

На правах рукописи



Каменский Кирилл Владимирович

**КОМПЕНСАЦИЯ ТРАЕКТОРНЫХ НЕСТАБИЛЬНОСТЕЙ НОСИТЕЛЯ
РАДИОЛОКАТОРА С СИНТЕЗИРОВАНИЕМ АПЕРТУРЫ АНТЕННЫ
ПРИ НЕПРЕРЫВНОМ ИЗЛУЧЕНИИ**

Специальность: 2.2.16.

Радиолокация и радионавигация
(технические науки)

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2022

Работа выполнена на кафедре 410 «Радиолокация, радионавигация и бортовое радиоэлектронное оборудование» Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Научный руководитель: - **Гаврилов Константин Юрьевич**
доктор технических наук, профессор кафедры,
Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)

Официальные оппоненты: - **Детков Александр Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
заместитель начальника подразделения 0500
по научно-технической работе ФАУ «ГосНИИАС»

- **Цветков Олег Евгеньевич**
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный
сотрудник ООО «ЗелПром-Телеком»

Ведущая организация: - АО «Концерн радиостроения «Вега»,
г. Москва, Кутузовский проспект, д.34

Защита состоится «29» декабря 2022 года в «16:30» на заседании диссертационного совета 24.2.327.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте МАИ по ссылке:

https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=168703

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Учёный совет МАИ.

Учёный секретарь диссертационного совета



А.А. Горбунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Среди радиолокационных систем (РЛС), применяемых в области картографирования, георадиолокации и разведки, особое место занимают системы с непрерывным излучением (РЛС НИ). РЛС НИ отличаются от РЛС импульсного излучения меньшей дальностью действия (порядка 5...15км), но также менее требовательны к источникам питания, более просты в конструкции, обладают меньшими габаритами и массой, и сравнительно дешёвы в производстве, что делает их более доступными для массового потребителя и любительского радиовидения. Такие РЛС могут быть установлены на сверхмалые беспилотные летательные аппараты (БПЛА).

Главный результат работы РЛС НИ с синтезированием апертуры (РСА НИ) – радиолокационное изображение (РЛИ) облучённой сцены. Качество РЛИ 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 НИ требуется исследование возможностей и ограничений существующих алгоритмов обработки траекторного сигнала в разных условиях и создание новых эффективных методов компенсации влияния траекторных нестабильностей. Такая работа на протяжении последних лет активно ведётся многими исследователями в нашей стране (Гурьянов М.А., Толстов Е.Ф., Карпов О.А., Цветков О.Е., Купряшкин И.Ф., Монаков А.А. и др.) и за рубежом (Duersch M., Evers A., Long D., Saeedi J., Stringham C., Zaugg E. и др.).

Во многих работах отмечается, что наибольший вклад в искажение РЛИ вносят некомпенсированные искажения фазовой истории траекторного сигнала (ТС), вызванные траекторными нестабильностями (ТН). Компенсация фазовых искажений значительно осложнена из-за неточности измерения навигационной системой координат носителя РЛС, а также из-за особенностей реализации разных методов обработки ТС, формирующих РЛИ.

Компенсация влияния ТН на фазовую историю ТС неразрывно связана с методами формирования РЛИ и обычно ассоциируемая с автофокусировкой, которая в зависимости от архитектуры метода обработки ТС может принимать вид двумерной или одномерной, без обратной связи или с обратной связью.

В основе многих методов автофокусировки лежит представление влияния ТН на фазовую историю ТС в виде мешающей функции. В этой связи компенсация влияния ТН тождественна компенсации этой функции, и подходы к этой задаче очень разнообразны.

Для методов формирования РЛИ, предполагающих разделение процесса обработки ТС на сжатие по дальности и сжатие по азимуту, характерно разделение и методов компенсации влияния ТН на компенсацию движения (операцию, выполняемую в направлении наклонных дальностей) и на одномерную автофокусировку, выполняемую в направлении курсовых дальностей. Методы компенсации движения представляют интерес при разработке методов формирования РЛИ, основанных на дальностно-доплеровском алгоритме, методе масштабирования частоты и методе Омега-К.

Широко распространена двухэтапная стратегия компенсации движения, при этом в работах Дж. Форнаро, Дж. Францескетти, А. Моудгалья и других отмечается возможность использования первого её этапа как самостоятельного одноэтапного метода. Однако, в этом случае для получаемого РЛИ будет характерно заметное ухудшение разрешения по азимуту в зависимости от наклонной дальности, что является проблемой.

Объект исследования – размещаемые на малогабаритных беспилотных летательных аппаратах радиолокационные системы с синтезированием апертуры, использующие непрерывное излучение с линейно-частотной модуляцией.

Предмет исследования – методы и алгоритмы компенсации движения при формировании радиолокационного изображения путём обработки траекторного сигнала с помощью дальностно-доплеровского алгоритма.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является повышение качества синтезированного РЛИ путём разработки алгоритмов и программ компенсации фазовых искажений в траекторном сигнале, вызванных траекторной нестабильностью полёта носителя РЛС

Для достижения поставленной цели сформулирована **научная задача**: разработка алгоритмов и программ исследования компенсации фазовых искажений в траекторном сигнале, вызванных траекторной нестабильностью движения носителя РСА.

Декомпозиция научной задачи определила частные **задачи работы**:

1. Определение физических причин дефектов на РЛИ, вызванных интерференцией волн вторичного излучения и разработка методов их устранения.

2. Разработка алгоритмов и программ моделирования и обработки траекторного сигнала при синтезировании апертуры антенны.

3. Разработка методики исследования влияния траекторных нестабильностей носителя РСА на качество РЛИ, определяющей требования к характеристикам бортовой навигационной системы.

4. Разработка метода компенсации движения, использующего данные от БНС и предназначенного для применения в дальностно-доплеровском алгоритме обработки траекторного сигнала.

5. Разработка метода коррекции миграции, основанного на фильтровом подходе и предназначенного для применения в дальностно-доплеровском алгоритме обработки траекторного сигнала.

6. Проведение численных экспериментов, необходимых для анализа и сравнения разработанных алгоритмов с известными.

