

На правах рукописи

УДК 621.396.967

МАЙСТРЕНКО ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Синтезирование апертуры антенны при совместном прямолинейном и вращательном перемещении фазового центра реальной антенны

Специальность 05.12.14 - «Радиолокация и радионавигация»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2013

Работа выполнена на кафедре 401 «Радиолокационные и радионавигационные системы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Татарский Борис Григорьевич

Официальные оппоненты: **Сарычев Валентин Александрович,**
доктор технических наук, профессор;
ОАО НПП «Радар ммс», заместитель генерального
конструктора.

Юрчик Игорь Алексеевич,
кандидат технических наук; ОАО «Концерн «ВЕГА»,
начальник лаборатории, старший научный сотрудник.

Ведущая организация: ОАО «Корпорация «Фазотрон – НИИР».

Защита диссертации состоится «___» _____ 2013 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.125.03 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП, Волоколамское шоссе д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

Дата рассылки автореферата: «___» _____ 2013 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.125.03

д.т.н., доц.

Сычев М.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа посвящена исследованию вопросов синтезирования апертуры антенны при перемещении фазового центра реальной антенны одновременно по вращательной и поступательной траекториям применительно к решению задач дистанционного радиолокационного мониторинга земной поверхности. Рассматриваются алгоритмы обработки траекторного сигнала, формируемого в процессе синтезирования, и проводится оценка их эффективности.

Актуальность темы

Неотъемлемой характеристикой качества жизни и уровня благосостояния населения является состояние окружающей среды, подверженное губительному влиянию со стороны промышленного техногенеза территории. Поэтому вопросы минимизации техногенного воздействия на окружающую среду имеют высокую значимость.

Для контроля состояния окружающей среды, как правило, используют различного типа системы мониторинга. При построении систем мониторинга обычно используют комплексные методы и средства дистанционного зондирования в сочетании с пространственно - распределенными системами сбора, обработки и обмена полученными данными. Системы данного рода должны обеспечивать, во-первых, получение в любое время года и суток и при любых метеоусловиях информации об окружающей среде, ее комплексную обработку, селекцию и распределение между возможными потребителями; во-вторых, - представление пользователям результатов мониторинга объектов и окружающей среды в целях обеспечения информационной и интеллектуальной поддержки баз данных (БД) пользователей; в-третьих, - формирование и накопление сценариев типовых процессов, отражающих состояние окружающей среды, их возникновения и развития.

Комплексная система мониторинга, как правило, базируется на многоуровневой информации, получаемой с помощью наземных, космических и авиационных средств.

При реализации программ мониторинга земной поверхности и разведки природных ресурсов наиболее часто используются аэроносители, оснащенные оптическими, инфракрасными, радиометрическими, магнитометрическими и др. средствами, существенным недостатком которых является зависимость получения требуемой информации от погодных условий, времени года и суток. В то же время, возможность получения информации независимо от времени и в сложных метеоусловиях могут обеспечить только радиолокационные средства. Причем, для получения детальной информации о состоянии земной поверхности необходимо

использование радиолокационных систем (РЛС) с высоким разрешением. Разрешающая способность современных радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) близка к разрешающей способности оптических средств, используемых в системах аэрокосмического мониторинга земной поверхности, что дополнительно подтверждает актуальность использования данных систем для целей мониторинга. Как правило, оперативный мониторинг окружающей среды обеспечивается с помощью систем, устанавливаемых на авиационных носителях.

Следует отметить возрастающую роль авиационных средств мониторинга, прежде всего, вертолетных многофункциональных систем в глобальной системе мониторинга Земли. В России, имеющей обширные труднодоступные и слабо освоенные территории; такие вертолетные системы, построенные на базе РЛС высокого разрешения и обладающие всеми отмеченными ранее преимуществами, могут использоваться в районах, где отсутствуют оборудованные площадки, специальные взлетно-посадочные полосы, решая, наряду с задачами мониторинга, задачи доставки людей и грузов. Вертолетные системы мониторинга Земли должны ориентироваться на широкий круг потребителей, работающих в различных областях, обеспечивая решение широкого круга задач в интересах экологии, землепользования, наблюдения различных природных и техногенных объектов, проведения поисково-спасательных работ, предотвращения и устранения последствий природных и техногенных катастроф, а также для обеспечения безопасности полета.

Высокое разрешение в радиолокационных системах мониторинга, как известно, достигается по дальности за счет использования сложных видов зондирующих сигналов, а по азимуту – за счет использования принципов синтеза апертуры антенны. В этой связи, исследования, проводимые в работе и касающиеся вопросов обработки траекторного сигнала, формируемого в процессе синтеза апертуры при учете поступательного движения носителя и вращательного движения лопастной структуры с расположенным на ней ФЦ реальной антенны, являются актуальными.

Цель и задачи работы

К сегодняшнему дню достаточно подробно рассмотрены вопросы использования сложных зондирующих сигналов в целях повышения разрешающей способности РЛС. Повышение разрешающей способности РЛС по азимуту за счет принципов синтеза апертуры достаточно подробно изложено во многих научных источниках. В то же время, в них рассматриваются принципы синтеза апертуры, основанные на учете поступательного движения фазового центра (ФЦ) антенны (ФЦА). Однако, при построении вертолетных РЛ систем

мониторинга возможно *использование естественного вращения* лопастной структуры носителя для решения задач синтезирования апертуры, что отмечается в научной литературе последнего времени. Тем не менее, не исследованы особенности синтезирования при комбинированном – вращательно-поступательном движении ФЦА.

В этой связи, **целью диссертационной работы** является разработка алгоритмов обработки радиолокационных сигналов для бортовой радиолокационной системы, функционирующей в режиме синтезирования апертуры антенны при учете совместного прямолинейного и вращательного перемещения ФЦА. Согласно заявленной цели работы определены основные задачи исследований:

- синтез оптимальных и квазиоптимальных алгоритмов обработки траекторных сигналов, формируемых в режиме синтезирования апертуры антенны при комбинированном перемещении ФЦА;
- оценка эффективности синтезированных алгоритмов обработки траекторного сигнала;
- анализ влияния характерных участков комбинированной траектории перемещения на качество формируемого радиолокационного изображения (РЛИ) объекта наблюдения;
- разработка математической модели системы обработки радиолокационных сигналов бортовой РЛС в режиме синтезирования апертуры (СА) при учете комбинированного перемещения ФЦА.

Новизна работы определяется следующим:

- **проведен** анализ существующих методов и алгоритмов обработки сигналов в бортовой РЛС, обеспечивающих повышение ее разрешающей способности при решении различного рода задач радиолокации; в том числе, в процессе дистанционного обзора и мониторинга земной поверхности;
- **разработан** алгоритм обработки траекторного сигнала в процессе прямого синтеза апертуры антенны при учете совместного прямолинейно-вращательного перемещения ФЦА;
- **проведена** оценка эффективности разработанных алгоритмов обработки траекторного сигнала при варьировании параметров вращательной структуры и системы обработки;
- **разработана** имитационная модель системы обработки траекторного сигнала РЛС в режиме синтезирования апертуры при учете совместного перемещения ФЦА,

обеспечивающая формирование радиолокационного изображения подстилающей поверхности при различных режимах обзора и вариантах движения носителя БРЛС, а также оценивание качественных параметров получаемого изображения.

Положения, выносимые на защиту

Основными результатами научных исследований и анализа, выносимыми на защиту являются следующие:

1. Движение фазового центра антенны по сложной траектории, включающей одновременно прямолинейное и вращательное его перемещение, приводит к сложному закону частотной модуляции траекторного сигнала, формируемого в процессе прямого синтеза апертуры антенны, которая содержит линейную и нелинейную составляющие изменения мгновенного значения его частоты.

