

## ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук, доцента Цветкова Олега Евгеньевича на диссертацию Каменского Кирилла Владимировича на тему: «Компенсация влияния траекторных нестабильностей носителя радиолокатора с синтезированием апертуры антенны при непрерывном излучении», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация» (технические науки)

### **Актуальность темы исследования**

Постоянное расширение круга задач, решаемых за счёт применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА), и требования к всепогодности и круглосуточности полётов, в т.ч. в условиях сильно пересечённой местности и местности с плохо развитой инфраструктурой, диктуют необходимость введения в состав бортового оборудования БЛА радиолокационных средств с синтезированной апертурой антенны (РСА). При этом РСА должна обеспечивать всепогодный и круглосуточный мониторинг чрезвычайных ситуаций (оценка масштабов бедствий, контроль экологических катастроф; оценка состояния, обнаружение поломок техногенных объектов, таких как ЛЭП, кабельные сети, нефтепроводы, газопроводы, плотины, дамбы и т.п.); обеспечивать ледовую разведку; обеспечивать навигационную привязку к радиолокационно - контрастным ориентирам. Кроме того, РСА может быть использована в других приложениях, таких как классификация землепользования, картографирование или повсеместный мониторинг лесной биомассы.

Качество радиолокационных изображений (РЛИ) РСА обычно оценивается субъективно и проявляется в детализированности снимка, контрастности, неискажённости геометрии объектов и пр. На качество РЛИ оказывает влияние сочетание множества факторов, поэтому при разработке современных РСА требуется исследование возможностей и ограничений существующих алгоритмов обработки траекторного сигнала в разных условиях и создание новых эффективных методов компенсации влияния траекторных нестабильностей (ТН) носителя РСА и миграции по каналам дальности. Поэтому тема диссертации Каменского К.В. является важной и актуальной.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Диссертация Каменского К.В. состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка из 108 наименований. Диссертация содержит 187 машинописных страниц, в том числе 7 таблиц и 73 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы и приведён обзор литературы, посвящённой компенсации влияния ТН на качество РЛИ. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы, представлены научные результаты и описана практическая

значимость результатов работы, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проанализированы принцип работы РСА непрерывного излучения (НИ) в режиме бокового (полосового) обзора и основные этапы обработки траекторного сигнала. Исследовано явление искажения радиолокационного рельефа (РР) цели, вызванное, по мнению автора, пространственной интерференционной картиной, появляющейся при прямом моделировании преобразованного траекторного сигнала от протяжённой многоточечной цели. В результате исследования предложены пути восстановления РР протяжённой цели, как для случая обработки реального сигнала, так и для случая обработки сигнала, полученного с помощью численного моделирования.

Во второй главе дано математическое описание модели траекторного сигнала в РСА НИ в виде двумерной матрицы комплексных отсчётов. Предложен алгоритм численного моделирования траекторного сигнала в РСА НИ с помощью прямого метода формирования траекторного сигнала во временной области. Примеры работы этого алгоритма иллюстрируют проблему искажения РЛИ муаровым узором, а также борьбу с ним с помощью применения одного из описанных в главе 1 способов восстановления РР.

В третьей главе проанализировано формирование РЛИ с помощью метода обратного проецирования, обоснован и проведён анализ методов формирования РЛИ, представляющих собой более быстрые альтернативы методу обратного проецирования. Рассмотрены: метод факторизованного обратного проецирования, метод Омега-К, дальностно-доплеровский алгоритм и метод масштабирования частоты. Особое внимание уделено анализу метода формирования РЛИ с помощью дальностно-доплеровского алгоритма. Описано развитие программного комплекса с целью реализации формирования РЛИ с помощью метода обратного проецирования и дальностно-доплеровского алгоритма. С помощью результатов работы программного комплекса иллюстрируется вывод об отсутствии необходимости использования фильтра компенсации остаточной видеофазы в дальнейших этапах диссертационного исследования.

В четвёртой главе утверждается, что качество РЛИ, получаемого методами, образованными от обратного проецирования, имеет предел, который позволяет выдвигать требования к характеристикам РСА НИ или конструировать архитектуру метода обработки траекторного сигнала, исходя из заранее ожидаемых дефектов РЛИ. Предложена и описана методика исследования влияния различных факторов, учитываемых математической моделью траекторного сигнала, на качество РЛИ. С помощью предложенной методики исследовано влияние характеристик навигационной системы носителя и вида ТН на качество РЛИ. Показано, что частота выдачи данных от навигационной системы носителя должна быть не ниже частоты

дискретизации траекторного сигнала по медленному времени, а приемлемая точность измерения координат зависит от ожидаемой интенсивности ТН.

В пятой главе проведён анализ методов компенсации движения, основанным на фильтровой обработке траекторного сигнала. Рассмотрена двухэтапная стратегия компенсации движения, а также подходы к одноэтапной компенсации движения, не использующей интерполяцию. Для дальностно-доплеровского алгоритма разработан одноэтапный алгоритм компенсации движения, основанный на компенсации движения первого порядка с усреднением по центру луча. С помощью численных экспериментов с применением разработанного программного комплекса установлено, что предложенный одноэтапный метод компенсации движения уступает ранее известному по ряду критериев, но в то же время обладает качественным преимуществом: обеспечиваемое на РЛИ без автофокусировки разрешение по азимуту не зависит от наклонной дальности. На основе предложенного алгоритма компенсации движения разработан алгоритм коррекции миграции сигнала по дальности, предназначенный для использования в дальностно-доплеровском алгоритме. С помощью численных экспериментов установлено, что предложенный алгоритм коррекции миграции обладает качественным преимуществом перед ранее известным: он способен полностью устранять «призрачные» копии амплитудного РЛИ.