Методы исследования

При решении поставленных задач использовались методы математического анализа, теории обработки сигналов, математического моделирования.

Научная новизна работы

В рамках исследования получены следующие новые результаты:

1. Математическое описание траекторного сигнала РСА НИ с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ) 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 с ЛЧМ на основе дальностно-доплеровского алгоритма, позволяющий добиться независимости разрешения по азимуту от наклонных дальностей.

4. Алгоритм коррекции миграции сигналов по дальности при формировании РЛИ в РСА НИ с ЛЧМ на основе дальностно-доплеровского алгоритма, позволяющий устранить помеху в виде сдвинутых по азимуту копий РЛИ.

Практическая ценность результатов работы

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

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическое описание радиолокационных сигналов, соответствующих дальностным профилям протяжённых целей, полученное на основе решения задачи интерференции радиоволн для моделей многоточечных

целей, позволяет обосновать природу появления дефектов на РЛИ в виде тёмных полос, волнообразных помех и муаровых узоров.

2. Разработанная методика формирования требований к характеристикам БНС (точности измерения координат и частоте выдачи информации), основанная на методе обратного проецирования, устанавливает соответствие между показателями качества РЛИ (геометрическими искажениями и параметрами функции отклика цели) и видом и параметрами траекторной неустойчивости.

3. Метод компенсации движения носителя РСА НИ с ЛЧМ, основанный на использовании данных БНС, удовлетворяющих требованиям разработанной методики, позволяет за счёт формирования набора двумерных фильтров для дискретной сетки частот биений обеспечить требуемое качество синтезируемого РЛИ по наклонным дальностям при дальностно-доплеровском алгоритме и добиться независимости разрешения по азимуту от наклонной дальности.

4. Предложенный метод коррекции миграции позволяет за счёт увеличения размера траекторного сигнала устранить помехи в виде сдвинутых по азимуту копий объектов на радиолокационном изображении, получаемом с помощью дальностно-доплеровского алгоритма.

Публикации

Основные результаты по теме исследования изложены в 11 работах, из которых 4 статьи опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья опубликована в журнале, цитируемом международной базой Web of Science, 1 статья опубликована в журнале, цитируемом международной базой Scopus и 5 работ опубликованы в тезисах докладов научных конференций.

Апробация работы

Материалы диссертационной работы обсуждались на: всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» 2018-го года, на международных конференциях «Авиация и космонавтика» 2018-го и 2019-го годов, а также на

международной конференции «Systems of Signal Generation and Processing in the Field of Onboard Communications» 2020-го года.

Объём и структура работы

Диссертация имеет объём 187 машинописных страниц, состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Иллюстративный материал состоит из 73 рисунков и 7 таблиц. Список литературы содержит 108 наименований, включая работы автора.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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 описан принцип работы РЛС НИ с ЛЧМ, используемой в качестве радиолокатора бокового полосового обзора с синтезированием апертуры. Дана общая схема и описаны основные этапы обработки сигнала. Для протяжённой цели, представленной многоточечной моделью, введена модель преобразованного сигнала (ПС) в РЛС НИ с ЛЧМ и дано её математическое описание:

$$s_{ПТС}(t) = \sum_{k=1}^K U_r^{(k)} \cos(2\pi F_o^{(k)} t + \theta^{(k)}), \quad t \in [0, T_M), \quad (1)$$

где K – количество точечных отражателей, из которых составлена протяжённая цель; k – номер отражателя; $U_r^{(k)}$ – амплитуда ПС; $F_o^{(k)}$ – частота биений; $\theta^{(k)}$ – фаза преобразованного сигнала. Амплитудный спектр такого сигнала рассматривается в РЛС НИ с ЛЧМ как радиолокационный профиль соответствующей протяжённой цели.

Проведён анализ сигналов, отражённых от протяжённой цели, и проведён анализ появления искажений радиолокационного профиля протяжённой цели в РЛС НИ с ЛЧМ, вызванных взаимной интерференцией сигналов, отражённых от разных участков протяжённой цели.

Получены условия, при которых вызванные пространственной интерференционной картиной искажения амплитудного спектра ПС от протяжённой цели в РЛС НИ с ЛЧМ отсутствуют:

$$\Delta\tau = \frac{n}{f_0 + B/2} \quad \text{или} \quad \Delta R = \frac{cn}{2f_0 + B} \quad \text{при } n = 1, 2, \dots, \quad (2)$$

где $\Delta\tau$ – разница между временем задержки сигналов, отражённых от соседних точечных отражателей; f_0 – начальная частота в ЛЧМ; B – девиация частоты; ΔR – расстояние между соседними отражателями в протяжённой цели; c – скорость распространения электромагнитной волны в среде. При этом число отражателей может быть любым.

Введён показатель искажения спектра, определяемый на участке заданной полосы частот длиной $\Delta F = F_{max} - F_{min}$:

$$\mu = \frac{\int_{F_{min}}^{F_{max}} |S(f) - S_0(f)| df}{\int_{F_{min}}^{F_{max}} |S_0(f)| df}, \quad (3)$$

где $S_0(f)$, $S(f)$ – неискажённый и искажённый спектры ПС соответственно; F_{min} и F_{max} – начало и конец выбранного участка полосы частот биений. Величина μ стремится к нулю с уменьшением искажений спектра ПС и к единице – с их ростом. С помощью этого показателя исследовано влияние значений параметров математической модели преобразованного сигнала от протяжённой цели на искажения её радиолокационного профиля.

По результатам исследования предложены методы восстановления радиолокационного профиля протяжённой цели для случая обработки реального сигнала и для случая обработки сигнала, полученного с помощью численного моделирования:

1) многокадровая обработка, смысл которой состоит в программном управлении начальной частотой излучаемого колебания, чтобы формировать повторяющуюся последовательность из M интервалов модуляции, каждому из которых соответствует своя начальная частота f_{0m} , где $m = 1, \dots, M$. Принятый сигнал последовательно смешивается со своим опорным ЛЧМ-колебанием – и в частотной области формируется M разных ПС. Итоговый ПС формируется как взвешенная сумма полученных M сигналов. Для рассмотренного в диссертации случая удалось добиться уменьшения значения показателя искажения μ с 0,90 до 0,52 при $M = 5$ и 0,29 при $M = 10$.