2. Показано, что траекторный сигнал с комбинированной частотной модуляцией позволяет получить более высокое разрешение по азимуту при фиксированном времени синтезирования по сравнению с траекторным сигналом, у которого частота меняется по линейному закону вследствие прямолинейного перемещения фазового центра реальной антенны.

3. Вклад вращательной компоненты в приращение синтезированной апертуры при комбинированной траектории перемещения фазового центра антенны наиболее существенен при небольших временах когерентного накопления траекторного сигнала, измеряемых в периодах вращения лопастной структуры.

4. Фрагменты траектории, вносящие вклад в приращение синтезируемой апертуры, образуют эффективную синтезированную апертуру, определяющую основные показатели разрешающей способности РСА по азимутальной координате.

5. Прямой синтез апертуры при комбинированной траектории перемещения фазового центра антенны позволяет получить радиолокационное изображение объекта наблюдения требуемой детальности в любом угловом направлении зондирования, за время, меньшее, чем требуется при формировании искусственной апертуры за счет только прямолинейного перемещения фазового центра реальной антенны.

Достоверность представленных в работе результатов обусловлена корректным использованием математического аппарата синтеза радиолокационных систем, статистических методов оценки эффективности предлагаемых алгоритмов обработки, современных инструментальных средств научных исследований и математического моделирования, а также

совпадением теоретических выводов и результатов оценки эффективности предложенных решений.

Практическая значимость работы

Разработанные в работе алгоритмы обработки траекторного сигнала при синтезе апертуры в условиях комбинированного движения ФЦА могут быть использованы при практической реализации систем радиолокационного мониторинга, располагаемых на носителях вертолетного типа, а разработанная имитационная модель на базе среды математического моделирования MATLAB позволяет проводить отладку алгоритмов обработки траекторного сигнала на ранних этапах проектирования таких систем.

Реализация результатов исследований

Результаты работы использованы при проведении совместных научных исследований с предприятиями промышленности, а также в учебном процессе на факультете радиоэлектроники летательных аппаратов МАИ, что подтверждается актами внедрения.

Апробация работы

Основные результаты проведенной работы представлены в 8 печатных трудах, в том числе в 3-х статьях научных журналов, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ для опубликования результатов соискателям кандидатских и докторских степеней, и докладывались автором на 5-ти конференциях, в том числе 1 всероссийской.

Структура работы

Структурно диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, библиографического списка из 41 наименования и одного приложения на 7 листах. Диссертация изложена на 184 листах, содержит 74 рисунка и 11 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы приведен краткий обзор научной литературы по данной тематике, обоснована актуальность темы исследований, сформированы цели и задачи исследований, приведены основные положения, выносимые на защиту, а также кратко представлена структура работы.

В первом разделе проведен анализ систем мониторинга земной поверхности и природной среды. Приведено понятие систем мониторинга, основные его направления,

включающие глобальный биосферный, региональный геосистемный, локальный биоэкологический мониторинг. Указаны основные области применения систем мониторинга.

Приведено описание актуальных на сегодняшний день требований, предъявляемых к данным системам, в аспекте их интерфейса, формата передачи данных и выходной информации, точности привязки, а также в части характеристик, входящих в эти системы изделий.

Анализ бортовых систем мониторинга земной поверхности и природной среды разных поколений, размещаемых на отечественных и иностранных авианосителях, разработанных как в прошедшие десятилетия, так и современных, показал необходимость использования бортовых радиолокационных комплексов в качестве доминирующих систем наряду с другими в ходе решения задач дистанционного обзора и аэромониторинга земной поверхности. Приведены также основные направления и тенденции развития систем дистанционного РЛ мониторинга, обоснованы преимущества систем мониторинга, реализованных на основе РЛС с синтезированной апертурой антенны.

Рассмотрены особенности процесса формирования искусственной апертуры при прямолинейном перемещении носителя и обоснована необходимость использования РСА при комбинированном прямолинейно-вращательном перемещении фазового центра реальной антенны для носителей вертолетного типа.

Проведена формулировка научной задачи и определены основные направления исследований.

Во втором разделе проводится анализ особенностей формирования траекторного сигнала в процессе синтеза апертуры антенны при учете совместного прямолинейного и вращательного перемещения фазового центра (рис. 1) реальной антенны и проводится анализ его функции неопределенности.

Информационной частью траекторного сигнала (сигнала, отраженного от цели и воспринимаемого антенной) является его *комплексная огибающая*:

$$S^*(t) = UG(t)e^{(-i\varphi_{полн}(t))} = UG(t)e^{(-i(\frac{4\pi}{\lambda}D_{\Sigma}(t)-\varphi_0))}, \quad (1)$$

где U - случайная амплитуда сигнала, $G(t)$ - функция, описывающая модуляцию сигнала ДН реальной антенны (полагается, что $G(t) \equiv 1$), $\varphi_{полн}(t)$ - полная фаза комплексной огибающей траекторного сигнала, λ - длина волны зондирующего колебания, $D_{\Sigma}(t)$ - расстояние между ФЦ антенны и ТЦ в момент времени t , φ_0 - случайная начальная фаза траекторного сигнала.

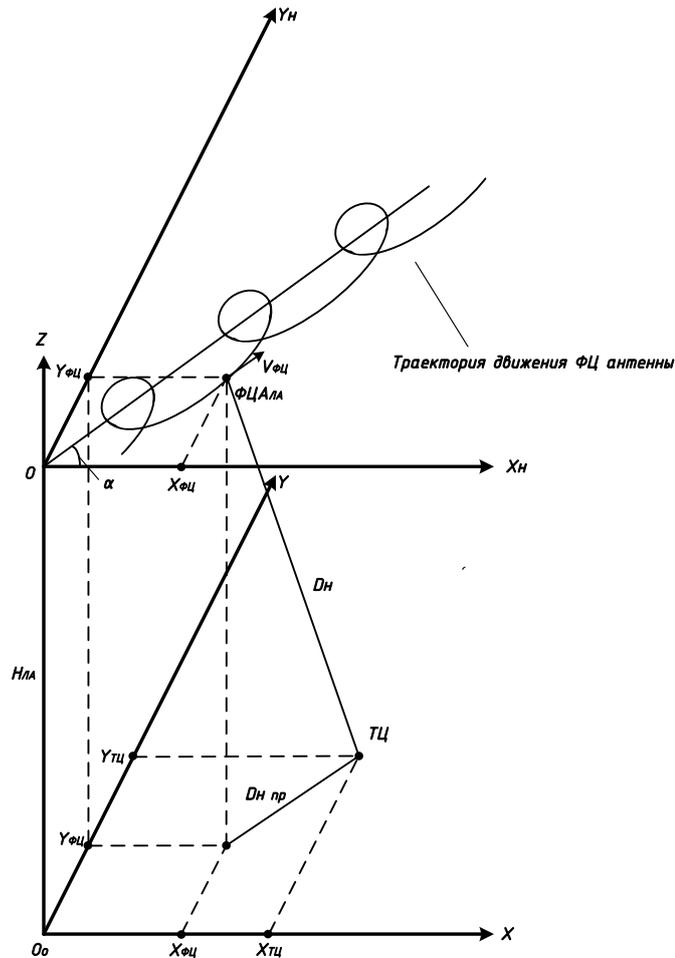


Рис. 1. Взаимное положение ФЦА и ТЦ в процессе синтезирования апертуры

Дальность до цели в каждый момент времени вычисляется, как кратчайшее расстояние между двумя точками в трехкоординатном пространстве, определяется как:

$$D_{\Sigma}(t) = \sqrt{(x_{\text{ФЦ}}(t) - x_u)^2 + (y_{\text{ФЦ}}(t) - y_u)^2 + z(t)^2}, \quad (2)$$

где $x_u, y_u = \text{const}$ – координаты объекта зондирования (точечной неподвижной цели), $z_u = h = \text{const}$ – высота носителя над землей. Предполагается, что координаты начала траектории ФЦ x_0, y_0 известны. При этом с учетом комбинированного движения текущие координаты ФЦ будут изменяться по следующему закону:

$$x_{\text{ФЦ}}(t) = x_0 + x_{\text{пр}}(t) + x_{\text{ер}}(t), \quad (3)$$

$$y_{\text{ФЦ}}(t) = y_0 + y_{\text{пр}}(t) + y_{\text{ер}}(t). \quad (4)$$

Характер изменения величины $D_{\Sigma}(t)$ показан на рис. 2 для двух различных интервалов наблюдения.

