На правах рукописи

УДК 621.396

Юкин Сергей Александрович

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ МАЛОВЫСОТНОМ ПОЛЁТЕ

05.12.04 «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»,

05.12.14 «Радиолокация и радионавигация»

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2010

Работа выполнена на кафедре радиотехнических систем
ГОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент Андреев Владимир Григорьевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Клочко Владимир Константинович
	кандидат технических наук, доцент Филатов Александр Дмитриевич
Ведущая организация:	ФГУП «Государственный рязанский приборный завод», г. Рязань

Защита состоится «14» мая 2010 г. в 13 ч 00 мин на заседании диссертационного совета Д212.211.04 в Рязанском государственном радиотехническом университете по адресу: 390005, г.Рязань, ул.Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГРТУ

Автореферат разослан "___" апреля 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд.техн.наук, доцент  А.Г. Борисов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Обнаружение движущихся целей на фоне пассивных помех является одной из важнейших задач радиолокационных станций (РЛС) различного назначения. Проведенный анализ современных источников по теме диссертационной работы показал, что активно ведутся исследования, направленные на повышение эффективности систем селекции движущихся целей (СДЦ) при обнаружении малоподвижных целей на фоне отражений от подстилающей поверхности, особенно при маловысотном полете носителя РЛС. Интенсивное развитие алгоритмов коррекции инерциальных систем навигации по полю радиолокационного контраста повышает требования к априорной информации по маршруту полета, а также методам моделирования и обработки радиолокационных изображений (РЛИ) местности. Формирование РЛИ при маловысотном полете сопряжено с рядом трудностей, связанных, в частности, с искажениями отображаемой информации, вызванными высокой интенсивностью отражений по боковым лепесткам (БЛ) диаграммы направленности антенны (ДНА). Поэтому разработка алгоритмов пространственно-доплеровской обработки радиолокационной информации и устройств СДЦ для бортовых РЛС (БРЛС) в режиме воздух–поверхность, является современной и актуальной задачей, имеющей существенное научно-практическое значение.

Цели и задачи диссертации

Цель работы – разработка средств повышения эффективности функционирования БРЛС в режиме воздух–поверхность при маловысотном полете носителя РЛС.

Для достижения поставленных целей в работе решены следующие основные задачи:

– разработка и обоснование процедуры формирования РЛИ по маршруту полета на основе данных электронных карт геоинформационных систем (ГИС);

– синтез и анализ алгоритма построения радиолокационных теней для повышения адекватности моделируемых РЛИ в условиях изменяющейся геометрии области тени при маловысотном полете носителя РЛС (полет над сильно пересеченной или горной местностью, зонами городской застройки и т.д.);

– разработка и анализ процедур построения моделирующих фильтров по оценкам спектров мощности радиоотражений (спектрально-дальностным портретам) для имитации воздействия различных видов шумов (собственные шумы приемника РЛС, спекл шумов и т.д.), характерных для практической работы РЛС;

– разработка метода формирования РЛИ подстилающей поверхности, полученного с помощью бортовых радиолокационных систем, рабо-

тающих в режиме доплеровского обужения луча, в передней полусфере при маловысотном полете, и осуществляющего коррекцию искажений, обусловленных отражениями в пределах одной изодопы по БЛ ДНА, форма которых априорно неизвестна;

– проведение анализа эффективности предложенного метода коррекции, а также с дополнительной весовой обработкой спектральных компонент, для сравнения по точности отображаемой информации с известными алгоритмами формирования РЛИ в передней полусфере;

– синтез и обоснование предложенного подхода обнаружения малоподвижных наземных целей путем биспектрального анализа спектра мощности отражений от подстилающей поверхности в когерентно-импульсной БРЛС для выделения сигнала от движущейся цели на фоне отражений по главному лепестку (ГЛ) ДНА;

– разработка метода повышения точности оценки угловых координат и скорости наземных малоподвижных целей посредством восстановления границ затенений в спектре отражений и последующей обработки спектрально-дальностного портрета (СДП) радиоотражений на основе алгоритмов фоновой локации.

