляции отраженного сигнала, с одной стороны, и достижимую среднюю квадратическую ошибку определения высоты, с другой стороны.

2. Показано, что для РСА космического базирования, аналогично авиационным, существуют оптимальные значения интерферометрической базы и соответствующие значения времени синтезирования при построении двух последовательных радиолокационных изображений, при которых ошибки определения высоты минимальны. Дополнительными факторами, оказывающим влияние на значение оптимальной базы, является ограничение сектора сканирования в азимутальной плоскости в единицы градусов, большая высота орбиты космического аппарата (КА) и величина угла отклонения строительной оси КА с установленной на нем антенной системой от вектора скорости в азимутальной плоскости.

3. Установлены новые характерные для РСА космического базирования закономерности по влиянию угла отклонения направления наблюдения от надира на величину ошибки определения высот. Так, увеличение угла наблюдения от надира с  $30^\circ$  до  $45^\circ$  приводит к уменьшению ошибок определения высоты в 1,5...2 раза. Показано, что этот результат, несмотря на то, что увеличение угла отклонения от надира сопровождается увеличением наклонной дальности до наблюдаемого участка земной поверхности и увеличением размеров элемента разрешения в поперечном направлении, определяется более быстрым увеличением времени синтезирования при построении двух последовательных радиолокационных изображений при ограничении на сектор азимутального сканирования и характерно именно для РСА космического базирования.

4. Установлено, что достижимые минимальные ошибки определения высоты элементов подстилающей поверхности сильно зависят от отклонения строительной оси КА в азимутальной плоскости. Требуемый угол поворота КА в азимутальной плоскости составляет не менее  $15^\circ$ . При меньших значениях угла поворота ошибки резко возрастают.

5. При одинаковых условиях наблюдения ошибки определения высот возрастают примерно пропорционально увеличению длины волны РСА при незначительном изменении величины оптимальной интерферометрической базы.

6. Наиболее существенным является фактор декорреляции отраженного от элемента разрешения сигнала при изменении ракурса наблюдения. Степень снижения величины корреляции сложным образом зависит от интерферометрической базы как напрямую, так и через разрешающую способность по поперечной дальности.

7. Определены средние квадратические ошибки измерения высот стабильных отражателей, составляющие, в зависимости от угла отклонения от

надира и угла поворота корпуса КА по курсу 0,06...0,34 м для длины волны 3,125 см и 0,19...1,1 м для длины волны 9,725 см. При увеличении угла поворота КА в азимутальной плоскости величина ошибки уменьшается. Полученные величины СКО определяют потенциальную возможность использования однопроходного интерферометрического режима для целого ряда народнохозяйственных задач, например, оперативного оценивания изменения гидрографической ситуации в период половодий в труднодоступных районах, оценки ледовой обстановки и т.д.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Реализация однопроходного интерферометрического режима в радиолокаторе с синтезированием апертуры космического базирования возможна за счет поворота строительной оси космического аппарата или антенны РСА относительно вектора скорости в азимутальной плоскости на угол более 15°. Это предполагает реализацию скошенного режима обзора с построением радиолокационных изображений при высоких, единицы км/с, радиальных скоростях взаимного перемещения РСА и участка земной поверхности.

2. Методика и результаты оптимизации однопроходного интерферометрического режима, отличающаяся получением оптимальной базы синтезирования с учетом ограничением на угол отклонения луча от нормали, угол отклонения корпуса космического аппарата, длины волны, времени синтезирования, дальности до точки наблюдения и характеристик земной поверхности. Для типовых условий наблюдения в космических РСА оптимальная база составляет 1,6-4,3 км.

### **Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций.**

Представленные в диссертационной работе научные результаты, а также положения, выносимые на защиту, получены соискателем самостоятельно.

Основным соавтором публикаций является научный руководитель – доктор технических наук, профессор Козлов С. В., который осуществлял определение целей и постановку задач исследований.

### **Апробация диссертации и сведения об использовании ее результатов**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь – 2022, RLNS-2022» (г. Воронеж), республиканской научно-технической конференции «Информационные радиосистемы и радиотехнологии» (г. Минск 2022 г.); 57, 58 и 59-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР (г. Минск, 2020-2022 гг.).

### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований, представленных в диссертации, опубликованы 2 статьи в сборниках трудов международных и республиканских научно-технических конференций и 3 статьи и 2 тезиса докладов в сборниках материалов научных конференций аспирантов, магистрантов и студентов. Общий объем публикаций составляет 1,5 авторских листа.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из перечня сокращений и условных обозначений, введения, общей характеристики работы, трех глав, заключения, библиографического списка и приложений.

Общий объем диссертации составляет 65 страниц, из них 58 страниц основного текста, библиографический список из 28 наименований на 2 страницах, список собственных публикаций из 9 наименований на 2 страницах, и одного приложения на 3 страницах, включающего методики в среде компьютерной математики *Mathcad*.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность работы, отмечается новизна и кратко излагается содержание диссертации, а также назначение, задачи, структура разрабатываемой системы и основные научные результаты исследований.

В **первой главе** рассматриваются результаты обзора литературы по теме диссертации, рассматриваются типовые радиолокаторы с синтезированием апертуры космического базирования с позиций реализации однопроходной интерферометрической съемки земной поверхности, их характеристики и интерферометрические режимы функционирования, а также анализ тенденций развития радиолокационных станций с синтезированием апертуры спутников дистанционного зондирования земли.