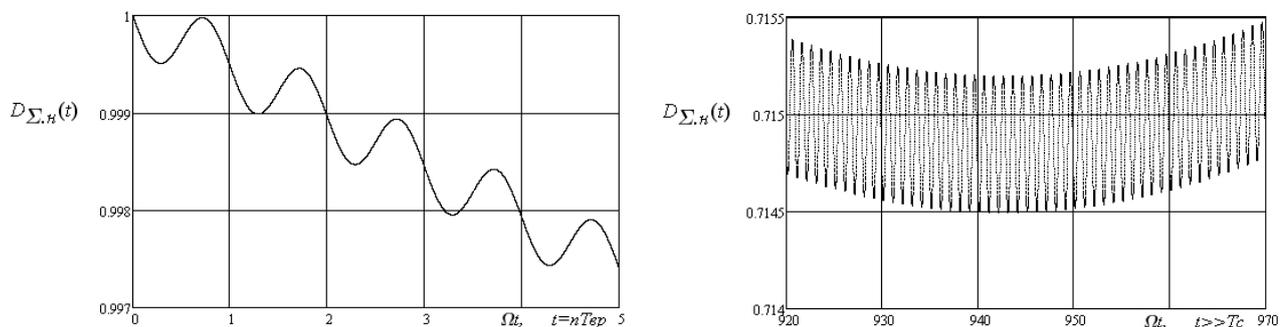


Рис. 2. Изменение мгновенного значения дальности до наблюдаемой цели от времени

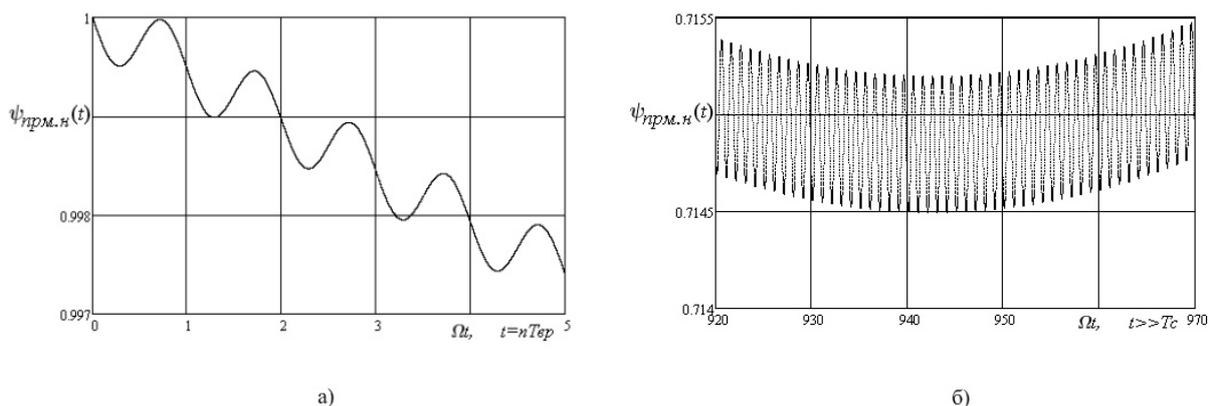
Считая сигнал, излучаемый РЛС, монохроматическим, изменение фазы траекторного сигнала на интервале синтезирования при комбинированной траектории перемещения ФЦА можно представить в виде:

$$\varphi_{нрм}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} D_{\Sigma}(t) = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(x_{\phiЦ}(t) - x_u)^2 + (y_{\phiЦ}(t) - y_u)^2 + z(t)^2}, \quad (5)$$

Представленная зависимость довольно точно описывает текущую фазу ТС. Известно, что частота приходящего сигнала является производной функцией от полной фазы, поэтому выражению (5) можно поставить в соответствие выражение, определяющее изменение частоты траекторного сигнала (ТС) на интервале синтезирования, имеющее вид:

$$f_{нрм}(t) = \frac{\partial \varphi_{нрм}(t)}{\partial t} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial D_{\Sigma}(t)}{\partial t} = \frac{4\pi}{\lambda} V_{сбл}(t), \quad (6)$$

Изменение данных параметров во времени приведено на рис. 3.



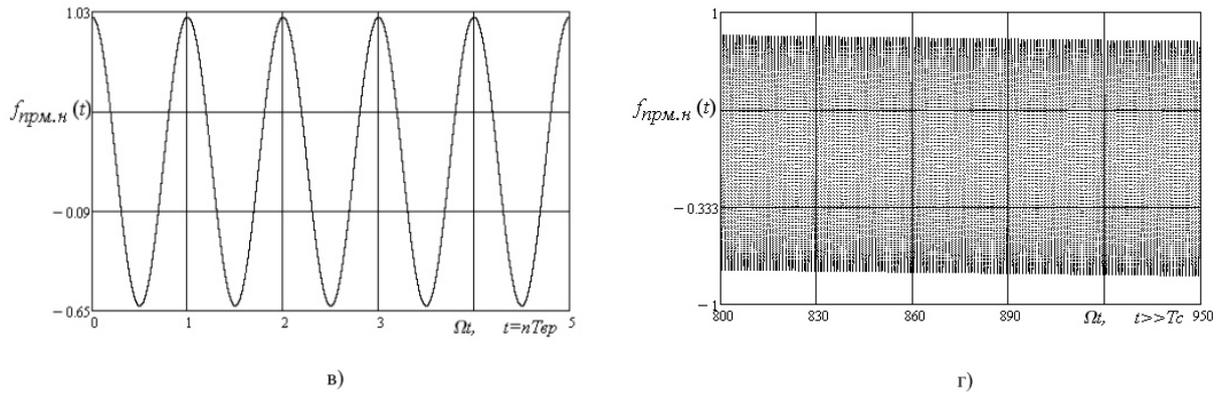


Рис. 3. Зависимость фазы (а), б)) и частоты (в, г)) траекторного сигнала от времени

Выявленные особенности комплексной огибающей ТС позволили сделать вывод о сложном законе частотной модуляции сигнала и провести анализ его функции неопределенности (ФН).

Таким образом, при оптимальной обработке ТС, формируемого в процессе синтезирования, опорная функция должна учитывать как линейное изменение частоты вследствие поступательного движения носителя, так и нелинейное, обусловленное вращением лопастной структуры. При наблюдении за одиночным неподвижным точечным объектом зондирования алгоритм оптимальной обработки ТС будет иметь вид.

$$\dot{U}_{вых} = \int_0^T \dot{Y}(t, \alpha) \cdot \dot{S}_o^*(t, \alpha_o) dt, \tag{7}$$

где $\dot{Y}(t, \alpha) = \dot{S}(t, \alpha) + N(t)$ – аддитивная смесь полезного траекторного сигнала и шумов наблюдения (внутренний шум ПРМ РЛС); $\dot{S}_o^*(t, \alpha_o)$ – эталонный сигнал с точностью до постоянного множителя совпадающий с полезным; α, α_o – векторы параметров текущего и опорного сигналов, соответственно; T – интервал синтезирования.

