

## ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, профессора Деткова Александра Николаевича 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 избранной темы.** Возможности применения радиолокационных систем с синтезированной апертурой антенны (РСА) в комплексах с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) постоянно расширяются для широкого круга задач в области картографирования, георадиолокации и радиолокационного мониторинга в сочетании с повышающимися требованиями к качеству получаемых изображений. 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 непрерывного излучения (НИ) 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. Следовательно, тема диссертации Каменского К.В. является важной и актуальной.

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Обоснованность основных научных результатов диссертации подтверждается: корректностью постановки задач исследования; обоснованностью основных предположений, допущений и исходных данных для расчётов; использованием апробированных методов имитационного моделирования, цифровой обработки сигналов и численных методов решения задач; удовлетворительным совпадением результатов проведенного моделирования в частных случаях с результатами, известными из современной литературы по обработке траекторных сигналов РСА; выводам отечественных и зарубежных учёных, опубликованным в ведущих научно-технических журналах: широким обсуждением результатов диссертации на международных и российских конференциях.

Основные научные положения, выносимые на защиту, выводы и рекомендации подтверждены расчётами и анализом с использованием методов вычислительной математики, математического и имитационного моделирования и не вызывают сомнений.

**Достоверность и новизна исследования, полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.** Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современного и апробированного математического аппарата при обработке траекторных сигналов и синтезе алгоритмов компенсации движения и коррекции миграции сигналов по каналам дальности при формировании РЛИ в РСА НИ на основе усовершенствованного



дально-дально-доплеровского алгоритма (ДДА), и подтверждена высокой схожимостью полученных результатов с математическим моделированием характеристик, а также с результатами, полученными другими авторами.

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

- 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;

- методика исследования влияния траекторных нестабильностей движения носителя РСА на качество РЛИ, формируемого с помощью ДДА;

- усовершенствованный алгоритм компенсации движения при обработке сигналов в РСА НИ на основе ДДА, позволяющий добиться независимости разрешения по азимуту от наклонной дальности;

- усовершенствованный алгоритм коррекции миграции сигналов по каналам дальности при формировании РЛИ в РСА НИ на основе ДДА, позволяющий устранить помеху в виде сдвинутых по азимуту копий РЛИ.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** Теоретическая значимость работы заключается в развитии новых подходов при синтезе алгоритмов компенсации движения и коррекции миграции сигналов по каналам дальности при формировании РЛИ в РСА НИ на основе усовершенствованного ДДА.

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 автором 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 научно-исследовательскими организациями РФ (в частности, АО «Концерн радиостроения «Вега», ФАУ «ГосНИИАС», АО «НИИП им. В.В. Тихомирова», АО «Корпорация «Фазотрон- НИИР» и др.) при техническом обосновании перспектив развития бортовых радиолокационных комплексов и систем и формировании ТТХ и ТЗ на создание таких систем, а также предприятиями промышленности занимающихся разработкой перспективных алгоритмов обработки траекторных сигналов РСА.

**Оценка содержания диссертации, её завершенность.** 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 первой главе проанализированы принцип работы РСА НИ в режиме бокового (полосового) обзора и основные этапы обработки траекторного сигнала. Исследовано явление искажения радиолокационного рельефа (РЛР) цели, вызванное пространственной интерференционной картиной, появляющейся при прямом моделировании преобразованного траекторного сигнала от протяжённой многоточечной цели. В результате исследования предложены пути восстановления РЛР 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 успешную борьбу с ним с помощью применения одного из описанных в главе 1 способов восстановления РЛР.

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, ДДА и метод масштабирования частоты. Особое внимание уделено анализу метода формирования РЛИ с помощью ДДА. Описано развитие программного комплекса с целью реализации формирования РЛИ с помощью метода обратного проецирования и ДДА. 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 ДДА 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 ДДА. С помощью численных экспериментов установлено, что предложенный алгоритм коррекции миграции обладает качественным преимуществом перед ранее известным: он способен полностью устранять «призрачные» копии амплитудного РЛИ.

Диссертация является завершённой научно - квалификационной работой, которая выполнена лично автором.

**Достоинства и недостатки в содержании и оформлении диссертации, мнение о научной работе соискателя в целом.** Диссертация логично выстроена, написана хорошим литературным языком и аккуратно 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. Утверждение автора о том, что «размещение РЛС на борту малых и сверхмалых БПЛА предполагает ограничения по массе для радиоэлектронной аппаратуры, поэтому используются радиолокаторы непрерывного излучения» (с. 17) является спорным, особенно для задач дистанционного зондирования земли.

2. В работе не обозначены рамки исследований. В частности, не показано, что все разработанные алгоритмы получены при отношении сигнал/шум на входе приёмника РСА существенно больше 1.

3. В работе не рассмотрено влияние упругих колебаний корпуса носителя РСА и погрешностей измерения радиальной скорости носителя, которые оказывают, по сравнению с траекторными нестабильностями, более существенное влияние на фазовые искажения траекторного сигнала РСА.



Однако указанные недостатки не наносят существенного ущерба значимости результатам диссертационной работы Каменского К.В. и не отражаются на её общей положительной оценке.

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

Учитывая вышеизложенное, считаю, что 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 радиолокации, 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), а её автор заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.2.16 – «Радиолокация и радионавигация» (технические науки).

Официальный оппонент

доктор технических наук, профессор

« 01 » декабря 2022 г.



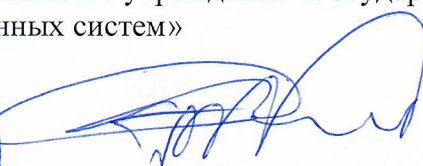
Александр Николаевич Детков

**Подпись д.т.н., профессора Деткова А.Н. удостоверяю**

Учёный секретарь Федерального автономного учреждения «Государственный научно - исследовательский институт авиационных систем»

доктор технических наук, профессор

« 01 » декабря 2022 г.

Сергей Михайлович Мужичек

**Детков Александр Николаевич** доктор технических наук, профессор, заместитель начальника подразделения 0500 по научно-технической работе Федерального автономного учреждения «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Адрес электронной почты: detkov@gosniias.ru. Тел. раб.: +7(499)157-95-31

*Рабочий адрес:*

Федеральное автономное учреждение «Государственный научно - исследовательский институт авиационных систем»

125167, г. Москва, ул. Викторенко, 7

www: gosniias.ru

Адрес электронной почты: info@gosniias.ru

Факс/Тел.: +7 (499) 943-86-05

С отзывом ознакомлен  
12.12.2022