**Вторая глава** посвящена описанию основных этапов обработки радиолокационной информации, а также рассмотрены аналитические соотношения для оптимизации параметров получения данного типа информации в режиме однопроходной интерферометрии.

Кроме того, в работе кратко рассмотрен метод многопроходной интерферометрии и установлено, что основным недостатком данного способа является большое (от нескольких суток до нескольких недель) время выдачи информации. Это обуславливает возрастание интереса к однопроходной интерферометрии, когда интерферометрическая разность фаз вычисляется на основе пары радиолокационных изображений, полученных на одном витке при последовательном наблюдении радиолокационной сцены при близких значениях ракурса наблюдения.

Показано, что для реализации режима однопроходной интерферометрии необходим разворот корпуса космического аппарата, с установленной на ней антенной решеткой, на угол более 15 градусов в азимутальной плоскости. Это обеспечивает требуемую чувствительность изменения разности фаз к изменению высоты отражателей. Одновременно это приводит к высокой единице километра в секунду, скорости сближения РСА с участками земной поверхности и требует новых алгоритмов синтеза радиолокационных изображений в режиме «скошенного» обзора.

Основным содержанием главы является описание методики оптимизации характеристик радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии. СКО оценивания фазы определялась как

$$\sigma_z = \left( \frac{\partial \Delta}{\partial z} \Big|_{z=0} \right)^{-1} \frac{\lambda \sqrt{1-\gamma^2}}{2\pi \sqrt{2\gamma}}. \quad (1)$$

где  $\gamma$  - коэффициент корреляции сигнала в элементе разрешения на РЛИ, величина которого определяется декорреляцией сигнала за счет



пространственного разнесения антенн в разные моменты времени и отношением сигнал/шум  $\rho$  на РЛИ;  $\Delta = f(z)$  - зависимость удвоенной разности расстояний между РСА и участком земной поверхности с высотой  $z$  для двух интервалов синтезирования.

Установлено, что определяющее значение будет оказывать база  $B$  однопроходной интерферометрической съемки. Оптимальное  $B_{\text{опт}}$  значение базы интерферометрической съемки при заданных технических параметрах РСА с учетом ограничений на угол отклонения луча в азимутальной плоскости:

$$B_{\text{опт}} = \arg \min_B \sigma_z(B). \quad (2)$$

Вычисляя зависимость  $\sigma_z$  от как функцию базы интерферометрической обработки в работе было установлено наличие и величина оптимальной базы, а также соответствующие значения времени синтезирования и потенциально достижимое СКО оценивания высоты участков земной поверхности.

При исследовании точности оценки высот шероховатой земной поверхности принимались следующие исходные данные:

- длина волны  $\lambda=3,125$  см и  $\lambda=9,725$  см (стандартные значения, определяемые регламентом радиосвязи для РСА космического базирования);
- угол отклонения участка наблюдения от надира принимался равным  $\theta=30^\circ$  и  $\theta=45^\circ$ ;
- высота орбиты  $H=500$  км;
- орбитальная скорость КА  $7,6$  км/с;
- земная поверхность – шероховатая со среднеквадратической высотой неровностей  $\sigma_h=0,1$  м;
- максимальный угол электронного отклонения луча в азимутальной плоскости  $\pm 0,75^\circ$  (аналогично TerraSAR);
- угол между строительной осью КА и направлением наблюдения в горизонтальной плоскости  $60^\circ \dots 80^\circ$ ;
- время синтезирования – максимально возможное исходя из условий наблюдения ( $1,5 \dots 3$  с);
- среднее отношение сигнал/шум по шероховатой земной поверхности соответствовало техническим характеристикам типовых РСА и принималось равным  $10$  дБ.

Используя указанные выше параметры и методику оптимизации, реализованную в среде компьютерной математики *MathCad*, в работе были получены результаты расчетов зависимостей СКО измерения высоты от величины интерферометрической базы для заданных условий наблюдения при измерении высот участков шероховатой земной поверхности. Эти зависимости приведены на рисунке 1.

Как следует из полученных зависимостей, для РСА космического базирования, аналогично авиационным, существуют оптимальные значения интерферометрической базы и соответствующие значения времени

синтезирования при построении двух последовательных радиолокационных изображений, при которых ошибки определения высоты минимальны. При этом оптимум выражен достаточно сильно. Значения оптимальных баз и соответствующие значения СКО определения высоты приведены в таблице 1.