Для получения на базе алгоритма (7) РЛИ подстилающей поверхности необходимо в (7) ввести операцию взятия модуля. В результате структурную схему оптимальной системы обработки траекторного сигнала с целью получения РЛИ можно представить в виде, изображенном на рис. 4. Если выходной отклик $U_{вых}$ данной системы рассматривать при различных вариациях параметров опорного сигнала $S_o(t, \alpha_o)$ по отношению к параметрам траекторного сигнала, действующего в текущий момент времени, и считать, что

$\dot{Y}(t, \alpha) = S(t, \alpha)$, то выходной сигнал системы обработки представляет собой не что иное, как функцию неопределенности (ФН) траекторного сигнала, которая будет иметь вид:

$$U_{\text{вых}}(dx, dy) = \int_0^{T_c} S(t) \cdot S(t, dx, dy) dt, \quad (8)$$

где $S(t, dx, dy) = Ue^{-i(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{(x_{\text{ФЦ}}(t) - x_{\text{Ц}} - dx)^2 + (y_{\text{ФЦ}}(t) - y_{\text{Ц}} - dy)^2 + z(t)^2})}$ - опорный сигнал устройства оптимальной обработки, dx, dy - координаты соседней точки пространства, T_c - период синтезирования. Диаграмма неопределенности и ФН сложного частотно-модулированного сигнала приведены на рис. 5.

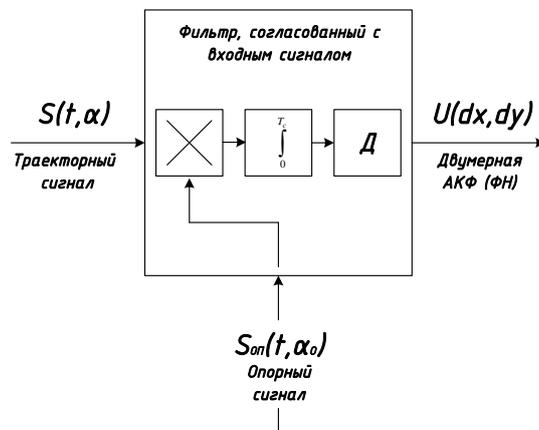


Рис. 4. Структурная схема оптимальной системы обработки

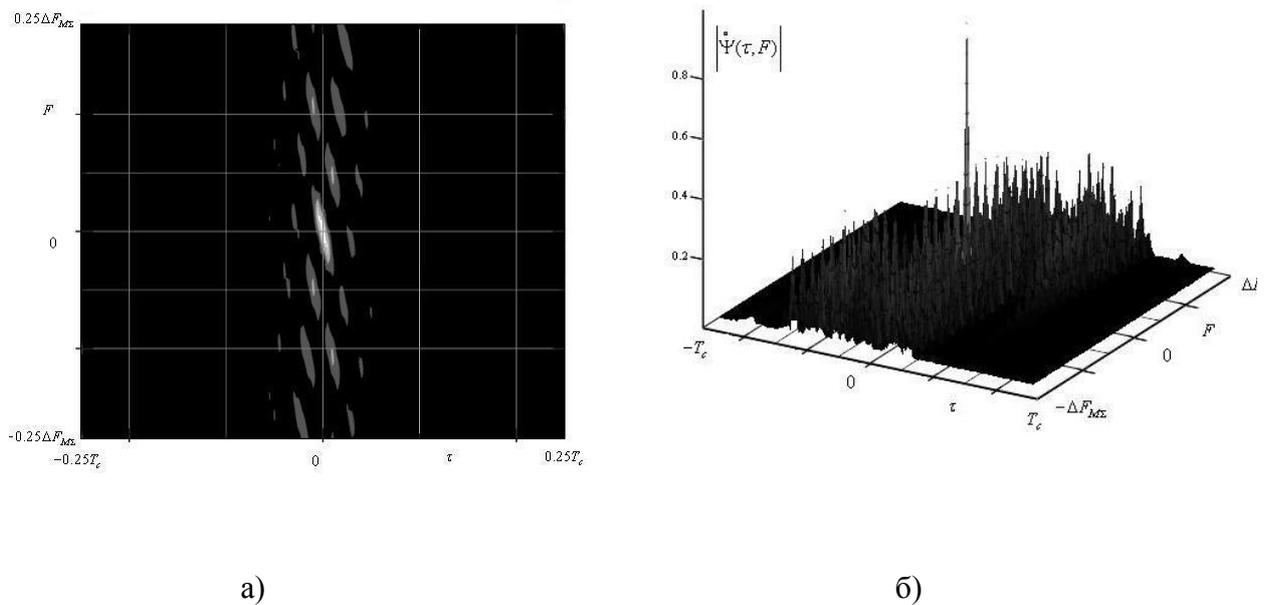


Рис. 5. Диаграмма неопределенности (а) и тело неопределенности КЧМ сигнала (б)

В данном разделе проведен анализ влияния параметров перемещения ФЦА на характеристики частотной модуляции формируемого траекторного сигнала, выходной отклик оптимальной системы обработки и уровень БЛ результата оптимальной обработки ТС от одиночной ТЦ.

Проведенное моделирование системы обработки показало преимущество комбинированного способа движения ФЦА перед просто прямолинейным движением. Так, например, в течение одного периода вращающейся структуры формируется апертура, позволяющая разрешать наземные объекты зондирования с линейными размерами 3-5 м. Помимо этого, за счет вращательной составляющей комбинированного движения ФЦА обеспечивается разрешение целей при движении носителя строго в направлении цели, что принципиально не достижимо в случае прямолинейной траектории.

Сравнительный анализ вращательного и комбинированного движения ФЦА показал, что разрешение РСА, достигаемое за счет вращательного движения ФЦА зависит только от радиуса вращения последнего. На контрастность РЛИ сильное влияние оказывает высокий уровень БЛ выходного сигнала системы обработки. При комбинированном же движении ФЦА в процессе синтезирования за счет снижения уровня БЛ повышается контрастность РЛИ и, кроме того, появляется возможность повысить разрешающую способность за счет увеличения времени накопления.

В третьем разделе проводится анализ зависимости выходного отклика системы обработки при синтезировании апертуры антенны от составляющих комбинированной частотной модуляции траекторного сигнала, обусловленных прямолинейным и вращательным перемещением ФЦА, анализируется влияние на процесс синтеза апертуры различных вариантов перемещения носителя;

Для этого рассматривается вклад различных участков комбинированной траектории перемещения ФЦА в формирование апертуры. Выделена часть данной траектории, определяющая наилучшее разрешение в течение одного периода вращающейся структуры, и в тоже время не учитывающая негативного влияния петлевых фрагментов траектории на уровень БЛ результата оптимальной обработки ТС, которая названа эффективной апертурой. Показана аналитическая связь между данной частью траектории и параметрами перемещения ФЦА.