#### **Достоверность и новизну исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В рамках диссертационной работы получены следующие научные результаты:

1. Математическое описание траекторного сигнала РСА НИ на основе многоточечной модели целей, позволяющее обосновать природу появления дефектов на РЛИ в виде тёмных полос, волнообразных помех и муаровых узоров.
2. Методика исследования влияния траекторных нестабильностей движения носителя РСА на качество РЛИ, формируемого с помощью дальностно-доплеровского алгоритма.
3. Алгоритм компенсации движения при обработке сигналов в РСА НИ на основе дальностно-доплеровского алгоритма, позволяющий добиться независимости разрешения по азимуту от наклонной дальности.
4. Алгоритм коррекции миграции сигналов по каналам дальности при формировании РЛИ в РСА НИ на основе дальностно-доплеровского алгоритма, позволяющий устранить помеху в виде сдвинутых по азимуту копий РЛИ.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного и апробированного математического аппарата при синтезе алгоритмов компенсации движения и коррекции миграции сигналов по каналам дальности при формировании РЛИ в РСА НИ, а также

подтверждена высокой сходимостью полученных результатов с математическим моделированием, и с результатами, полученными другими авторами.

### **Значимость для науки и практики полученных автором результатов**

Полученные результаты могут использоваться для улучшения качества РЛИ в РСА НИ, размещаемых на БЛА и применяемых для решения задач в области дистанционного зондирования земли. Созданный в рамках исследования программный комплекс в среде Matlab может быть использован для исследований в области обработки траекторного сигнала, а также в учебном процессе для студентов, обучающихся по специальностям «Радиотехника» и «Радиоэлектронные системы и комплексы».

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Полученные в диссертации результаты могут быть рекомендованы к использованию на предприятиях, занимающихся разработкой перспективных алгоритмов обработки траекторных сигналов РСА.

### **Завершенность диссертации, достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации**

Диссертация является завершенной научно - квалификационной работой, которая логично выстроена и хорошо оформлена. Автореферат диссертации Каменского К.В. соответствует основным положениям диссертации и позволяет сформировать обоснованное представление по всей работе в целом. Основные результаты по теме исследования изложены в 11 научных работах, из которых 4 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ (2 статьи – единолично), 2 публикации в зарубежных изданиях и 5 работ опубликованы в тезисах докладов научных конференций. Содержание диссертации Каменского К.В. соответствует п.п. 4, 5 паспорта специальности 2.2.16 - «Радиолокация и радионавигация» (технические науки).

### **Недостатки диссертационной работы**

1. В качестве модели функции отражения рассматривается набор отражателей с одинаковыми начальными фазами переотражения, что является грубым упрощением реального процесса формирования отражённого сигнала земной поверхностью (основная модель – набор отражателей со случайными амплитудами и случайными фазами переотражения, распределенными равномерно).

2. При описании алгоритма «дальность – доплер» метод как таковой не рассмотрен.

3. Автор при анализе влияния искажающих факторов излишне представляет результаты моделирования вместо аналитических расчётов.

4. В современных РСА оценка реальной траектории (точнее её параметров) определяется по измерениям БИНС (земные скорости и ускорения, комплексирование с СРНС). Требования по точности измерений этих параметров известны. Тем не менее, автор приходит к выводу о необходимости высокоточных измерений непосредственно координат ФЦА с точностью порядка миллиметров, что является крайне трудно достижимым для реальных условий.

Однако указанные недостатки в целом не снижают научной и практической значимости данной работы.

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней.**

Таким образом, диссертация Каменского Кирилла Владимировича на тему: «Компенсация влияния траекторных нестабильностей носителя радиолокатора с синтезированием апертуры антенны при непрерывном излучении» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке алгоритмов и программ исследования компенсации фазовых искажений в траекторном сигнале, вызванных траекторной нестабильностью движения носителя РСА, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний, что соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021 г. с изм. от 20.03.2021 г. № 426), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата технических наук, а её автор заслуживает присуждения искомой учёной степени.

Официальный оппонент

кандидат технических наук, доцент

« 02 » декабря 2022 г.

Олег Евгеньевич Цветков

Подпись к.т.н., доцента О.Е. Цветкова удостоверяю.

Начальник кадровой службы ООО «ЗелПром-Телеком»

Меркулова Ирина

Николаевна

« 02 » декабря 2022 г.

**Цветков Олег Евгеньевич** кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
ООО «ЗелПромТелеком»

Адрес электронной почты: al.vetckov@yandex.ru. Тел.раб.: +7(499)940-09-94

Рабочий адрес:

ООО «ЗелПромТелеком»

124482, г. Зеленоград, проезд Савёлкинский, д.4, пом. XXII, ком. 12, этаж 14

Адрес электронной почты:

Факс/Тел.: +7(499)940-09-94



С отзывом ознакомлен  
12.12.2022