2) варьирование высоты полёта носителя РСА, применяемое при численном моделировании позволяет «разместить» радиолокационный профиль протяжённой цели на участке полосы частот биений, где значение показателя искажения μ примерно равно 1.

3) нарушение пространственной интерференционной картины с помощью добавления случайной величины к фазам отражённых сигналов или к координатам точечных отражателей, что позволило в рассмотренной в диссертации модели уменьшить значение показателя искажений μ до 0,30.

В главе 2 дано математическое описание модели ТС в РСА НИ с ЛЧМ, который может быть представлен в виде двумерной матрицы действительных или комплексных отсчётов.

Проведён обзор литературы и проанализированы подходы к формированию траекторного сигнала при численном моделировании ТС. Представлены три обобщённые группы методов формирования ТС: прямое формирование во временной области, прямое формирование в частотной области и обратное формирование.

Предложен и описан алгоритм численного моделирования ТС РСА НИ с ЛЧМ с помощью прямого метода формирования ТС во временной области (Рис. 1). Алгоритм основан на методах геометрической оптики, использует ЧБОИ для

моделирования облучаемой сцены в виде набора точечных отражателей. Допускается использование непрерывной модели движения носителя РСА.

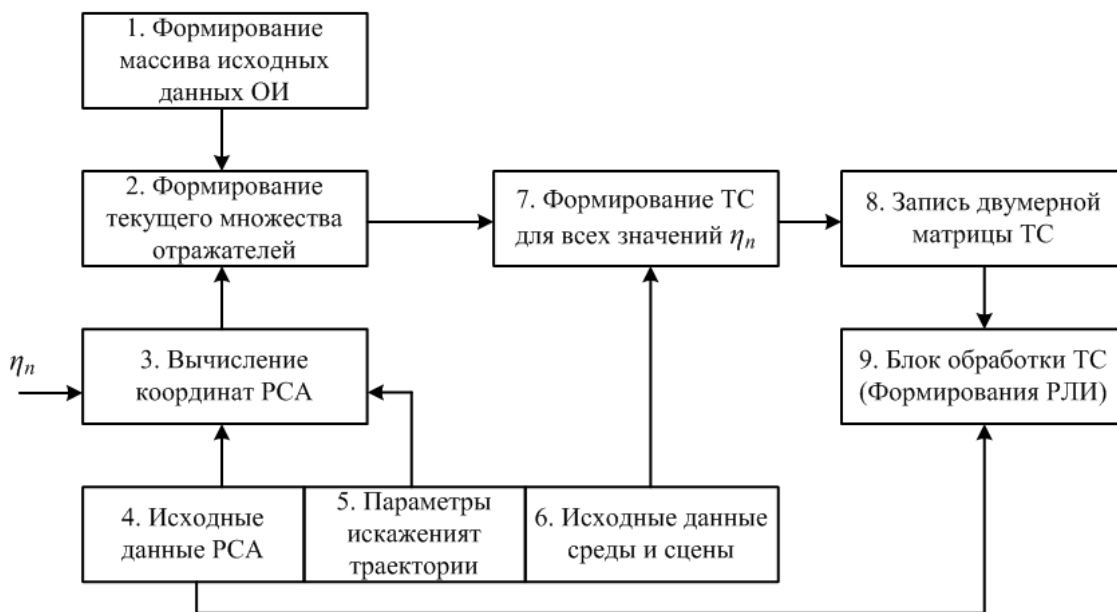


Рис. 1 – Предложенный алгоритм формирования ТС

Описана реализация предложенного алгоритма в виде программного комплекса в среде Matlab. С помощью примеров работы разработанного программного комплекса показано, что ТС, полученный в результате численного моделирования, подходит для формирования РЛИ и исследования влияния различных факторов на качество последнего.

Проиллюстрировано искажение муаровым узором РЛИ, полученного при обработке численно смоделированного ТС. Со ссылками на сторонние работы отмечено, что эти искажения – признак адекватности модели, использованной при формировании ТС.

Для борьбы с искажениями РЛИ в виде муарового узора успешно применён один из способов восстановления радиолокационного профиля, предложенных в главе 1. Пространственная интерференционная картина была разрушена путём добавления случайной величины к фазе сигналов, полученных от каждого из точечных отражателей.

Глава 3 посвящена анализу методов обработки ТС с целью формирования РЛИ и дальностно-доплеровскому алгоритму (ДДА) в частности. Проанализирован метод обратного проецирования как метод, лежащий в основе многих методов формирования РЛИ и позволяющий добиваться его наилучшего качества. Приведены математические выражения, описывающие работу этого метода, отмечены достоинства и недостатки. Обоснован поиск более быстрых альтернатив этому методу.

Проведён анализ методов формирования РЛИ, представляющих собой более быстрые альтернативы методу обратного проецирования. Кратко рассмотрены два подхода: уменьшение количества вычислений и двумерных фильтров, а также отказ от двумерных фильтров в пользу одномерных. Для каждого из подходов со ссылками на литературу кратко рассмотрены по два примера, включая: метод факторизованного обратного проецирования, метод Омега-К, ДДА и метод масштабирования частоты.

Для решения задач диссертационной работы выбран ДДА, и проанализировано формирование РЛИ с его помощью (Рис. 2).