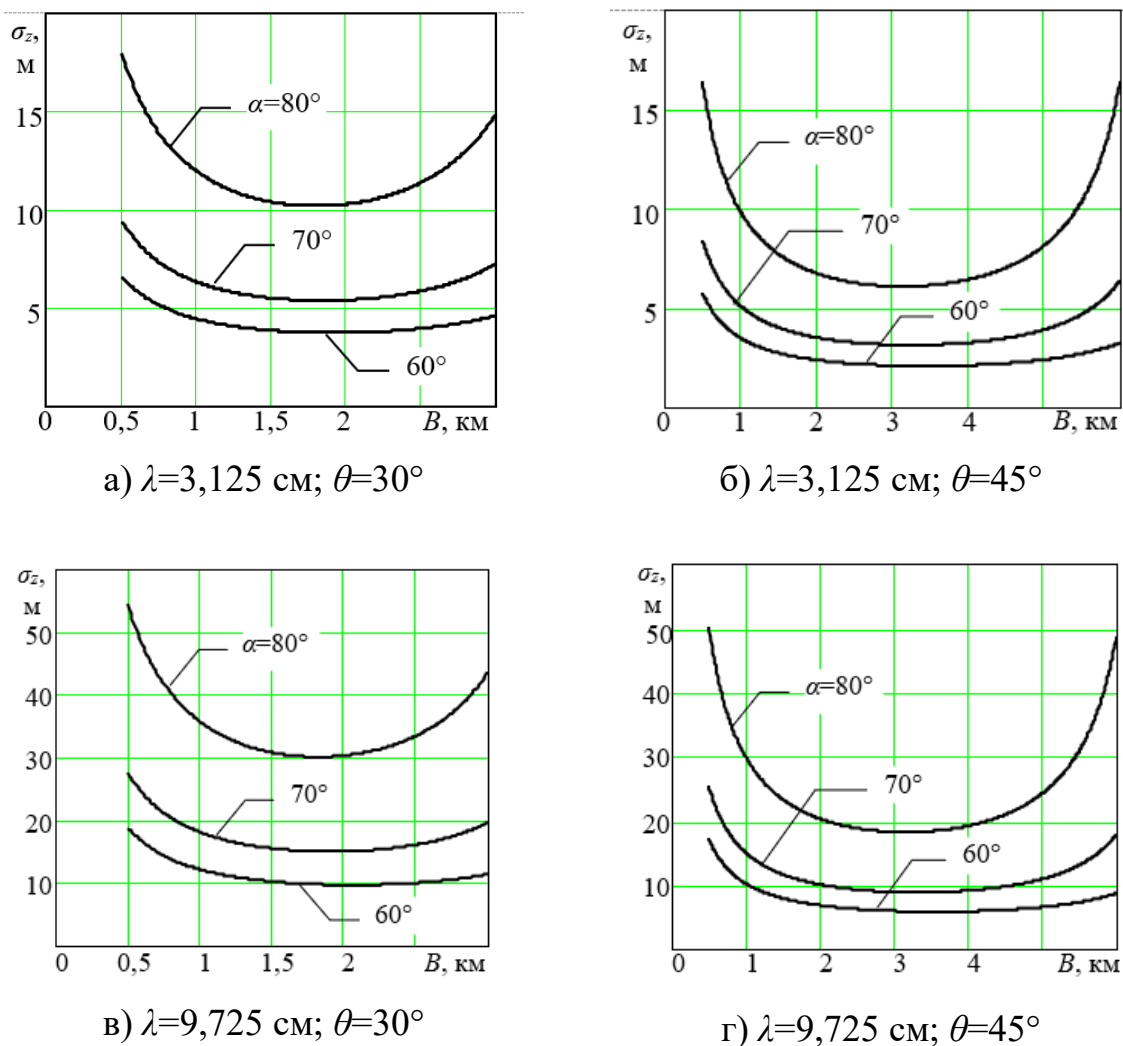


Рисунок 1 – Зависимости СКО измерения высоты участков шероховатой земной поверхности от интерферометрической базы

Таблица 1 – Величина оптимальной базы и СКО измерения высоты шероховатой земной поверхности

Длина волны, см	Угол места $\theta$	$\alpha=60^\circ$		$\alpha=70^\circ$		$\alpha=80^\circ$	
		$B$ , км	$\sigma_z$ , м	$B$ , км	$\sigma_z$ , м	$B$ , км	$\sigma_z$ , м
3,125	30°	1,55-2,3	3,7	1,6-2,05	5,5	1,6-2	10,5
	45°	2,85-4,1	2,5	2,9-3,75	3,1	2,85-3,5	6,6
9,725	30°	1,9,2,3	9,9	1,65-2,25	15	1,75-1,9	30
	45°	3,1-4,3	5	2,8-3,9	9	2,85-3,6	19

Установлены факторы, оказывающие влияние на значение оптимальной

базы, это ограничение сектора сканирования в азимутальной плоскости в единицы градусов, большая высота орбиты космического аппарата и угол отклонения строительной оси космического аппарата с установленной на нем антенной системой от вектора скорости в азимутальной плоскости. Также отмечено, что при одинаковых условиях наблюдения и увеличении длины волны радиолокатора в 3 раза, значения ошибки возрастают примерно пропорционально при незначительном изменении величины оптимальной интерферометрической базы.

Также установлены значения оптимальной базы, времени синтезирования и достижимые ошибки оценивания высот для случая стабильных отражающих элементов, для которых амплитуда и фаза отраженного сигнала не зависит от ракурса по крайней мере на интервале наблюдения.

Результаты для этого случая и пренебрежимо малый ЭПР земной поверхности для тех же исходных данных приведены на рисунке 2.