Методы исследования основаны на статистической радиотехнике, математической статистике, матричном исчислении, параметрическом моделировании случайных процессов, а также геометрических построениях для формирования радиолокационных отражений от различных сред и поверхностей при изменении условий наблюдений. Теоретические методы сочетались с экспериментальными исследованиями, проведенными путем имитационного моделирования и натурных испытаний.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Инвариантная к ракурсу наблюдения методика моделирования радиолокационных сцен по маршруту полёта, основанная на триангуляционной аппроксимации подстилающей поверхности, заданной формируемой гибридной картой, и на разработанной процедуре формирования теней, для различных режимов работы БРЛС в передней полусфере.
2. Процедура коррекции РЛИ, формируемого бортовыми радиолокационными системами с доплеровским обужением луча, в передней полусфере при маловысотном полете, позволяющая достичь выигрыша (в точности отображения радиолокационной сцены) до 6...13,67 дБ (в зависимости от конкретной радиолокационной сцены и параметров БРЛС) в сравнении с классическим методом доплеровского обужения, путём размещения на борту дополнительной всенаправленной антенны для формирования вспомогательного приёмного канала и использования получаемой от него информации для компенсации влияния паразитных изодопных составляющих.
3. Алгоритм выделения малоподвижных наземных объектов, сигналы от которых попадают в доплеровские каналы, соответствующие области

интенсивных отражений от подстилающей поверхности по главному лучу диаграммы направленности антенны, позволяющий увеличить на 3...7 дБ отношение мощностей сигнал-(помеха+шум) по сравнению с оптимизированным режекторным фильтром. Выигрыш достигается за счет более детального анализа спектра отражений от подстилающей поверхности с учетом динамики изменений спектральных компонент вдоль линии визирования.

Научное и практическое значение

В рамках данной диссертационной работы получены следующие новые научные результаты:

- разработан алгоритм модельного формирования РЛИ по маршруту полета летательного аппарата (ЛА) на основе данных карт ГИС о рельефе местности и видов материалов поверхности;
- разработан метод коррекции искажений радиолокационного изображения, формируемого бортовыми радиолокационными системами с доплеровским обужением луча, в передней полусфере при маловысотном полете;
- предложен алгоритм выделения малоподвижных объектов, сигналы от которых попадают в доплеровские каналы, соответствующие области интенсивных отражений от подстилающей поверхности по ГЛ ДНА;
- проведен сравнительный анализ эффективности оптимизированного режекторного фильтра и фильтра, реализующего высокочастотную фильтрацию спектра отражений, при этом показана целесообразность применения высокочастотной фильтрации в области отражений по ГЛ ДНА (используется дополнительная информативная составляющая, позволяющая повысить точность оценки угловых координат и скорости наземных малоподвижных целей).

Реализация результатов исследований позволит повысить эффективность навигации летательных аппаратов, обнаружения малоподвижных целей и помехозащищенность системы, что обеспечит улучшение показателей БРЛС в целом.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены в разработки Научно-конструкторского центра видеокомпьютерных технологий (НКЦ ВКТ) ФГУП ГРПЗ по теме «Система комплексной обработки навигационной информации» (СКОНИ), г. Рязань, а также в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета при преподавании дисциплин «Радиолокационные системы» и «Теория и техника радиолокационных и радионавигационных систем», в том числе в форме программно-методического обеспечения к лабораторным работам. Внедрения подтверждены соответствующими актами. Научные и практические результаты работы использованы в процессе выполнения 4-х НИР.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих конференциях.

1. Вторая международная конференция «Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации» (ARMIMP-2007), г. Суздаль, 2007.
2. 15-я МНТК «Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций», г. Рязань, 2008.
3. 40-я научно-техническая конференция «Радиотехнические системы и устройства», г. Рязань, 2008.
4. 10-я международная конференция и выставка «Цифровая обработка сигналов и ее применение», г. Москва, 2007.
5. VII международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов», г. Самара, 2008.
6. Международная научно-техническая конференция «К 100-летию со дня рождения В.А. Котельникова», г. Москва, 2008.
7. 41-я научно-техническая конференция преподавателей и сотрудников РГРТУ «Радиотехнические системы и устройства», г. Рязань, 2010.

Публикации

Всего опубликовано 18 печатных работ, из них по теме диссертации 13 работ, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в список ВАК, 5 статей в межвузовских сборниках научных трудов, 5 тезисов докладов на научных конференциях международного и всероссийского уровней. Результаты работы использованы в промежуточных и заключительных отчетах по 4 НИР.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа общим объемом 158 страниц состоит из введения, трех разделов, заключения, приложений и списка литературы, включающего 154 наименования. Иллюстративный материал представлен 51 рисунком и 1 таблицей.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, определены цель и основные задачи исследования, показаны научная новизна и практическая значимость работы.

В первом разделе рассмотрены режимы работы БРЛС, приведён обзор методов формирования РЛИ в передней полусфере.

Моделирование РЛИ основывалось на комбинации лучевой и фацетной теорий отражения, модифицированной согласно принятой триангуляционной аппроксимации подстилающей поверхности.

В настоящее время появляется возможность использовать ГИС, позволяющие работать с картографической информацией на основе цифровых баз данных, таким образом осуществлен переход к гибридным картам. В

них для элементов ландшафта приводятся географические координаты и семантическая информация, используемые при построении эталонных РЛИ. Таким образом, предложено использовать оцифрованную топографическую карту, дополненную коэффициентами отражения при различных углах облучения, что позволило оценивать эффективную площадь рассеяния участка земной поверхности на любой высоте и под любым углом.