Введение данного понятия позволило рассмотреть варианты формирования эквивалентной апертуры антенны в процессе синтезирования при совместном учете поступательно-вращательного перемещения ФЦА и оценить эффективность, которая проводилась с учетом следующих качественных показателей:

$$\xi_1(T_c) = L_{c.2}(T_c) / L_{c.1}(T_c) ; \quad (9)$$

$$\xi_2(T_c) = U_{БЛ.2}(T_c) / U_{БЛ.1}(T_c) ; \quad (10)$$

$$\xi_3(T_c) = \delta l_{аз.2}(T_c) / \delta l_{аз.1}(T_c) , \quad (11)$$

Выражение (9) определяет относительную синтезированную апертуру, выражение (10) – относительный уровень боковых лепестков выходного сигнала оптимальной системы обработки, выражение (11) – относительное линейное азимутальное разрешение. Численные значения данных показателей при различных временах когерентного накопления траекторного сигнала T_c приведены в табл. 1.

Таблица 1

ξ	Качественный параметр ξ_1		Качественный параметр ξ_2		Качественный параметр ξ_3	
	$\xi_{11} =$ $L_{с.комб1} /$ $L_{с.нр}$	$\xi_{12} =$ $L_{с.комб1} /$ $L_{с.вр}$	$\xi_{21} =$ $U_{БЛ.комб1} /$ $U_{БЛ.нр}$	$\xi_{22} =$ $U_{БЛ.комб1} /$ $U_{БЛ.вр}$	$\xi_{31} =$ $\delta l_{аз.комб1} /$ $\delta l_{аз.нр}$	$\xi_{32} =$ $\delta l_{аз.комб1} /$ $\delta l_{аз.вр}$
$\eta_T =$ $= T_n / T_{вр}$						
1.0	2.015	2.232	1.619	0.85	0.496	0.865
2.5	1	3.109	1.19	0.625	1	0.621
5.0	1	5.836	1	0.525	1	0.33

Из табл. 1 видно, что значительный вклад вращательной компоненты перемещения ΔL в величину суммарной формируемой апертуры L_c^* зависит от времени T_c . Чем меньше относительное время η , тем выше показатель ξ_1 (9) и лучше показатель ξ_3 (11). Приращение ΔL , обусловленное вращением, при $T_c > 3T_{вр}$ можно не учитывать. Такая же тенденция изменения и параметра ξ_3 .

Иначе ведет себя показатель ξ_2 . При малых временах накопления уровень боковых лепестков (БЛ) высок – выше, чем при чисто прямолинейном движении. При накоплении сигнала за время $T_c \geq 5T_{вр}$ уровень БЛ снижается и устанавливается соответствующим уровнем, получаемому при только поступательном перемещении ФЦ.

Поэтому, рассматривая комбинированное движение ФЦА и оценивая вклад вращательного движения в L_c^* , можно говорить об эффективной синтезированной апертуре как совокупности дугообразных частей траектории. Причем образование эффективной апертуры возможно, опираясь на два подхода. При первом варианте в состав эффективной траектории

включаются участки дугообразной траектории синтезированной апертуры, образуемые за четверть периода вращения.

Таким образом, синтезируемая апертура будет эквивалентна формируемому раскрыву при движении ФЦА по прямой, проходящей через точки образования петлевой части комбинированной траектории в моменты времени $T = (n + 0.25)T_{ep}$, где n – целое натуральное число.

Процесс накопления траекторного сигнала при реализации данного алгоритма временной обработки, как и прежде когерентен, и запишется следующим образом:

$$U_{\text{вых}\rightarrow\text{эфф}}(dx, dy) = U_{\text{вых}}(dx, dy) - \sum_n \left| \int_{(n+0,25)T_{ep}}^{(n+1)T_{ep}} S(t) \cdot S(t, dx, dy) dt \right|, \quad (12)$$

При втором варианте в состав эффективной траектории включаются все соответствующие дугообразные участки комбинированной траектории (с временными пределами, детально рассмотренными в работе), которые обеспечивают максимальное приращение величины L_c . Время, в течение которого формируется соответствующая дугообразная часть траектории, соответствует $0.6T_{ep}$. При этом процесс синтеза апертуры изменится и станет квазикогерентным, поскольку в этом случае будет необходимо когерентно накапливать траекторный сигнал в течение интервала каждого периода, а затем складывать интервалы, полученные от накопления в каждом периоде.

$$S_{\text{эфф}}(t) = \sum_n S(t), t_2 + nT_{ep} \leq t \leq t_1 + (n+1)T_{ep},$$

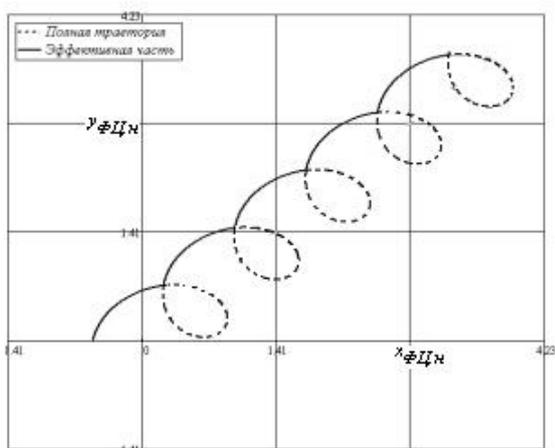
$$U_{\text{вых}\rightarrow\text{эфф}}(dx, dy) = \sum_n \int_{t_2 + nT_{ep}}^{t_1 + (n+1)T_{ep}} S(t) S(t, dx, dy) dt. \quad (13)$$

Результаты моделирования процессов обработки при данных подходах приведены на рис. 6 и 7, где показаны выходные отклики системы обработки траекторного сигнала при комбинированной траектории движения ФЦА с учетом первого (рис. 6) и второго (рис. 7) вариантов формирования эффективной апертуры, соответственно, при различных интервалах когерентной обработки траекторного сигнала.

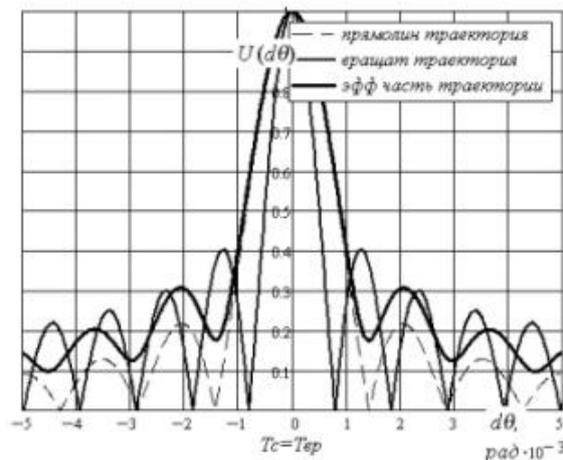
Из представленных результатов видно, что в зависимости от варианта образования эффективной апертуры по-разному изменяется относительный уровень БЛ (показатель ξ_2) и линейное разрешение по азимуту (показатель ξ_3). При втором варианте образования

эффективной апертуры и малом времени когерентного накопления показатель ξ_3 выше, чем при первом.

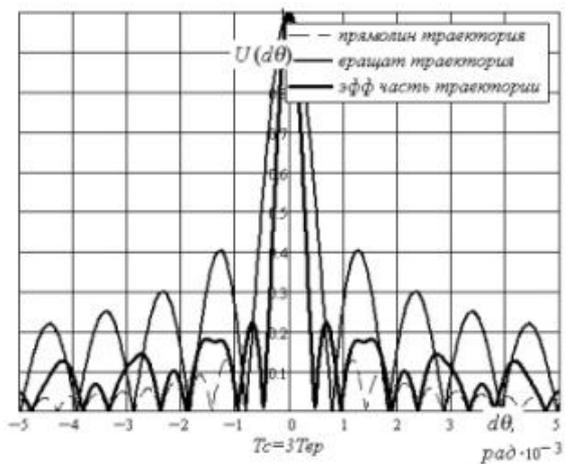
Вне зависимости от того, какой вариант будет использован для формирования эффективной апертуры при комбинированном движении ФЦА, как отмечалось выше, эффект приращения формируемой апертуры будет наблюдаться только при малых временах синтезирования апертуры: $T_c \leq 3T_{ep}$.