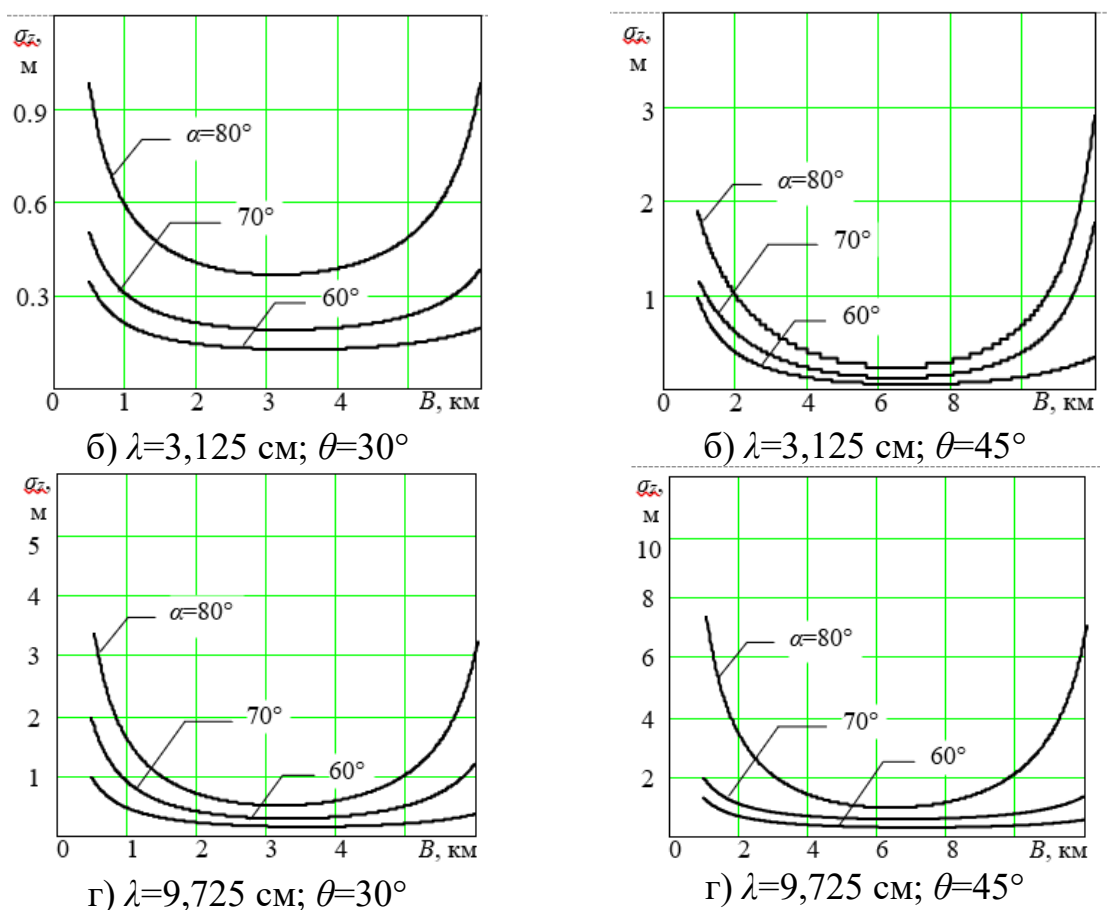


Рисунок 2 – Зависимости СКО измерения высоты от величины интерферометрической базы для стабильного отражателя при  $\rho_{\max}=30$  дБ

Как следует из полученных результатов, величина интерферометрической базы существенно изменились в сторону увеличения. Оптимальные значения интерферометрической базы составляют от 2 до 5 км.

В разделе установили среднюю квадратическую ошибку измерения высот, которая составляет, в зависимости от угла отклонения от надира и угла поворота корпуса КА по курсу 0,06...0,34 м для длины волны 3,125 см и 0,19...1,1 м для длины волны 9,725 см. При увеличении угла поворота КА в азимутальной плоскости величина ошибки уменьшается (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Величина оптимальной базы и СКО измерения высоты для стабильного отражателя

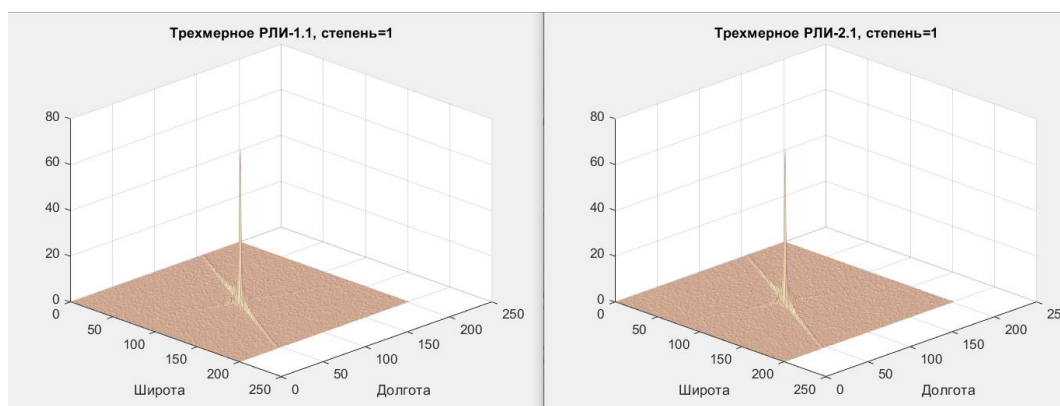
Длина волны, см	Угол места $\theta$	$\alpha=60^\circ$		$\alpha=70^\circ$		$\alpha=80^\circ$	
		$B$ , км	$\sigma_z$ , м	$B$ , км	$\sigma_z$ , м	$B$ , км	$\sigma_z$ , м
3,125	30°	3,12-3,14	0,1	2,88	0,16	2,74	0,34
	45°	5,42-5,43	0,06	4,99	0,099	4,75	0,2
9,725	30°	3,12-3,14	0,32	2,88	0,51	2,73-2,75	1,1
	45°	5,41-5,44	0,19	4,98-5	0,3	4,74-4,75	0,65

Предлагаемая методика может быть полезна при оптимизации параметров и исследовании эффективности радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования с учетом характерных для него ограничений в режиме однопроходной интерферометрии.