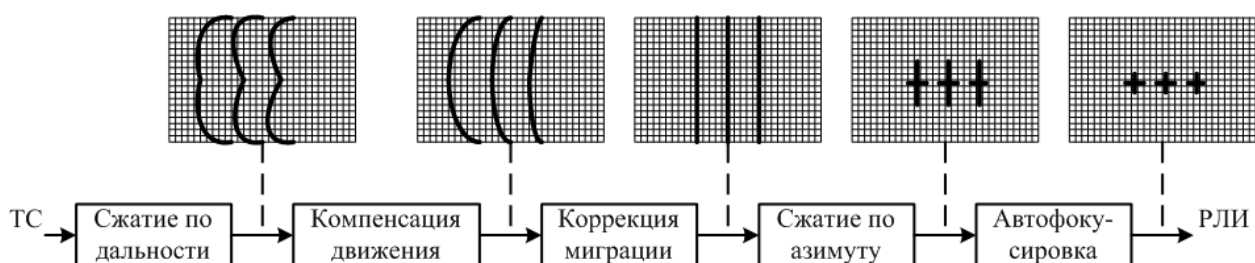


Рис. 2 – Основные операции ДДА

В основе использованного в диссертационной работе ДДА лежит представление времени задержки сигнала от точечного отражателя в виде суммы:

$$\tau_k(t, \eta) = \tau_{k0} + \tau_{kRCM}(t, \eta) + \tau_{kTH}(t, \eta), \quad (4)$$

где τ_{k0} – время задержки, соответствующее кратчайшему расстоянию от РСА до точечного отражателя; $\tau_{kRCM}(t, \eta)$ – прибавка, связанная с идеальным

прямолинейным инерциальным движением носителя РСА; $\tau_{kTH}(t, \eta)$ – прибавка, связанная с появлением траекторной неустойчивости.

Модель ТС, лежащая в основе ДДА, описывается выражением:

$$s_{TC}(t, \eta) = \sum_{k=1}^K \left\{ \exp \left(j2\pi \left[f_0 \tau_{k0} + \beta \tau_{k0} t - \frac{\beta}{2} \tau_{k0}^2 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + f_0 \tau_{kRCM}(t, \eta) + \beta \tau_{kRCM}(t, \eta) t - \frac{\beta}{2} \tau_{kRCM}^2(t, \eta) - \beta \tau_{k0} \tau_{kRCM}(t, \eta) + \right. \right. \right. \quad (5) \\ \left. \left. \left. + f_0 \tau_{kTH}(t, \eta) + \beta \tau_{kTH}(t, \eta) t - \frac{\beta}{2} \tau_{kTH}^2(t, \eta) - \beta \tau_{k0} \tau_{kTH}(t, \eta) - \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \beta \tau_{kRCM}(t, \eta) \tau_{kTH}(t, \eta) \right] - j\varphi_k \right\},$$

где фазовые составляющие сгруппированы так, чтобы каждая строчка позволяла понять смысл операций, составляющих основу ДДА. Составляющие из первой строчки, а также первая и последняя составляющие второй строчки необходимы для операции сжатия ТС по азимуту. Оставшиеся составляющие второй строчки должны быть устранены с помощью операции коррекции миграции (КМ). Составляющие из третьей строчки выражения (5) должны быть устранены с помощью операции компенсации движения (КД), а предпоследняя составляющая в последней строчке этого выражения – операцией автофокусировки.

Приведены математические выражения, описывающие модель ТС после каждого этапа его обработки этим методом. Отмечены достоинства, недостатки и особенности ДДА.

Приведены сведения об усовершенствовании разработанного программного комплекса для задач, связанных с формированием РЛИ и их анализом. На основе результатов экспериментов, проведённых с помощью разработанного программного комплекса, сделан вывод об отсутствии необходимости использования операции компенсации остаточной видеофазы на дальнейших этапах диссертационного исследования, поскольку эта операция не оказала сколько-нибудь заметного влияния на амплитудные РЛИ, полученные при обработке ТС с помощью ДДА.

В главе 4 рассматривается предел качества РЛИ, получаемого с помощью метода обратного проецирования как метода, от которого образован ДДА. Предел качества РЛИ, которое может быть получено в заданных условиях, позволяет выдвигать требования к характеристикам устройств радиолокационного комплекса (например, к бортовой навигационной системе (БНС)) или конструировать архитектуру метода обработки ТС, исходя из заранее ожидаемых дефектов РЛИ.

Рассмотрены параметры математической модели ТС, влияющие на качество РЛИ. Основное внимание уделено двум характеристикам БНС: точности измерения координат и частоте выдачи данных. Выявлено влияние каждой из этих характеристик на качество РЛИ, оцениваемое по функции отклика точечного отражателя.

Предложена и описана методика исследования влияния тех или иных факторов, учитываемых математической моделью ТС, на качество РЛИ. Приведены блок-схемы для случаев формирования РЛИ методом обратного проецирования (Рис. 3) и с помощью ДДА (Рис. 4), а также пояснён принцип изменения методики в зависимости от используемого метода формирования РЛИ.

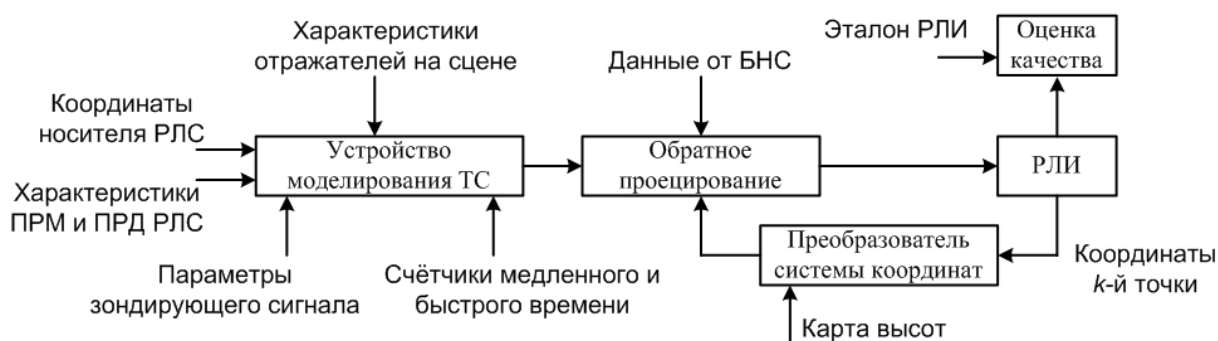


Рис. 3 – Блок-схема методики исследования влияния ТН на качество РЛИ (метод обратного проецирования)

Методика вводит объективные критерии качества РЛИ, измеряемые по функции отклика точечного отражателя: ширина главного луча, относительные уровни максимумов боковых лепестков.