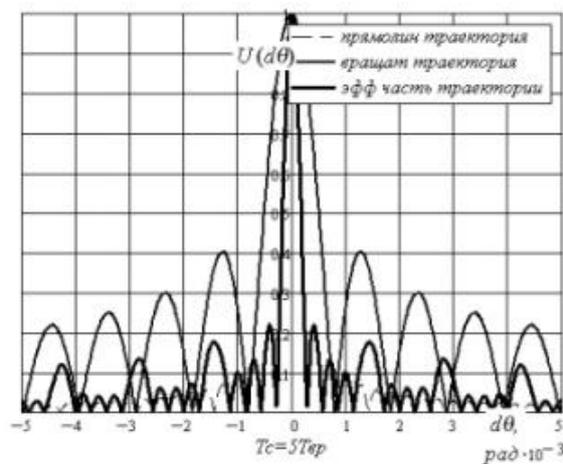
а)



б)

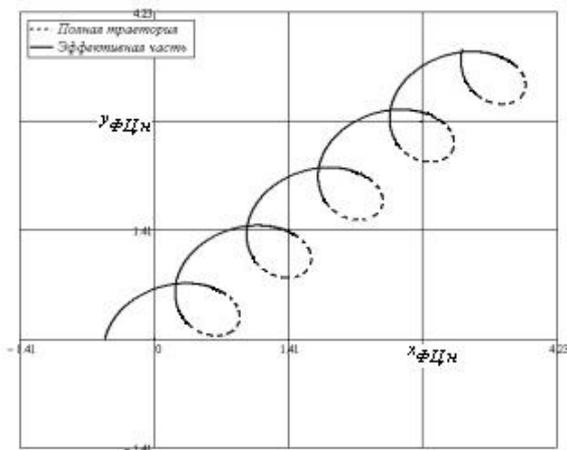


в)

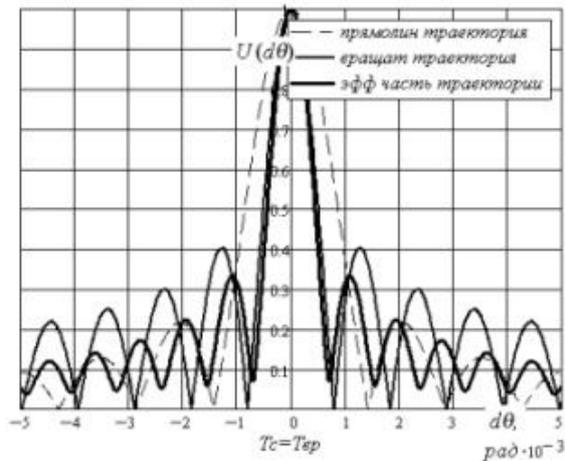


г)

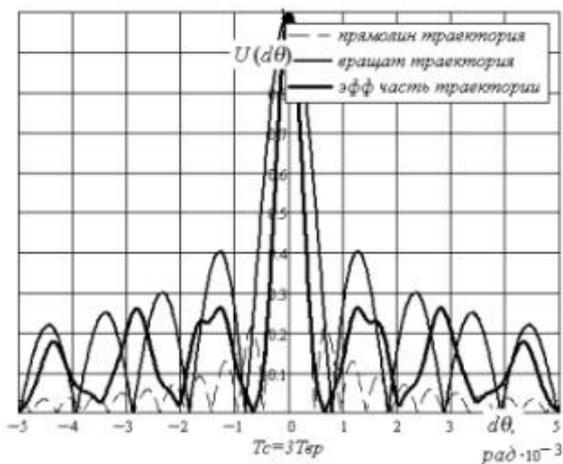
Рис. 6. Сравнительный анализ процесса синтезирования при комбинированной и эффективной траектории движения ФЦА (первый вариант)



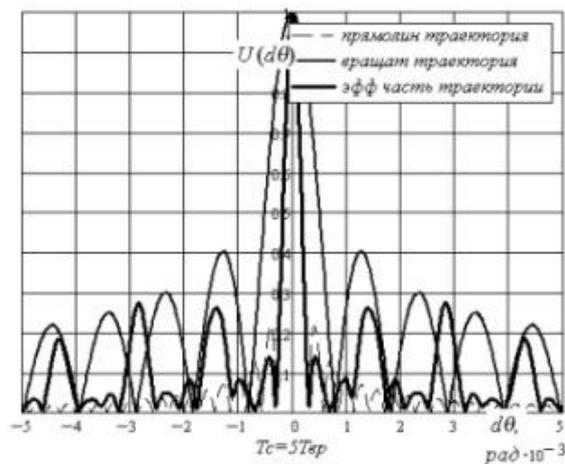
а)



б)



в)



г)

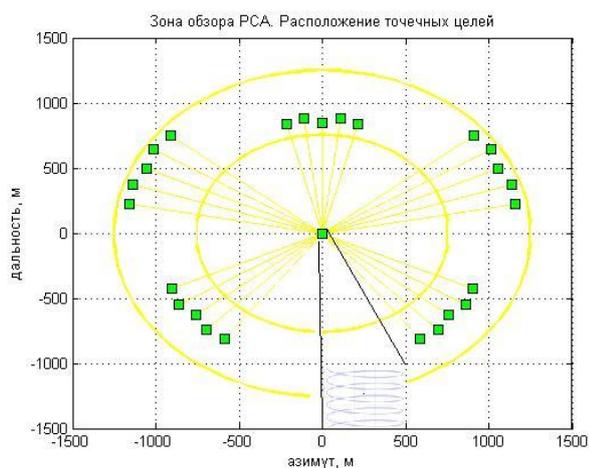
Рис. 7. Сравнительный анализ процесса синтезирования при комбинированной и эффективной траектории движения ФЦА (второй вариант)

В тоже время, необходимо заметить, что все достоинства, связанные с чисто вращательным движением ФЦА, а именно: возможность синтезирования строго впереди носителя РСА, формирование искусственной апертуры в режиме «под собой», синтез апертуры антенны при отсутствии поступательного движения носителя РСА – остаются и при комбинированном перемещении ФЦА.

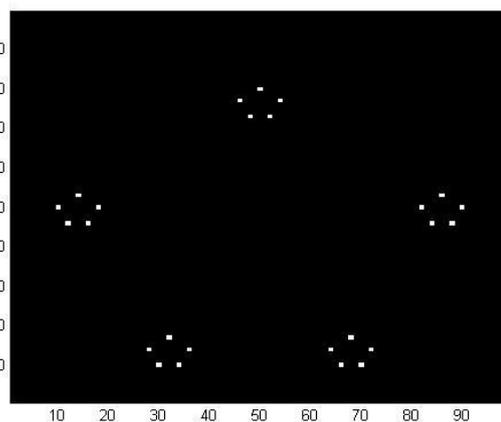
Определено, что конфигурация петлевого фрагмента траектории при комбинированном перемещении ФЦА непосредственно зависит от соотношения между скоростями поступательного и вращательного движений. Чем больше скорость носителя РСА при фиксированной скорости вращения лопастной структуры, тем более вытянутой является траектория ФЦ вдоль линии пути носителя и, соответственно, сжатой его петлевая часть.

Проведенные исследования позволяют определить зависимость потенциального азимутального разрешения от углового положения ТЦ в течение периода вращающейся структуры носителя.