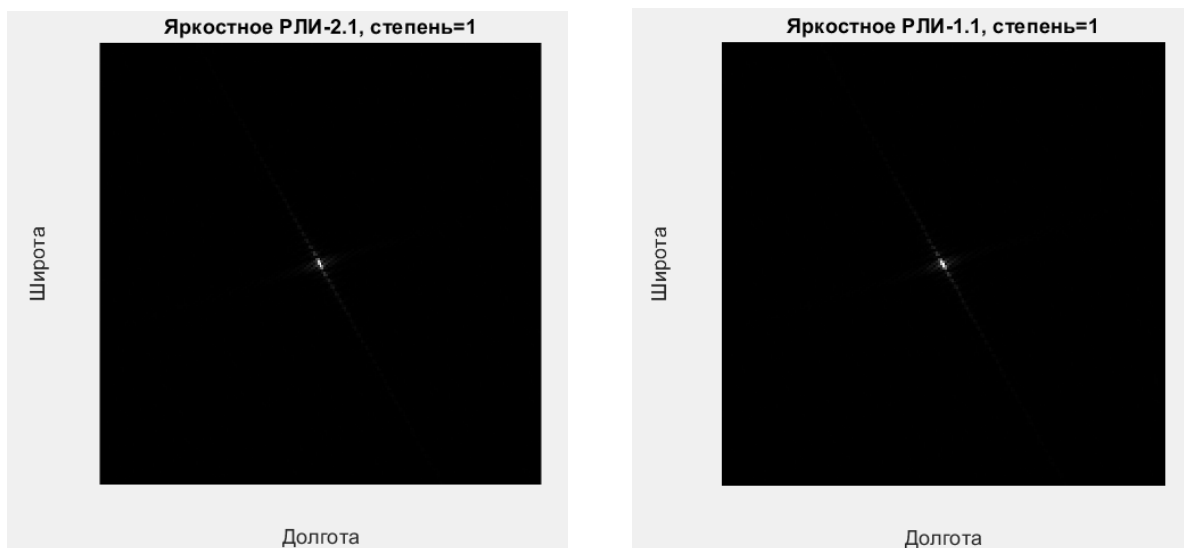
В третьей главе было реализовано компьютерное моделирование режима однопроходной интерферометрии в радиолокаторе с синтезированием апертуры космического базирования. Были приведены общая структура и возможности компьютерной модели. Компьютерная модель радиолокатора с синтезированием апертуры была разработана в рамках выполнения задания 1.4.2 ГПНИ.

Отмечено, что использование однопроходной интерферометрии позволяет полностью отказаться от развертывания интерферометрической фазы за счет выбора такой интерферометрической базы, при котором неоднозначность отсутствует.

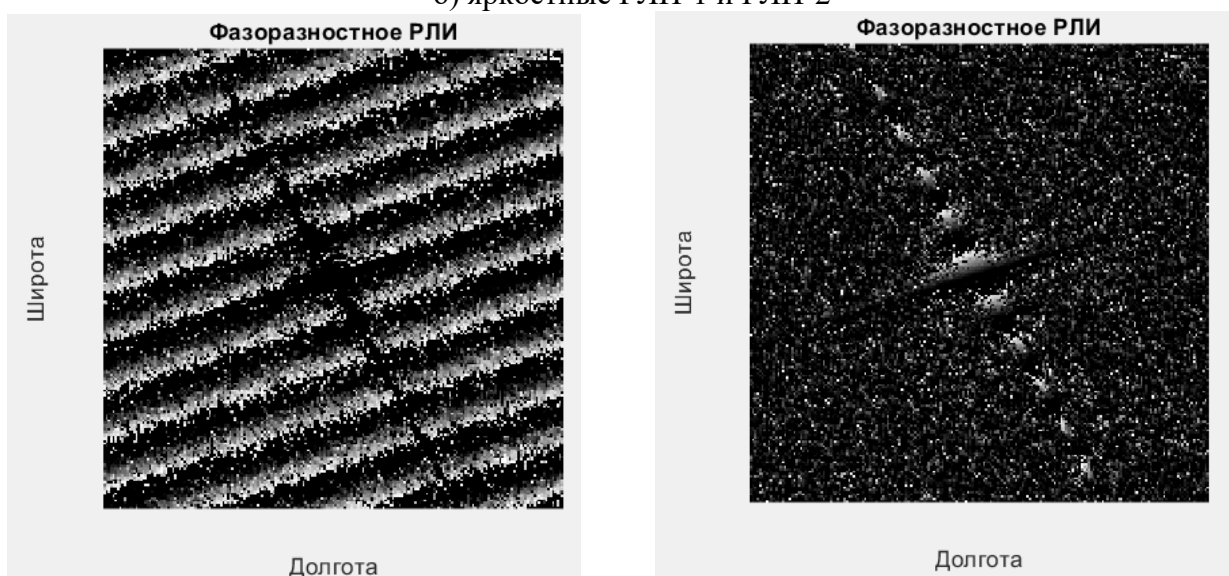
На рисунке 3 приведены примеры трехмерных радиолокационных изображений уголкового отражателя, формируемые в компьютерной модели в географических координатах «широта-долгота».