Для РЛИ, получаемого методом обратного проецирования, в случае исследования влияния ТН на качество РЛИ, методика принимает вид:

1. Получение (и оценка качества) РЛИ на основе ТС, смоделированного при условии отсутствия ТН.
2. Получение (и оценка качества) РЛИ на основе ТС, смоделированных с учётом наличия траекторных нестабильностей с заданными свойствами.
3. Анализ и сравнение полученных результатов с целью определения количественных показателей ухудшения качества РЛИ.

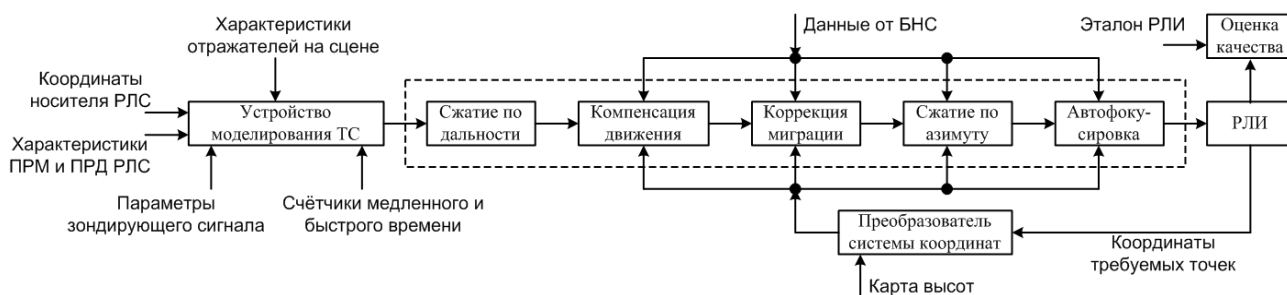


Рис. 4 – Блок-схема методики исследования влияния ТН на качество РЛИ (ДДА)

На примере ДДА показано, как методика меняет вид при смене метода формирования РЛИ:

1. Получение (и оценка качества) эталонного РЛИ в координатах «наклонная дальность – медленное время» с помощью обратного проецирования. Блок «Преобразователь системы координат» здесь принимает из системы координат формируемого РЛИ k -ю точку с координатами $(f_{\bar{o}k}, \eta_k)$ и передаёт её в метод обратного проецирования для формирования сигнала $s_{ИХ,k}(\eta, t)$, где $f_{\bar{o}k} = \beta \tau_k = 2 \frac{\beta}{c} \sqrt{(y_k^2 + z_k^2)}$, $\eta_k = x_k / v$, v – постоянная скорость движения носителя РЛС, (x_k, y_k, z_k) – координаты k -й точки в радарграмметрической системе координат.

2. Получение (и оценка качества) РЛИ с помощью ДДА на основе того же ТС, который использовался для получения эталонного РЛИ.

3. Получение (и оценка качества) РЛИ методом ДДА на основе ТС, смоделированных с учётом наличия ТН с заданными свойствами.

4. Анализ и сравнение полученных результатов с целью определения количественных показателей ухудшения качества РЛИ.

С помощью предложенной методики исследовано влияние характеристик БНС и вида ТН на качество РЛИ, получаемого методом обратного проецирования. Рассмотрены следующие случаи: ТН отсутствуют; ТН описывается постоянной величиной; ТН описывается линейной функцией; ТН описывается нелинейной функцией, а именно – синусоидой в плоскости xOy . Приведён пример субъективного улучшения качества РЛИ, полученного обратным проецированием, при увеличении точности измерения координат и частоты выдачи данных БНС.

Показано, что частота выдачи данных от БНС должна быть не ниже частоты дискретизации ТС по медленному времени, а приемлемая точность измерения координат зависит от ожидаемой интенсивности ТН. Для рассмотренного случая (параметры сигнала, обеспечивающие разрешающую способность при рабочей длине волны 3 см) получена оценка требуемой точности измерения координат РСА порядка 1...5мм. Визуальные материалы исследования подтверждают этот вывод в отношении требования миллиметровой погрешности измерения координат, что так же согласуется с актуальными работами других авторов, связанными с предъявлением требований к системе микронавигации на борту БПЛА.

В главе 5 проведён обзор и анализ литературы, посвящённой методам компенсации движения (КД), основанным на фильтровой обработке ТС. Рассмотрена двухэтапная стратегия КД, а также подходы к одноэтапной КД, не использующей интерполяцию.

Для ДДА разработан одноэтапный метод КД, основанный на КД первого порядка с усреднением по центру луча (УпЦЛ). Разработанный метод использует допущение, что значимая часть энергии отклика точечного отражателя в пространстве «частота биений – медленное время» сосредоточена

в одном отсчёте по оси частоты биений. Благодаря этому допущению метод реализует цикл, в каждой из итераций которого из исходного траекторного сигнала вырезается участок, на основе которого создаётся временный полноразмерный траекторный сигнал. Этот новый траекторный сигнал подвергается фильтровой обработке с использованием данных от бортовой навигационной системы, а затем аддитивно прибавляется к изначально пустой матрице итогового траекторного сигнала, который и есть результат работы метода компенсации движения (Рис. 5).