Также в разделе приведен сравнительный анализ различных способов обработки траекторного сигнала, опираясь на гармонический анализ (ГА), прямую и быструю свертку, применительно к формируемому кадру РЛИ, модельного участка поверхности (рис. 8), из которого следует, что наиболее подходящим в данной ситуации является алгоритм прямой свертки.



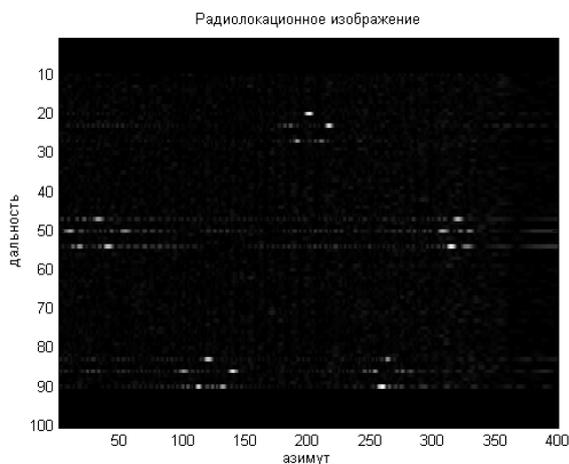
а)



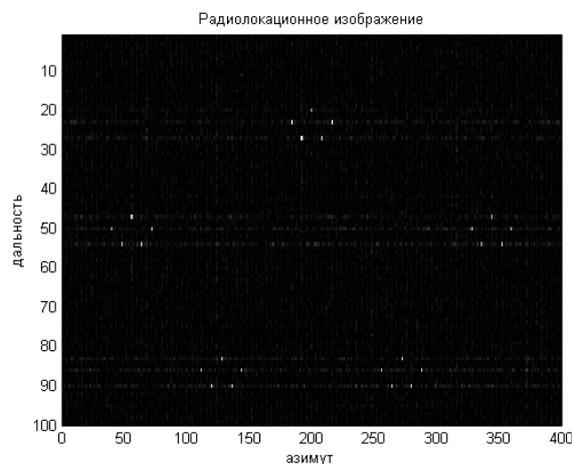
б)

Рис. 8. Взаимное расположение точечных отражателей и ФЦА в процессе его перемещения по комбинированной траектории (а)). Эталонное изображение 25 точечных отражателей (б)).

Результат обработки при использовании данного алгоритма приведен на рис. 9, где также приведено РЛИ модельного участка поверхности, полученное на основе ГА (рис. 9,а).



а)



б)

Рис. 9. Изображение модельного участка поверхности при использовании алгоритмов ГА и ПС

Введение функции углового стробирования в алгоритм обработки ТС позволяет получить РЛ изображение в любом интересующем секторе, иными словами, реализовать формирование изображения при разных углах наблюдения и режимах обзора – круговом, секторном, и пр. На рис. 10. приведен пример РЛИ при наблюдении группы ТЦ в переднебоковом секторе

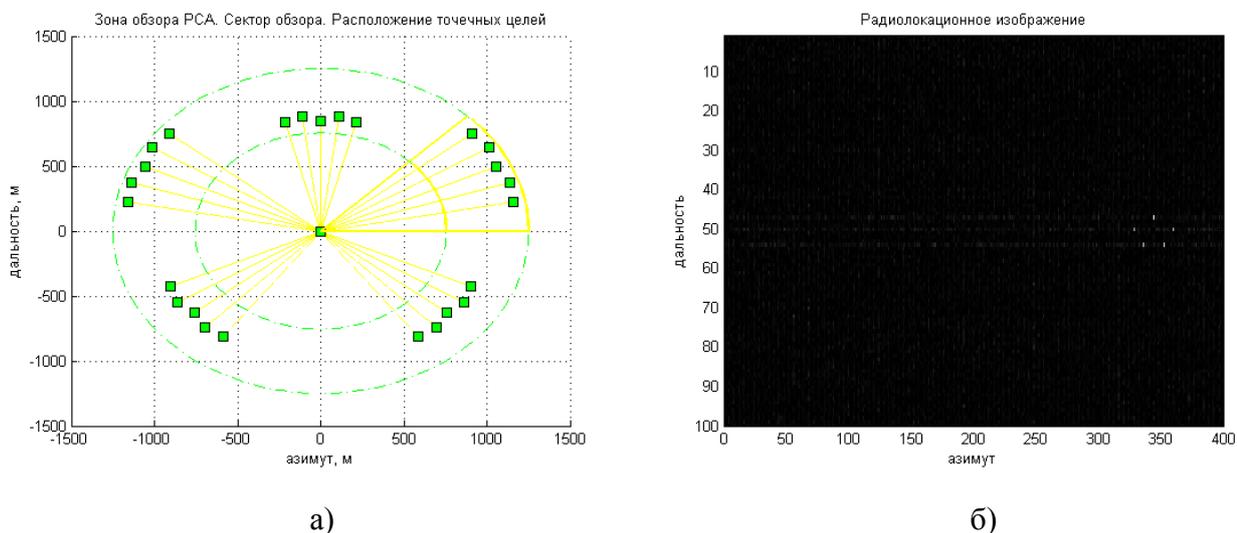


Рис. 10. РЛИ группы ТЦ, расположенных в переднебоковом секторе обзора РСА

Некогерентное накопление кадров при формировании изображения позволяет повысить качество представляемого РЛИ и может быть реализовано в течение времени, соответствующего пяти периодам вращающейся структуры носителя.

В четвертом разделе представлена математическая модель системы обработки траекторного сигнала РЛС (рис. 11) с синтезированием апертуры при комбинированной траектории перемещения ФЦА, а также приведены результаты оценки эффективности разработанных алгоритмов обработки траекторного сигнала. Структура математической модели системы обработки ТС состоит из отдельных модулей-подпрограмм, таких как: модуль ввода исходных данных и параметров модели РСА, модуль формирования траекторного сигнала, модуль обработки ТС, модуль формирования РЛИ и вывода результатов моделирования.

Каждый из модулей представленной структуры системы обработки ТС подробно описан в разделе работы. Формирование имитационной модели системы обработки выполнено с использованием современных инструментальных средств исследования и реализовано в математической среде моделирования MATLAB.