а) трехмерные РЛИ-1 и РЛИ-2



б) яркостные РЛИ-1 и РЛИ-2



в) фазоразностное РЛИ до (слева) и после (справа) исключения топографической фазы

Рисунок 3 – Примеры формируемых РЛИ

Следует отметить, что рисунки были построены для для ситуации наблюдения точечного наземного объекта – уголкового отражателя с ЭПР  $10^4$  м<sup>2</sup> при угле поворота корпуса КА относительно вектора скорости  $30^\circ$ .

Также на рисунке 3 в видны продольные интерференционные полосы – фринги. Образование фрингов на всем фазоразностном РЛИ при наличии единственного отражателя (в центре радиолокационного изображения) является характерной особенностью однопроходной интерферометрии, когда фринги образуются не только по отраженному сигналу, но и «по шумам». Замечено, что так как интервалы синтезирования перекрываются, то шумы РЛИ-1 и РЛИ-2 коррелированы.

Период следования интерференционных полос – фрингов по горизонтальной дальности составляет

$$d_{\text{фр}} = \frac{\lambda H}{2B_{\perp} \cos^2 \theta}, \quad (3)$$

где  $B_{\perp} = B \cos \alpha_0$  - перпендикулярная направлению визирования составляющая интерферометрической базы.

Проверка предлагаемого способа однопроходной интерферометрии проводилась для случая определения высоты над уровнем референц-эллипсоида для точечной цели – уголкового отражателя.

Принимались следующие исходные данные:

- высота орбиты РСА – 500 км; скорость РСА на орбите 7612 м/с;
- угол разворота строительной оси относительно вектора скорости в азимутальной плоскости  $30^\circ$ ; угол отклонения от надира -  $51^\circ$ ; дальность до РСА – 867 км;
- время формирования траекторного сигнала 1 секунда, время синтезирования 0,6 секунд;
- ширина спектра сигнала 150 МГц (без весовой обработки);
- высота уголкового отражателя принималась равной 0 метров и 5 метров;
- формировалась серия РЛИ-1 (опорное), РЛИ-2, РЛИ-3 и РЛИ-4 с временным промежутком между начала интервалов синтезирования для второго и третьего РЛИ относительно первого 0,1 с, 0,2 с и 0,4 с; интерферометрическая база составляла 761 м; 1422 м и 2844 м, соответственно.

Результаты в виде трехмерных РЛИ и фазоразностных РЛИ с исключенной топографической фазой приведены на рисунках 4-6.

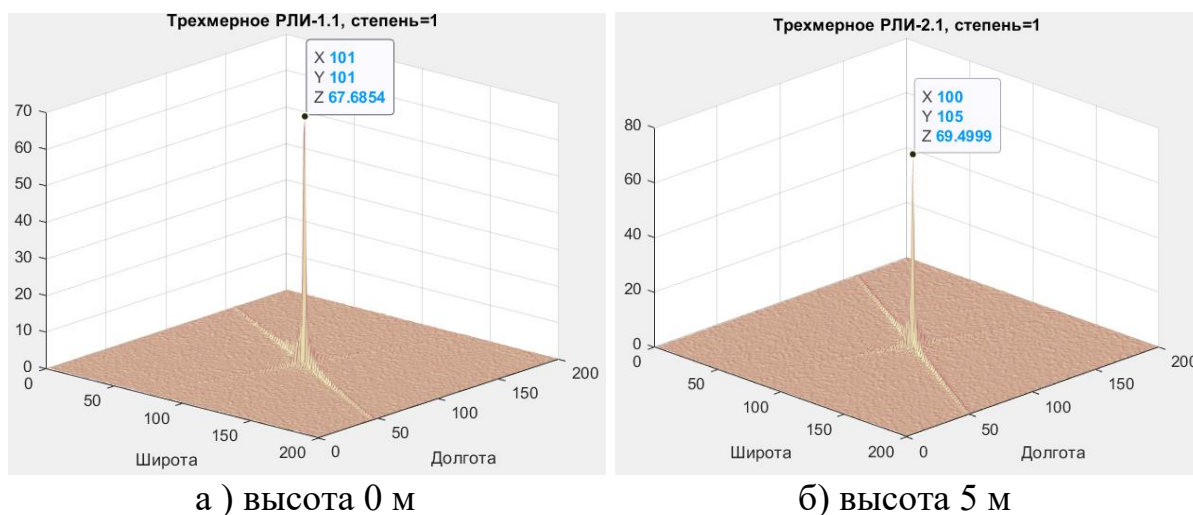
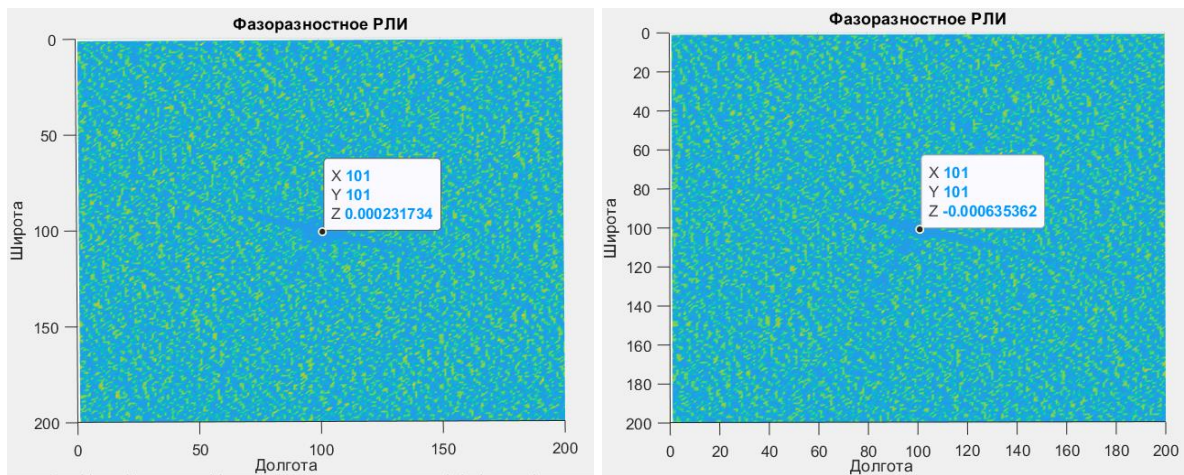