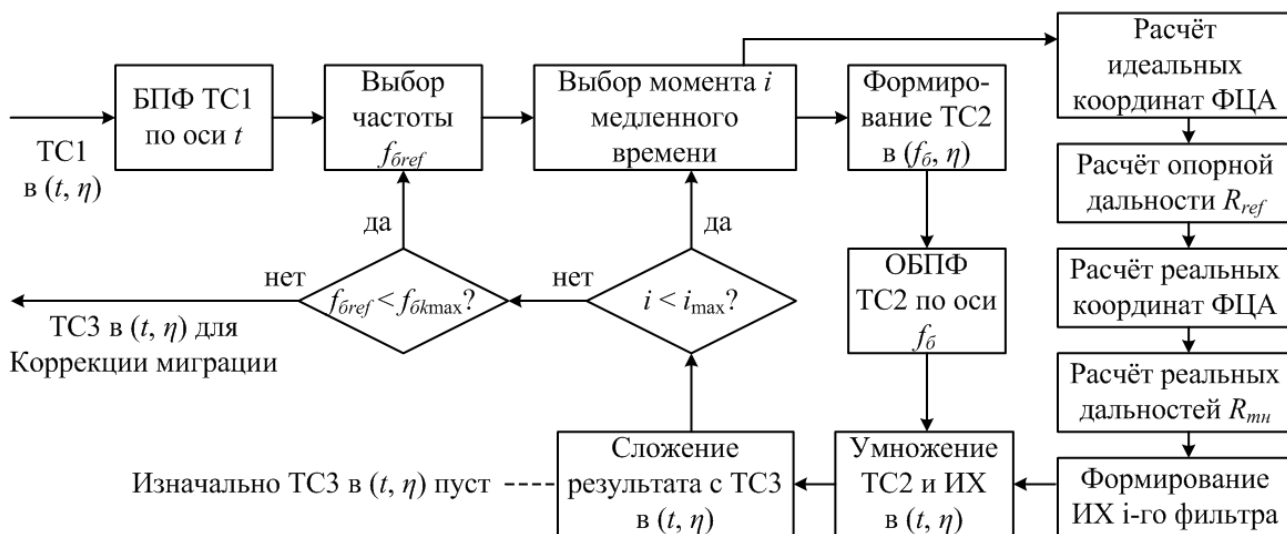


Рис. 5 – Предложенный метод КД

С помощью численных экспериментов с применением разработанного программного комплекса установлено, что предложенный одноэтапный метод КД уступает ранее известному, основанному на УПЦЛ, а именно: в зависимости от вида траекторной неустойчивости разработанный алгоритм может допускать увеличение уровня боковых лепестков, расширение функции отклика цели по оси курсовых дальностей и смещение отклика относительно положения эталона.

На основе предложенного метода КД разработан метод коррекции миграции (КМ) сигнала по дальности, предназначенный для использования в ДДА (Рис. 6). Разработанный метод КМ так же использует цикл, в каждой из итераций которого создаёт временный ТС на основе участка, вырезанного из исходной записи. Однако, временный траекторный сигнал имеет в два раза

большой размер в количестве отсчётов по азимуту, чем временный сигнал, с которым работает метод КД, поскольку разработанный метод КМ оперирует с в два раза большим интервалом курсовой дальности, где определена траектория идеального прямолинейного инерциального движения носителя РСА.

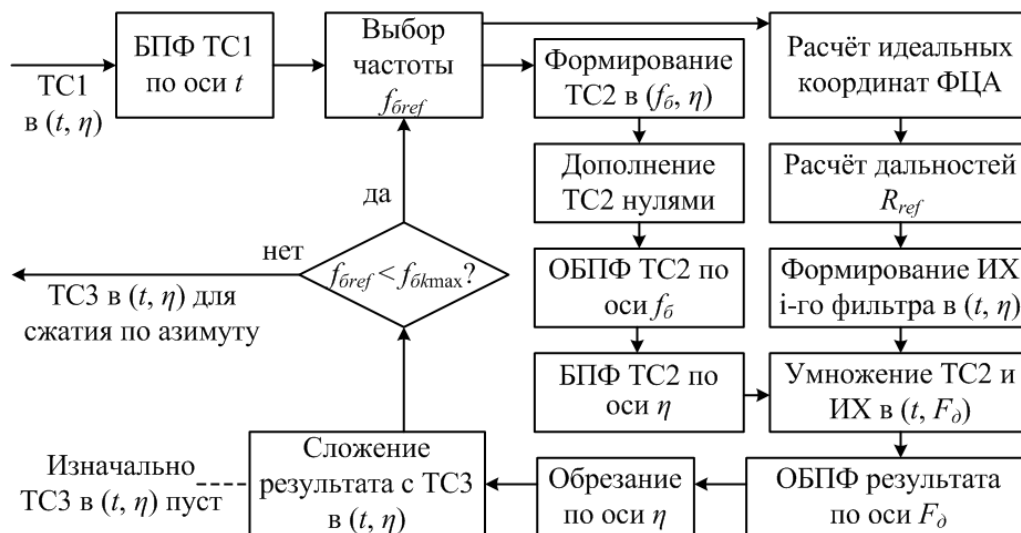


Рис. 6 – Блок-схема предлагаемого алгоритма КМ

С помощью численных экспериментов с применением разработанного программного комплекса установлено, что предложенный метод КМ, как и алгоритм с аппроксимацией косинуса угла визирования (АКУВ), хорошо справляется с уменьшением ширины функции отклика цели по оси наклонных и курсовых дальностей, а также совместим с одноэтапными и двухэтапными методами КД. Однако, разработанный алгоритм КМ обладает качественным преимуществом: он способен полностью устранять помеху в виде сдвинутых по азимуту копий амплитудного РЛИ, вызванную попаданием в фильтр сжатия по азимуту отсчётов, связанных с отражателями, которым соответствуют другие кратчайшие расстояния до РСА (Рис. 7).

Совместное использование разработанных методов КД и КМ наглядно продемонстрировало качественное преимущество разработанного метода КД перед методом КД с УПЦЛ: искажения функции отклика цели, вызванные фазовой составляющей, не скомпенсированной методом КД, не зависят от наклонной дальности (Рис. 8, где по оси абсцисс отложены номера отражателей

по мере их удаления от РСА, а по оси ординат – разрешение по азимуту в метрах). Так, метод КД с УпЦЛ в рассмотренной модели с зигзагообразной ТН (описывающейся синусоидой в плоскости xOy с амплитудой 10 м по оси Oy в радарграмметрической системе координат) позволяет обеспечить разрешение РЛИ по азимуту в пределах до 20м на интервале шириной 25м в окрестности точки, на которую метод КД настроен. В рамках этой же модели разработанный метод КД в удерживает разрешение по азимуту в пределах 10...13м на интервале 200м.