Эталонное РЛИ формируется на основе цифровой карты местности (ЦКМ) как совокупность точечных фрагментов определенной яркости; при этом предусмотрено использование не только модели ДНА, но и реальной ее формы посредством введения экспериментального массива данных о форме ДНА в различных сечениях.

Упрощенная структура алгоритма моделирования РЛИ может быть представлена следующим образом.

1. Ввод исходных данных: вектор движения носителя РЛС, энергетические параметры РЛС, сектор сканирования и отклонение центра сектора от вектора путевой скорости ЛА.

2. Загрузка формы ДНА (модель или массив экспериментальных данных) и текущего участка ЦКМ.

3. Построение триангуляционной модели подстилающей поверхности и вычисление признаков треугольников: сферических координат относительно БРЛС, эквивалентной площади, коэффициента отражения.

4. Расчет распределения мощности радиоотражений по доплеровским каналам в каждом стробе дальности вдоль линии визирования (формирование спектрально-дальностного портрета) при каждом положении ГЛ ДНА в рамках сектора сканирования.

5. Формирование РЛИ в заданном режиме обзора пространства.

Для адекватности предоставляемой информации о радиолокационной обстановке при маловысотном полете алгоритм моделирования дополнен оригинальной процедурой построения теней, учитывающей их изменяющуюся геометрию по мере движения носителя РЛС.

Пример формирования РЛИ по ЦКМ, сформированной по карте ГИС г. Коломны, представлен на рис. 1, на котором в режиме реального луча РЛИ искажено отражениями по БЛ ДНА от объекта, расположенного вне сектора сканирования (см. карту ГИС). Рассматриваемый объект (многопутная железная дорога) находится в области первого БЛ ДНА и, обладая большой эффективной площадью рассеяния (являясь радиоконтрастным объектом), искажает информацию об отражении в анализируемом элементе разрешения, соответствующем текущему направлению ГЛ. В режиме доплеровского обужения луча (ДОЛ) отражениям от подстилающей поверхности по ГЛ ДНА соответствуют определенные доплеровские каналы, которые и анализируются при формировании РЛИ, а мешающие отражения от радиоконтрастного объекта отбрасываются (см. РЛИ в режиме ДОЛ на рис. 1).

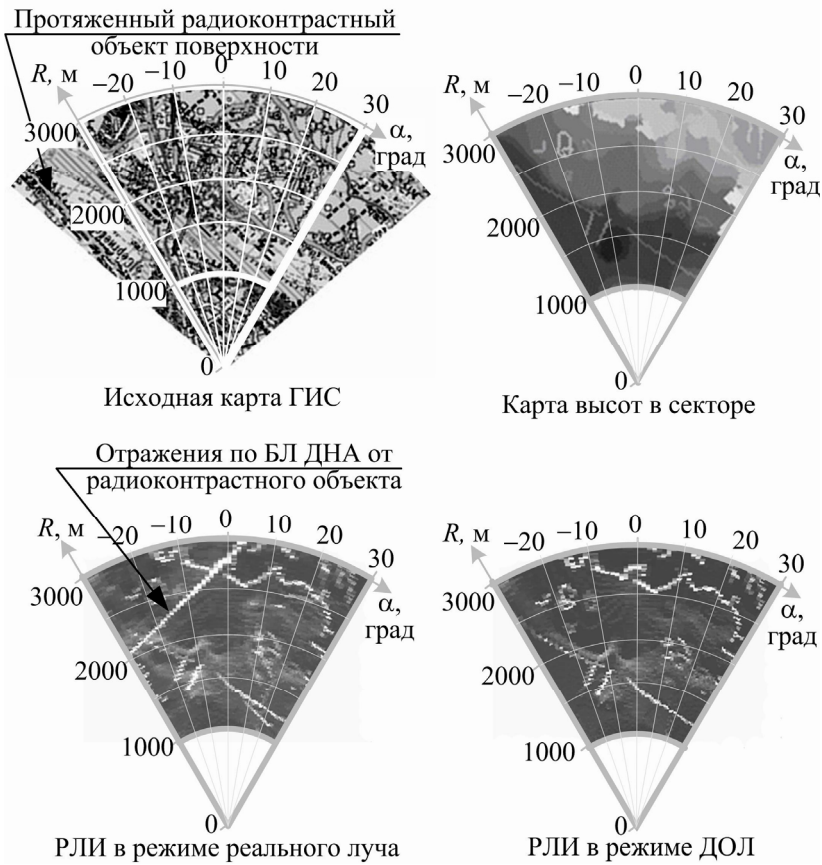


Рис. 1. Исходная карта и формируемые РЛИ

Иллюстрированный материал первой главы базируется как на искусственно сконструированном рельефе, так и на реальном ландшафте, в том числе с городской застройкой. Такой подход позволил оценить адекватность предложенного метода моделирования посредством совмещения моделируемого РЛИ и реального, формируемого на борту летательного аппарата (вертолета), пролетающего над заданным районом местности.