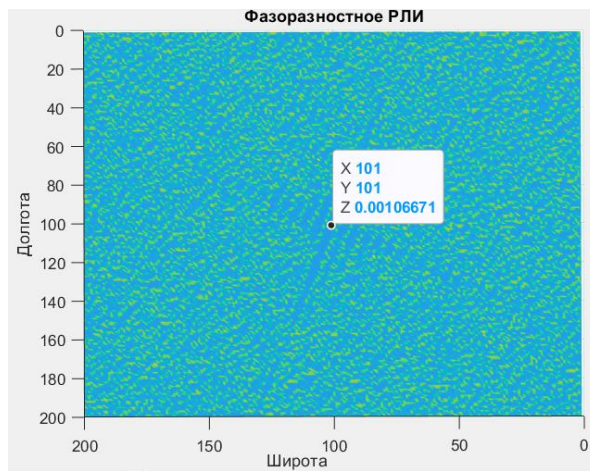
Рисунок 4 – Трехмерные РЛИ-1 для разных высот отражателя





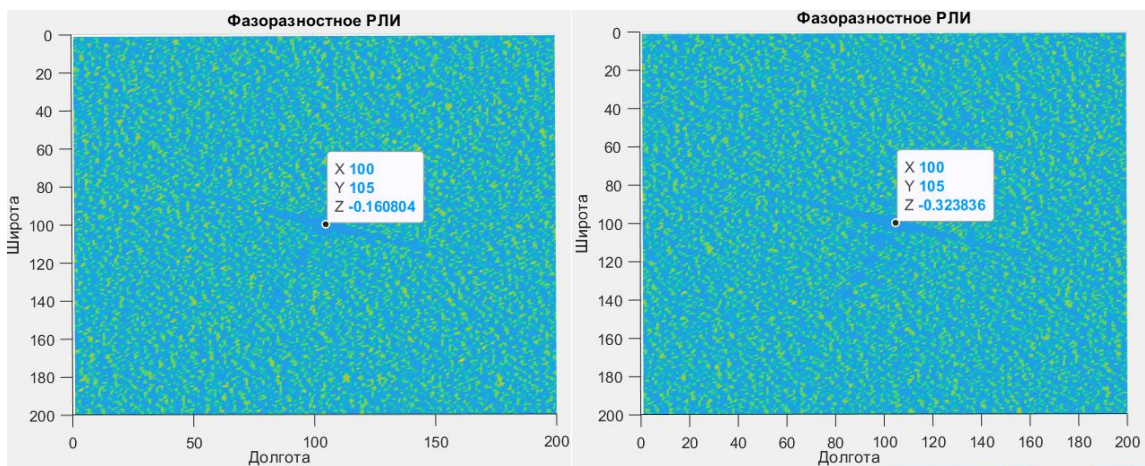
а) база 761 м

б) база 1522 м



в) база 3044 м

Рисунок 5 – Фазоразностные РЛИ при высоте отражателя  $h=0$  м



а) база 761 м

б) база 1522 м

Рисунок 6 – Фазоразностные РЛИ при высоте отражателя  $h=5$  м

Как следует из численных значений маркеров на фазоразностных РЛИ, при  $h=0$  разности фаз в точке расположения максимума отклика от объекта на

РЛИ остается равной нулю независимо от величины интерферометрической базы. При  $h=5$  м разность фаз прямо пропорциональна интерферометрической базе. Это свидетельствует о правильности моделирования и подтверждает обоснованность сформированных выводов и рекомендаций.

На рисунке 7 приведены зависимости среднеквадратической ошибки определения высоты стабильного отражателя (угловая декорреляция отсутствует) от отношения сигнал/шум на РЛИ для различных значений начального угла между вектором скорости и направлением наблюдения. Зависимости построены путем розыгрыша интерферометрической разности фаз в соответствии с отношением сигнал/шум и воспроизведения алгоритма обработки при четырех значениях баз  $B=0,5; 1,0; 2,0$  и  $3,0$  км.