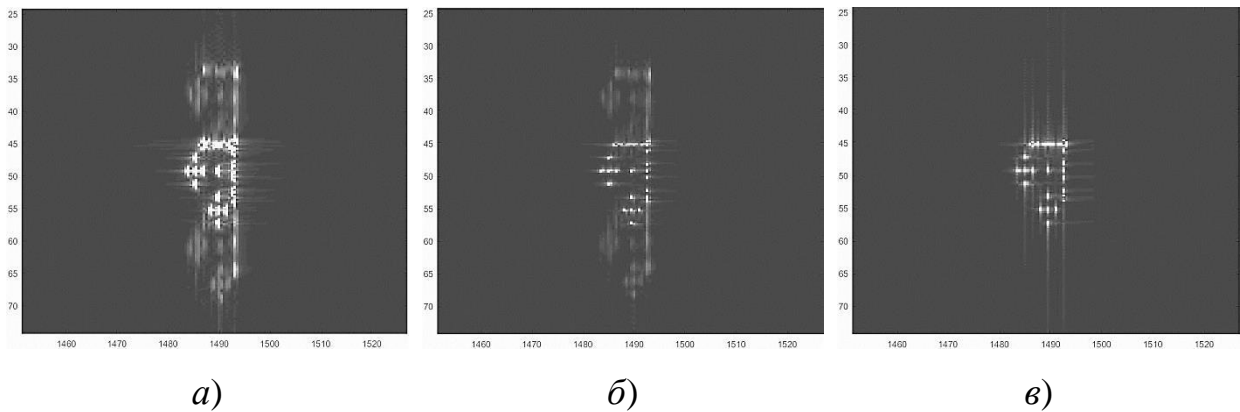
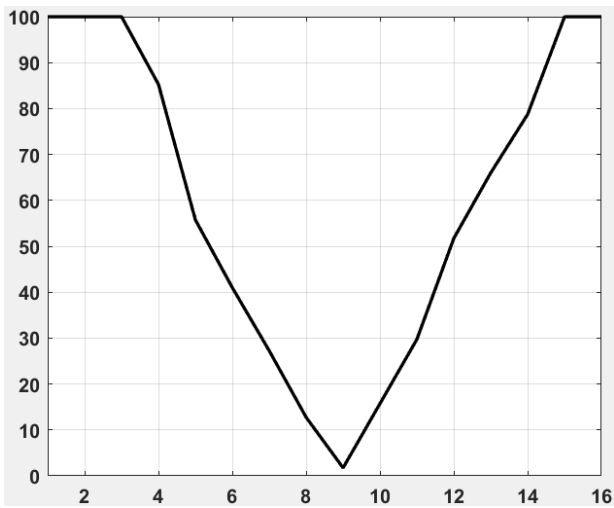
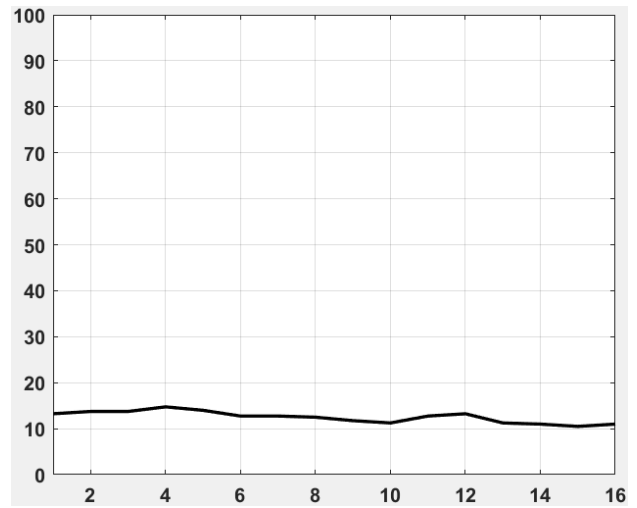


Рис. 7 – Сцена с 28 точечными целями: а) КМ нет; б) КМ с АКУВ; в) предложенный метод КМ

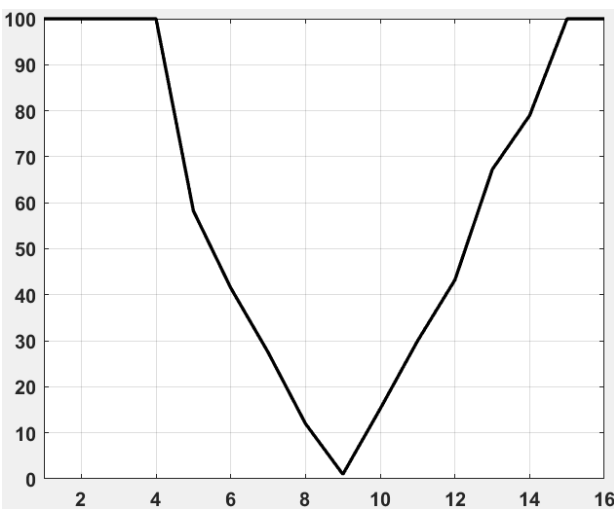
Отмечено, что несовпадение шкал медленного времени затрудняет совместную работу предложенных методов КД и КМ в контексте устранения всех мешающих фазовых составляющих, образовавшихся при обработке траекторного сигнала из-за влияния траекторной нестабильности. Это обстоятельство является обоснованием перспективы дальнейших исследований уже в направлении создания специального метода автофокусировки, специального фильтра сжатия по азимуту или в направлении развития предложенного метода КД до двухэтапного.



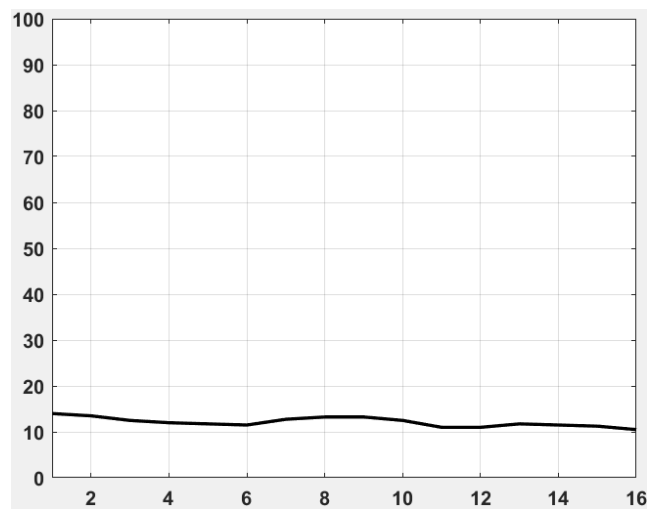
a)



z)