Заключительная часть раздела посвящена синтезу и оптимизации фильтров моделирования на основе моделей авторегрессии–скользящего среднего, что позволило ввести различные виды шумов на основе их статистических моделей.

Во втором разделе решены задачи синтеза и оптимизации метода анализа радиолокационных сцен, позволяющего обеспечить коррекцию искажений РЛИ, обусловленных отражениями по БЛ ДНА, форма кото-

рых априорно неизвестна (решена задача снижения влияния паразитных изодопных составляющих). При этом обработка проводилась отдельно для каждого *j*-го строба, $j = \overline{0,(M-1)}$, где M – число стробов дальности. Расстояние в пределах строба дальности считалось равным расстоянию R до его середины. Величины, входящие в основное уравнение радиолокации, но не зависящие от пространственного положения и характеристик разрешаемого сегмента поверхности, объединены в нормирующий множитель k: $k = P_{\text{пер}}\,\lambda^2 \Big/ \left((4\pi)^3\, R^4\right)$, где $P_{\text{пер}}$ – мощность передатчика; λ – длина волны излучаемого колебания. В величину $C(\alpha, \beta)$ сгруппированы компоненты, определяющие характеристики элемента разрешения, имеющего относительно БРЛС азимут α и угол места β: $C(\alpha, \beta)=\rho(\alpha, \beta)\, S(\alpha, \beta)$, где $\rho(\alpha, \beta)$ – усредненный по сегменту поверхности коэффициент отражения; $S(\alpha, \beta)$ – эффективная площадь (с учетом угла скольжения электромагнитного излучения) разрешаемого сегмента. Тогда мощность на входе приемника для *j*–го строба:

$$P_{\text{пр}}(\alpha, \beta) = k\, G_{\text{пер}}(\alpha, \beta)\, G_{\text{пр}}(\alpha, \beta)\, C(\alpha, \beta), \qquad (1)$$

где $G_{\text{пер}}(\alpha, \beta)$ – коэффициент усиления (КУ) ДНА передатчика в анализируемом направлении; $G_{\text{пр}}(\alpha, \beta)$ – КУ ДНА приемника в анализируемом направлении. Выражение (1) даёт возможность сформировать доплеровский портрет отражений от подстилающей поверхности в каждом стробе дальности и во всех анализируемых направлениях ГЛ ДНА в пространстве. Для этого воспользуемся соотношением, связывающим угловое положение точки в пространстве с углом, образующим конус равных доплеровских скоростей γ: $\cos\gamma = \cos\alpha \cdot \cos\beta$. Усредняем параметры выражения (1) в пределах разрешения $\Delta\gamma$ по углу γ, учитывая, что каждому углу γ соответствует определенный номер l доплеровского канала:

$$P_{\text{пр}}(l) = k\, G_{\text{пер}}(l)\, G_{\text{пр}}(l)\, C(l)\,, \qquad (2)$$

где $C(l) = \int\limits_{\Delta\gamma_l} C(\alpha,\beta)\,\mathrm{d}\gamma$, $G_{\text{пер}}(l) = \int\limits_{\Delta\gamma_l} G_{\text{пер}}(\alpha,\beta)\,\mathrm{d}\gamma$, $G_{\text{пр}}(l) = \int\limits_{\Delta\gamma_l} G_{\text{пр}}(\alpha,\beta)\,\mathrm{d}\gamma$.

Если ГЛ ДНА занимает N_d дискретных азимутальных положений в пространстве при фиксированном угломестном положении, то при обзоре пространства в передней полусфере имеются симметричные относительно направления вектора путевой скорости носителя положения ГЛ – дискреты d_1 и d_2, а соответствующие им азимуты α_{d1}, α_{d2} (соответственно) отличаются знаком: $\alpha_{d1} = -\alpha_{d2}$. Учитывая сложение мощностей изодопных составляющих, получаем соотношение, определяющее спектральную мощность отражений от подстилающей поверхности в *l*-м доплеровском канале при направлении ГЛ ДНА α_{d1}, соответствующем дискрету d_1:

$$P_{\text{пр}}(l,d_1) = k\,[G_{\text{пер}}(l,d_1)\, G_{\text{пр}}(l,d_1)\, C(l,d_1) + G_{\text{пер}}(l,d_2)\, G_{\text{пр}}(l,d_2)\, C(l,d_2)], \qquad (3)$$