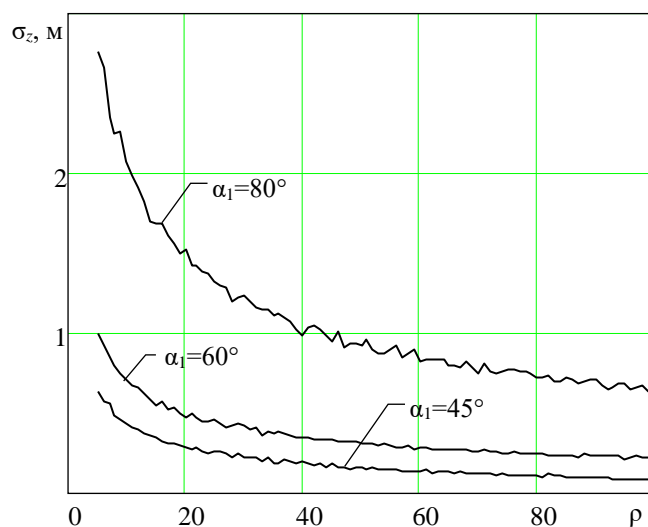


Рисунок 7 – Зависимости средней квадратической ошибки определения высоты от отношения сигнал/шум

Средняя квадратическая ошибка уменьшается пропорционально корню из отношения сигнал/шум. При увеличении угла между вектором скорости КА и направлением наблюдения СКО заметно увеличивается, что соответствует закономерностям в [28].

В работе установлено, что с использованием компьютерной модели подтверждается работоспособность прилагаемого способа однопроходной интерферометрии и возможность гибкого управления параметрами указанного режима.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования, посвященные режимам интерферометрической съемки в космических радиолокаторах, приводят к подтверждению их существенной важности и высокой эффективности в области мониторинга и исследования поверхности земли. Указанные режимы обладают огромным потенциалом для применения в таких науках, как геодезия, сельское хозяйство, а также в других научных и промышленных сферах. Одновременно с этим, дальнейшее развитие и совершенствование данных режимов позволит расширить их сферу применения и повысить достоверность и качество получаемых результатов.

В ходе исследования была разработана компьютерная модель РСА для космических систем, работающих в режиме однопроходной интерферометрии. Эта модель позволяет получать фазоразностные радиолокационные изображения с использованием произвольных интерферометрических баз. Показано, что для реализации режима однопроходной интерферометрии необходим разворот корпуса космического аппарата, с установленной на ней антенной решеткой, на угол более 15 градусов в азимутальной плоскости.

Также в рамках работы была проведена верификация компьютерной модели для случая построения радиолокационного изображения точечного объекта и фазоразностного радиолокационного изображения для различных интерферометрических баз и высот отражателя над опорным уровнем.

Полученные результаты исследования могут быть применены для обоснования достижимых характеристик и областей применения радиолокационной синтезированной апертуры космического базирования при оперативной оценке высот участков земной поверхности и объектов в режиме однопроходной интерферометрии.

Разработана методика оценки точности и оптимизации интерферометрической базы в однопроходном интерферометрическом режиме РСА космического базирования. Предлагаемая методика может быть полезна при оптимизации параметров и исследовании эффективности радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования с учетом характерных для него ограничений в режиме однопроходной интерферометрии.

В ходе выполнения данной работой, были решены все поставленные задачи. Был выполнен обзор научно-технической литературы по теме исследования и проведен анализ принципов построения и характеристик.

## СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

1. Лобан М.А. Оптимизация характеристик и исследование эффективности радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии / И.Н. Давыденко, С/Д/ Козлов С.В., М.А. Лобан М.А., Ле Ван Кыонг // Радиолокация, навигация, связь: сборник трудов XXVIII Международной научно-технической конференции, г. Воронеж, 27-29 сентября 2022 г.: в 6 т. / Воронежский государственный университет; АО «Концерн «Созвездие». – Воронеж: Издательский дом ВГУ, 2022. – Т. 3. – С. 134-141.
2. Лобан, М. А. Способ измерения высот элементов земной поверхности в космическом радиолокаторе с синтезированием апертуры в режиме однопроходной интерферометрии / С.В. Козлов, М.А. Лобан // Информационные радиосистемы и радиотехнологии : материалы науч.- техн. конф. (Республика Беларусь, Минск, 29–30 ноября 2022 года) / редкол.: В. А. Богуш [и др.]. – Минск: БГУИР, 2022. – С. 144-149.
3. Лобан, М.А. Состав и основные требования к математической модели – цифровому «двойнику» подсистемы первичной обработки информации радиолокационной станции с синтезированием апертуры спутника дистанционного зондирования Земли / В.В. Радионович, М.А. Лобан // Сборник тезисов докладов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, секция «Радиотехника и электроника». – Минск, 2021. – С. 66-67.
4. Лобан, М. А. Анализ тенденций развития радиолокационных станций с синтезированием апертуры спутников дистанционного зондирования земли / М.А. Лобан, С.В. Козлов, В.В. Радионович // Сборник тезисов докладов 57-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, секция «Радиотехника и электроника». – Минск, 2021. – С. 66-65.
5. Лобан, М. А. Перспективные технические решения, используемые в радиолокационных станциях с синтезированием апертуры спутников дистанционного зондирования Земли/ М.А. Лобан, С.В. Козлов, В.В. Радионович // 57-я Научная Конференция Аспирантов, Магистрантов и Студентов БГУИР, Минск, 2021. С. 66-67.
6. Лобан, М. А. Методика оптимизации параметров радиолокатора с синтезированием апертуры космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии / М.А. Лобан // Сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, секция «Радиотехника и электроника». – Минск, 2022. – С. 135-140.
7. Лобан, М. А. Оценка точности радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования в режиме однопроходной интерферометрии / М.А. Лобан // Сборник тезисов докладов 58-й научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР, секция «Радиотехника и электроника». – Минск, 2021. – С. 140-144.