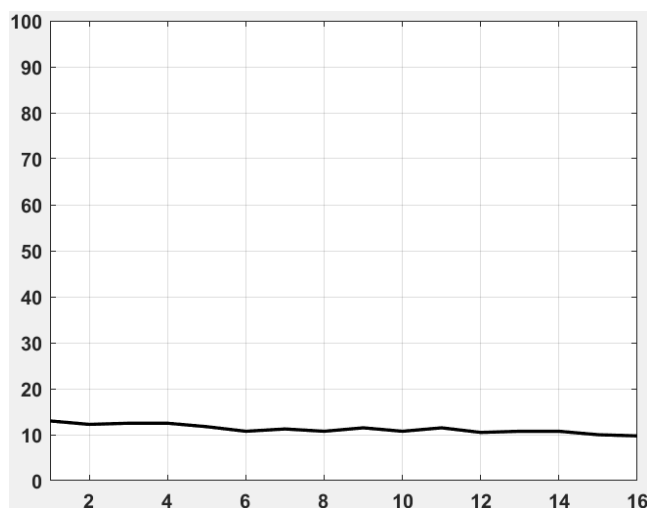
b)



d)



v)



e)

Рис. 6 – Зависимости разрешения по азимуту для КД с УпЦЛ: а) без КМ; б) КМ с АКУВ; в) разработанная КМ. Аналогичные зависимости для разработанного метода КД: з) без КМ; д) КМ с АКУВ; е) разработанная КМ.

В заключении приведены основные результаты диссертации.

1. Математическое описание ТС для бортовой РЛС НИ с синтезированием апертуры антенны в режиме бортового полосового обзора (далее – просто РСА НИ), позволяющее объяснить искажения радиолокационных профилей протяжённых целей, принимающие на радиолокационном изображении вид тёмных полос, волнообразных помех и муарового узора.
2. Описание зависимостей характеристик искажений радиолокационных изображений от значений величин, характеризующих параметры зондирующего сигнала РСА НИ, параметры съёмки и параметры облучаемых объектов.
3. Методы борьбы с искажениями радиолокационных профилей протяжённых целей, вызванными пространственной интерференционной картиной: многокадровая обработка, варьирование относительной высоты полёта носителя РСА НИ и нарушение пространственной интерференционной картины.
4. Методика исследования влияния траекторных нестабильностей движения носителя РСА НИ на качество РЛИ, определяющая требования к характеристикам бортовой навигационной системы.
5. Алгоритм компенсации движения при обработке сигналов в РСА НИ на основе дальностно-доплеровского алгоритма, позволяющий добиться независимости разрешения по азимуту от наклонных дальностей.
6. Алгоритм коррекции миграции сигналов по дальности при формировании РЛИ в РСА НИ на основе дальностно-доплеровского алгоритма, позволяющий устранить помеху в виде сдвинутых по азимуту копий РЛИ.
7. В среде Matlab разработан программный комплекс, представляющий собой составной гибко настраиваемый исследовательский инструмент с графическим интерфейсом, позволяющий моделировать ТС РСА НИ с ЛЧМ с помощью прямого формирования, а также формировать РЛИ путём обработки ТС с помощью различных методов, включая метод обратного проецирования и дальностно-доплеровский алгоритм.

Список публикаций по теме диссертации

1. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В. Восстановление профиля протяжённой цели при радиолокационном зондировании непрерывным ЛЧМ-сигналом // Радиотехника. №11(17), 2019 – С. 26–42.
2. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В. Методы численного моделирования траекторного сигнала в радиолокаторе с синтезированием апертуры. 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». 19–23 ноября 2018 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор», 2018. – С. 254–255.
3. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Канащенков А.И., Панявина Н.С. Анализ отраженных сигналов при зондировании протяженных целей непрерывным модулированным колебанием // Сб. трудов. XII Всероссийская конференция "Радиолокация и радиосвязь". М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. 26-28 ноября 2018. С. 152–156.
4. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Малютина О.А. Моделирование траекторного сигнала в радаре с синтезированием апертуры на основе оптических изображений земной поверхности // Труды МАИ. 2021. №118. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=158252>. DOI: 10.34759/trd-2021-118-12.
5. Каменский К. В. Влияние траекторных нестабильностей и характеристик бортовой навигационной системы на качество радиолокационного изображения при синтезировании апертуры // Труды МАИ. 2022. №125. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=168186>. DOI: 10.34759/trd-2022-125-14.
6. Каменский К.В. Компенсация движения и коррекция миграции при обработке траекторного сигнала в радиолокаторе с синтезированием апертуры антенны при непрерывном излучении // Радиотехника. 2022. Т. 86. № 7. С. 113–133. DOI: 10.18127/j00338486-202207-18
7. Каменский К.В., Гаврилов К.Ю. Искажения радиолокационного профиля протяжённой цели при зондировании сигналом с линейной частотной модуляцией. 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 года. Москва. Тезисы – Типография «Логотип», 2019 – С.122–123

8. Gavrilov, K.Y., Kamenski, K.V., Kanaschenkov, A.I. and Panyavina, N.S. Signal spectrum distortion for an extended target in a radar with a continuous frequency-modulated signal // *Amazonia Investiga*, 8(20), 2019, pp. 210–218.
9. Gavrilov K.Yu., Kamenskiy K.V. Computer modelling techniques of a track signal in a synthesized aperture radar // 17th International Conference “Aviation and Cosmonautics – 2018”. 19–23 November, 2018. Moscow. Abstracts. – Printing house “Luxor”, 2018, pp. 255–256.
10. Kamenskiy K. V., Gavrilov K. Y. Analysis of Distortions in the De-ramped LFM-CW Signal of an Extended Target // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2020, pp. 1–6, DOI: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078585.
11. Kamenskiy K.V., Gavrilov K.Yu. Radar profile distortions of an extended target while probing with a linear frequency modulated signal // 18th International Conference “Aviation and Cosmonautics – 2019”. 18–22 November, 2019. Moscow. Abstracts. – Printing house “Logotype”, 2019, pp. 429–430.