где $C(l, d_1)$ и $C(l, d_2)$ – характеристики элементов разрешения, находящихся под углами α_{d1} и α_{d2} соответственно. При использовании одной приемопередающей антенны $G_{\text{пер}}(l, d_1)G_{\text{пр}}(l, d_1)=G^2(l, d_1)$ – квадрат КУ по азимутальному направлению α_{d1}, которое соответствует направлению ГЛ ДНА $G^2(l,d_1)=G^2_{\text{ГЛ}}$; $G_{\text{пер}}(l,d_2)\,G_{\text{пр}}(l,d_2)=G^2_{\text{БЛ}}(l,d_2)=G^2_{\text{БЛ}}(d_2)$ – квадрат КУ по БЛ в направлении α_{d2} при направлении ГЛ ДНА α_{d1}.

Мощности $P_{\text{пр}}$, $P_{\text{пр д}}$ на выходах основного и дополнительного каналов приема (соответственно) в l-м доплеровском канале могут быть выражены системой уравнений, матричная запись которой может быть представлена следующим образом: $k\mathbf{G}_{\text{пер}}\mathbf{G}_{\text{пр}}\mathbf{C}=\mathbf{P}_{\text{пр}}$, где $\mathbf{C}^{\text{T}}=\left\|C(d_1)\quad C(d_2)\right\|$ – вектор характеристик поверхности с симметричных направлений α_{d1} и α_{d2}, где символ $^{\text{T}}$ обозначает операцию транспонирования; $\mathbf{P}^{\text{T}}_{\text{пр}}=\left\|P_{\text{пр}}(d_1)\quad P_{\text{пр}}(d_2)\quad P_{\text{пр д}}(d_1)\quad P_{\text{пр д}}(d_2)\right\|$ – вектор мощностей на входе приемника; $\mathbf{G}_{\text{пер}}$, $\mathbf{G}_{\text{пр}}$ – матрицы КУ передающей и приемной антенн:

$$\mathbf{G}_{\text{пер}}=\left\|\begin{matrix} G_{\text{ГЛ}} & 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(d_2) & 0 & 0 \\ 0 & G_{\text{БЛ}}(d_1) & 0 & 0 & G_{\text{ГЛ}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{\text{ГЛ}} & 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(d_2) \\ 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(d_1) & 0 & 0 & G_{\text{ГЛ}} \end{matrix}\right\|,$$

$$\mathbf{G}^{\text{T}}_{\text{пр}}=\left\|\begin{matrix} G_{\text{ГЛ}} & G_{\text{БЛ}}(d_1) & G_{\text{д}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{\text{БЛ}}(d_2) & G_{\text{ГЛ}} & G_{\text{д}} \end{matrix}\right\|.$$

Решение системы дает возможность получить оценки характеристик $C(d_1)$, $C(d_2)$ отражения разрешаемых элементов поверхности с соответствующих направлений α_{d1}, α_{d2}, а также КУ БЛ $G^2_{\text{БЛ}}(d_1)$, $G^2_{\text{БЛ}}(d_2)$, имеющие смысл весовых коэффициентов паразитных вкладов элементов поверхности в результирующую мощность в пределах одной изодопы. Это позволяет скорректировать искажения.

Для решения использованы численные методы, требующие задания начального приближения. В большинстве случаев начальное приближение будет близко к искомому решению. Например, при использовании фазированных антенных решеток и симметричном электронном отклонении луча относительно нормали к плоскости антенны наблюдаются схожие фазовые искажения, определяющие формы БЛ. С учетом сделанных допущений получено аналитическое решение:

$$G_{\text{БЛ}}=\frac{G_{\text{д}}\cdot\left[A(d_2)\cdot P_{\text{пр}}(d_2)+A(d_1)\cdot P_{\text{пр}}(d_1)\right]}{A(d_2)\cdot P_{\text{пр д}}(d_2)+A(d_1)\cdot P_{\text{пр д}}(d_1)},$$

$$C(d_1)=\frac{G_{\text{д}}\cdot P_{\text{пр}}(d_2)-G_{\text{ГЛ}}\cdot P_{\text{пр д}}(d_2)}{G_{\text{д}}\cdot k\cdot(G^2_{\text{БЛ}}-G_{\text{ГЛ}}\cdot G_{\text{БЛ}})},\quad C(d_2)=\frac{G_{\text{д}}\cdot P_{\text{пр}}(d_1)-G_{\text{ГЛ}}\cdot P_{\text{пр д}}(d_1)}{G_{\text{д}}\cdot k\cdot(G^2_{\text{БЛ}}-G_{\text{ГЛ}}\cdot G_{\text{БЛ}})},\qquad (4)$$

где $A(d_1) = G_д P_{пр}(d_1) - G_{ГЛ} P_{пр\,д}(d_1)$, $A(d_2) = G_д P_{пр}(d_2) - G_{ГЛ} P_{пр\,д}(d_2)$.