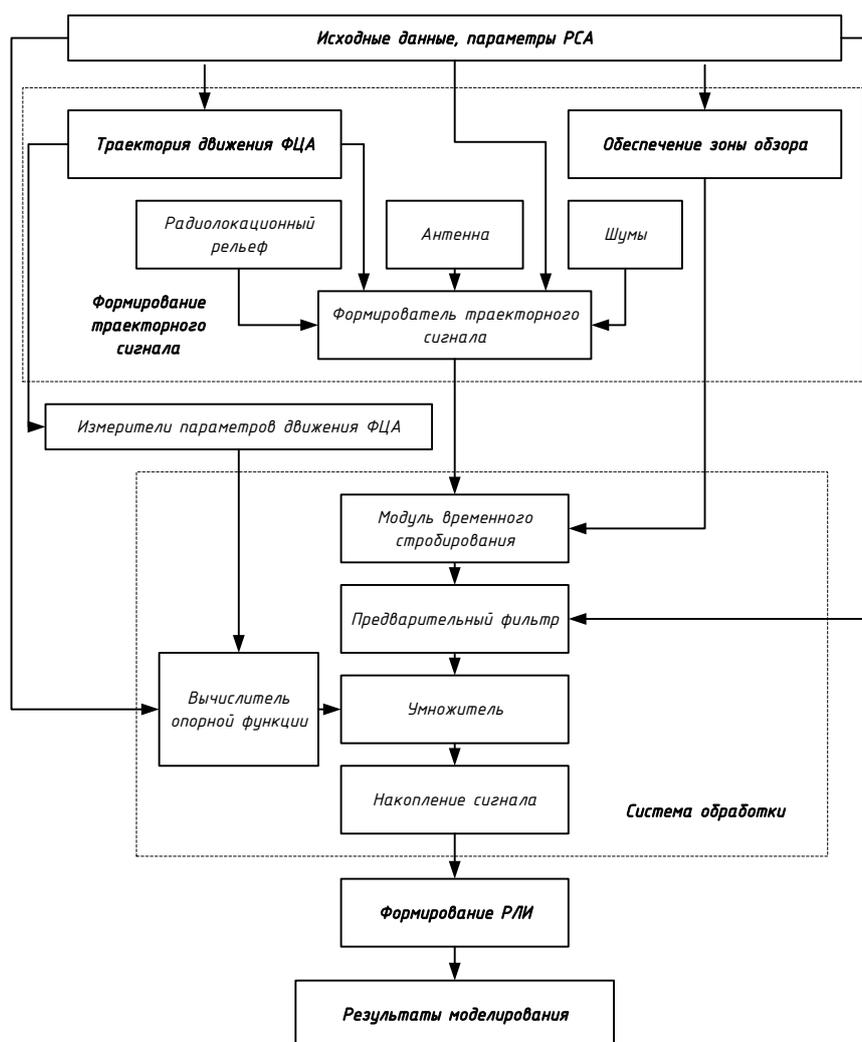


Рис. 11. Структура математической модели РСА

Рассмотрены актуальные вопросы построения бортовых РЛС для вертолетных носителей. Представлены предложения по техническому облику бортовой РЛС с СА, работающей в режиме синтезирования при учете совместного поступательно-вращательного перемещения ФЦА. В качестве основного режима работы предлагается картографирование заданного участка местности. При этом возможны варианты обзора, среди которых можно выделить секторный, всеракурсный, обзор «под собой» и телескопический. По окончании раздела внимание акцентируется на требованиях к тактико-техническим характеристикам данных РЛС.

В заключении приведены основные итоговые результаты проведенных научных исследований. В нем изложены основные выводы по данным исследованиям. В конце рукописи представлен список литературы, используемой при подготовке материалов настоящей работы. В приложении к работе представлен код математической модели РСА в программной среде Mathworks MATLAB R2012a.

Основные результаты и выводы

1. Повышение информационных возможностей бортового комплекса мониторинга вертолетного носителя на базе РЛС может быть обеспечено за счет формирования виртуальной апертуры антенны в процессе когерентной обработки траекторного сигнала, получаемого при совместном поступательно-вращательном перемещении фазового центра реальной антенны, устанавливаемой в законцовке лопасти вращающейся структуры носителя.

2. Показано, что траекторный сигнал, формируемый в процессе синтеза апертуры при комбинированном перемещении ФЦА, имеет сложный закон частотной модуляции, включающий в себя как линейную, так и нелинейную составляющую изменения частоты. За счет варьирования параметров комбинированной частотной модуляции траекторного сигнала можно обеспечить высокое линейное разрешение по азимуту и необходимую контрастность РЛИ наблюдаемого объекта.

3. В результате исследований установлено, что вклад вращательной компоненты в повышение линейного разрешения по азимуту за счет приращения синтезированной апертуры при комбинированной траектории движения ФЦ реальной антенны наблюдается при временах синтеза, не превосходящих пяти периодов вращения. При больших временах синтеза линейное разрешение по азимуту определяется главным образом апертурой, формируемой за счет поступательного движения носителя.

4. Синтезирование апертуры антенны при учете поступательного и вращательного движения ФЦА позволяет обеспечить высокое линейное разрешение по азимуту строго по курсу носителя, которое тем выше, чем больше отношение радиуса вращающейся структуры к раскрытию реальной антенны. При реальных на практике величинах данного отношения повышение разрешения может составлять 5...7 раз. При этом, за счет только вращательной компоненты движения ФЦА можно при комбинированной траектории его перемещения сформировать РЛИ наблюдаемого объекта за время синтеза, соответствующее одному периоду вращения, в любом направлении относительно линии пути носителя РСА.

5. Проведенный анализ показал, что основной вклад в процесс формирования искусственной апертуры при комбинированной траектории перемещения ФЦА вносят фрагменты траектории, по которым ФЦ перемещается сонаправленно поступательному движению носителя РСА. Рассчитанная протяженность данных участков, выраженная в периодах вращения лопастной структуры носителя, составляет от $0,25T_{вр}$ до $0,6T_{вр}$ и зависит от параметров перемещения и условий наблюдения.

6. Показано, что применение углового стробирования при синтезировании апертуры с учетом комбинированного перемещения ФЦА позволяет сформировать РЛИ наблюдаемой

поверхности в любом наперед заданном секторе относительно линии пути носителя вертолетного типа, в том числе, переднем секторе, меньшем ± 10 градусов, что неприемлемо при движении ФЦА по прямолинейной траектории. Таким образом, возможными способами обзора земной поверхности являются круговой (всеракурсный), секторный, «под собой», телескопический и обзор по линии пути.

7. Из результатов исследований следует, что некогерентное накопление кадров РЛИ наблюдаемой поверхности, обеспечивающее повышение качества формируемого изображения за счет снижения спекл-эффектов, может быть выполнено в течение времени, равного 3...5 периодам вращения лопастной структуры носителя вертолетного типа.

8. Разработанная имитационная модель системы обработки траекторного сигнала на основе современных сред математического моделирования MathWorks MATLAB, PTC MathCAD позволяет проводить оценку эффективности разработанных алгоритмов обработки траекторного сигнала, формируемого в процессе синтеза апертуры при учете комбинированного перемещения ФЦА.

Список публикаций по теме работы

Список опубликованных статей

1. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В. Синтезирование апертуры антенны при учете поступательного и вращательного движения фазового центра антенны //Антенны, 2010, № 9 (160), с. 15-23.
2. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В. Эффективная синтезированная апертура антенны при комбинированной траектории движения фазового центра //Информационно – измерительные и управляющие системы, 2012, № 4, с. 22.
3. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В. Функция неопределенности сигнала с комбинированной частотной модуляцией //Информационно измерительные и управляющие системы, 2012, № 10, с. 12.

Список опубликованных докладов

1. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В. Разработка и исследование алгоритмов обработки сигналов в режиме синтезирования апертуры антенны при поступательном и вращательном движении фазового центра реальной антенны // Сборник тезисов конференции «Инновации в авиации и космонавтике 2010», 2010, с. 80.
2. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В. Эффективная синтезированная апертура антенны при комбинированной траектории движения фазового центра // Сборник тезисов докладов конференции «Инновации в авиации и космонавтике 2011», 2011, с. 57.

3. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В. Анализ функции неопределенности сигнала с комбинированной частотной модуляцией // Сборник тезисов докладов конференции «Инновации в авиации и космонавтике 2012», 2012, с. 104.

4. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В., Ясенцев Д.А. Синтезирование апертуры антенны при совместном учете прямолинейного и вращательного движений фазового центра реальной антенны // Сборник докладов шестой всероссийской конференции «Радиолокация и Радиосвязь», 2012, с. 124.

5. Татарский Б.Г., Майстренко Е.В., Ясенцев Д.А. Анализ качественных параметров радиолокационного изображения в режиме синтезирования апертуры антенны при комбинированном перемещении ФЦА // Сборник тезисов докладов конференции «Инновации в авиации и космонавтике 2013», 2013, с. 244.