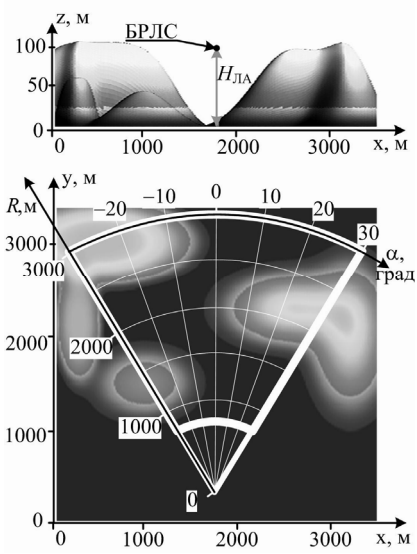


Рис. 2. ЦКМ с указанием положения БРЛС и сектора сканирования

Моделирование проводилось при аппроксимации формы передающей ДНА суммой двух функций: $|\mathrm{sinc}(x)|=|\sin(x)/x|$ и сферой, необходимой для устранения нолей ДНА, где $x = \sqrt{(\alpha-\alpha_0)^2 + (\beta-\beta_0)^2}$. Отношение мощности по ГЛ ДНА к мощности по первому БЛ ДНА 13 дБ.

Для сравнения РЛИ, формируемых по рельефу местности (ЦКМ представлена на рис. 2) в различных режимах, было смоделировано эталонное изображение, сформированное на основе идеализированной ДНА, у которой в направлении паразитных изодопных составляющих нет боковых лепестков (КУ БЛ равны нолю). В качестве критерия оценки эффективности предложенного метода в сравнении с классическим алгоритмом ДОЛ использовалась два-норма Δ_i вектора невязки $\mathbf{B}^i$:

$$\Delta_i = \left\| \mathbf{B}^i \right\|_2 = \sqrt{\sum_{j=0}^{M-1} \left(b_{j,i}\right)^2}\ ,\ i = \overline{0, N_d - 1}\,, \qquad (5)$$

где $\mathbf{B}^i$ – вектор-столбец формируемой разностной матрицы изображения $\mathbf{B}$ при i-м азимутальном направлении α_i ГЛ ДНА: матрицы, получаемой в анализируемом режиме работы БРЛС, и эталонной матрицы РЛИ. Для удобства отображения результатов введен нормирующий множитель $1/\max(\mathbf{B}_{эталон})$, $\max(\mathbf{B}_{эталон})$ – максимум яркости эталонной матрицы РЛИ.

Кривые, характеризующие эффективность режимов работы БРЛС в анализируемом секторе сканирования, представлены на рис. 3, где штрихпунктирная кривая соответствует режиму реального луча (без ДОЛ); тонкая сплошная – обычному режиму ДОЛ; сплошная жирная – предлагаемому режиму ДОЛ с коррекцией формируемой матрицы РЛИ. Видно, что предложенный метод коррекции уступает классическому режиму ДОЛ лишь в узком секторе переднего обзора, где нет возможности селектировать ГЛ ДНА, очевидно, этот сектор можно оценить заранее и задавать (переключать) режим работы РЛС в соответствии с априорными данными о снижении эффективности ДОЛ с коррекцией в текущем секторе.

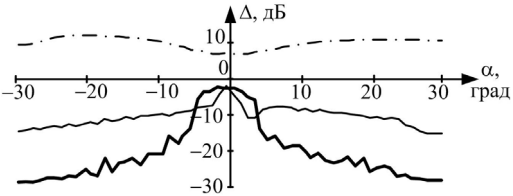


Рис. 3. Два-норма векторов невязки

Следует заметить, что искажения можно дополнительно уменьшить, воспользовавшись весовой обработкой спектральных компонент. Для этого достаточно связать нормирующие коэффициенты спектральных компонент в области, где нет возможности выделять ГЛ ДНА, с суммой КУ БЛ и КУ ГЛ, взятых с весами, пропорциональными занимаемой ими относительной ширине спектра, соответствующей анализируемому доплеровскому каналу. В качестве КУ БЛ ДНА берутся оценки $G^2_{\text{БЛ}}$, формируемые в каждом стробе дальности в соседних доплеровских каналах на предыдущем шаге сканирования ДНА, когда еще была возможность выделения спектральных компонент ГЛ ДНА. Алгоритм формирования $G^2_{\text{БЛ}}(l)$ можно разбить на рекуррентную процедуру, включающую три этапа. Анализ начинается с положения ГЛ ДНА $i = 0$, соответствующего максимальному азимутальному отклонению ГЛ ДНА, и продолжается до минимального отклонения. Отдельно рассматриваются оба направления азимутального сканирования.

Алгоритм оценки КУ БЛ ДНА состоит из следующих этапов.

1. Задаваясь КУ ГЛ ДНА и зная распределение мощности в спектре отражений по ГЛ ДНА, оцениваем по (2) величины, не зависящие от ДНА $kC(l)$ во всех доплеровских каналах, полоса которых полностью перекрыта отражениями по ГЛ.

2. На следующем i–м шаге сканирования ГЛ ДНА в пространстве по $P_{\text{пр}}(l)$ одного (или нескольких, что определяется шагом сканирования и шириной ГЛ ДНА) из анализируемых на 1-м шаге доплеровских каналах и оценкам шага 1 находим $G^2{}_{\text{БЛ}}(l)$.

3. Если разрешения $\Delta\gamma_l$ на краях сектора сканирования достаточно для построения адекватной модели коэффициентов передачи доплеровских каналов $G^2_{\text{БЛ}}(l,i)$, обусловленных формой и пространственным положением ДНА, то вычисления по пунктам 1-2 алгоритма прекращаются. Если же разрешения на краях сектора сканирования недостаточно, то вычисления $G^2_{\text{БЛ}}(l,i)$ по пунктам 1-2 проводим в анализируемом секторе сканирования, а затем для каждого $G^2_{\text{БЛ}}(l,i)$ проводим аналогичные вычисления, формируя таким образом тензор как послойное наложение $N_d/2$ матриц $\mathbf{G}^2_{\text{БЛ}}(i')$ с коэффициентами $G^2_{\text{БЛ}}(l,i)$, $i' = \overline{0,(N_d'-1)}$, где N_d' – число итераций (вычислений по пунктам 1-2), необходимое для построения

адекватной модели коэффициентов передачи доплеровских каналов. Итоговые коэффициенты передачи вычисляются посредством анализа тензора отдельно вдоль каждого луча $i' = \overline{0,(N_d' - 1)}$, т.е. в сечении плоскостями $\mathbf{G}^2_{\text{БЛ}}(l, i = const, i')$ – фиксированное азимутальное положение ГЛ ДНА и $\mathbf{G}^2_{\text{БЛ}}(l = const, i, i')$ – фиксированный доплеровский канал.

Два-нормы Δ_i векторов невязки $\mathbf{B}^i$, рассчитанные по (5), для формируемых РЛИ в режиме ДОЛ, а также ДОЛ с коррекцией без весовой и с весовой обработкой, представлены на рис. 4.

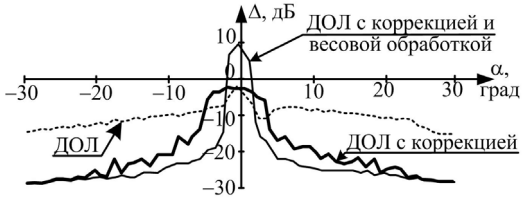


Рис. 4. Два-норма векторов невязки

Как видно из рис. 4, применение весовой обработки позволяет повысить эффективность алгоритма коррекции. Снижение перепадов в векторе невязки в области селекции ГЛ ДНА обусловлено снижением веса неправильной интерпретации информации в случае, когда отражения по ГЛ ДНА занимают отличное от целого число доплеровских каналов. Повышается адекватность предоставляемой информации в большем секторе углов, по сравнению с простым алгоритмом ДОЛ с коррекцией.

Также во втором разделе рассмотрены методы оптимального обнаружения сигналов на фоне коррелированных помех, что было необходимо для оценки потенциальных возможностей обработки.

В третьем разделе рассматриваются вопросы выделения малоподвижных наземных целей на фоне интенсивных отражений от коррелированных помех в миллиметровом диапазоне длин волн, которому уделяется всё возрастающее внимание. Одна из причин, обусловливающих этот интерес, заключается в возможности представления спектра отраженного сигнала сверткой двух спектров, один из которых описывает флуктуации сигнала за счет собственных характеристик и перемещений рассеивателя, а другой обусловлен сканированием антенны и движением носителя. Предложен подход, основанный на более детальном анализе спектра мощности отражений от подстилающей поверхности в когерентно-импульсной БРЛС. Выделение малоподвижных наземных целей осуществлено посредством высокочастотной фильтрации (фильтром нулевого фазового сдвига) формируемого СДП.

Дополнительно анализировалась корреляция соответствующих доплеровских каналов в соседних стробах дальности, что позволило разделить отражения, обусловленные неоднородностью поверхности, и отражения от цели.

Пример СДП, усредненного по 4 выборкам, представлен на рис. 5, где частотами f_1 и f_2 обозначен интересующий нас анализируемый в дальнейшем фрагмент, соответствующий области отражений по ГЛ ДНА и первым БЛ ДНА. Радиолокационное изображение, представленное на рис. 5, сформировано на основе аддитивной смеси сигнала, коррелированной помехи и шума при следующих соотношениях мощности компонент: отношение шум/помеха принято равным –30 дБ, q = –20 дБ – отношение мощностей сигнал-(помеха+шум).

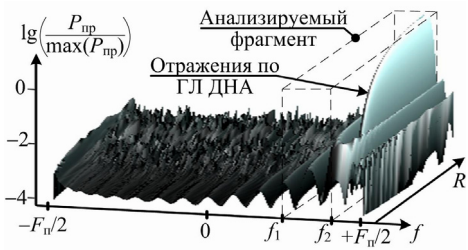


Рис. 5. Спектрально-дальностный портрет

Рассматривался вещественный стационарный одномерный процесс $\{p^{(i)}(l)\}$, наблюдаемый в виде дискретной совокупности отсчетов $l=\overline{0,(L-1)}$ по набору $i=\overline{0,(M-1)}$, где L – число анализируемых доплеровских каналов, соответствующих диапазону частот от f_1 до f_2.

Тройная автокорреляционная функция $R_p^{(i)}(k,t)$ процесса $\{p^{(i)}(l)\}$:

$$R_p^{(i)}(k,t)=\sum_{l=0}^{L-1} p^{(i)}(l)\cdot p^{(i)}(l+k)\cdot p^{(i)}(l+t), \qquad (6)$$

где $k=\overline{(-L+1),(L-1)}$, $t=\overline{(-L+1),(L-1)}$.

Биспектр $\dot{B}_p^{(i)}(n,m)$:

$$\dot{B}_p^{(i)}(n,m)=\frac{1}{(2L-1)^2}\sum_{k=-L+1}^{L-1}\sum_{t=-L+1}^{L-1} R_p^{(i)}(k,t)\exp\left[-\frac{\mathrm{i}2\pi}{2L-1}(kn+tm)\right], \qquad (7)$$

n=(–L+1),…,(L+1), m=(–L+1),…,(L+1) – номера независимых отсчетов.

Рекурсивный алгоритм оценки амплитудного Фурье-спектра сигнала:

$$\left|\hat{\dot{S}}^{(i)}(n+m)\right|=\frac{\left|\dot{B}_p^{(i)}(n,m)\right|}{\left|\hat{\dot{S}}^{(i)}(n)\right|\cdot\left|\hat{\dot{S}}^{(i)}(m)\right|},\ n=\overline{0,(L-1)},\ m=\overline{0,(L-1)}. \qquad (8)$$

В качестве процесса $\{p^{(i)}(l)\}$ рассмотрим фрагмент i-й строки анализируемого СДП в полосе частот $[f_1, f_2]$ (см. рис. 5), соответствующей дальности, на которой содержится отраженный сигнал от цели (см. рис. 6). Результат $\left\{\hat{p}^{(i)}(l)\right\}$ высокочастотной фильтрации входной выборки $\left\{p^{(i)}(l)\right\}$ на основе оценок биспектра

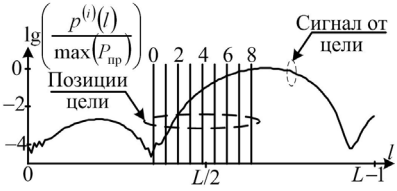


Рис. 6. Анализируемый процесс

(см. рис. 7) представлен на рис. 8.

Для более детального исследования предложенного алгоритма обработки рассчитаны характеристики обнаружения (ХО) и проведено их сравнение с результатами фильтрации оптимальным (ОФ) и оптимизированным режекторным фильтрами. Под оптимизированным режекторным фильтром (ОРФ) понимается режекторный фильтр, построенный по априорно известной корреляционной матрице помехи и адаптирующий свой порядок с целью максимизации коэффициента улучшения отношения сигнал-(помеха+шум), достигаемого в системе режектор-накопитель.

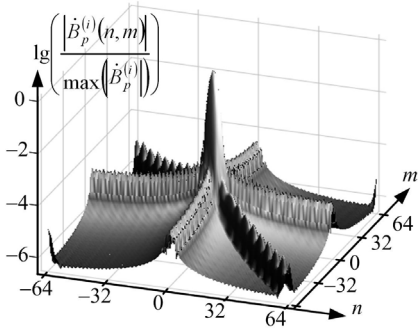


Рис. 7. Биспектр

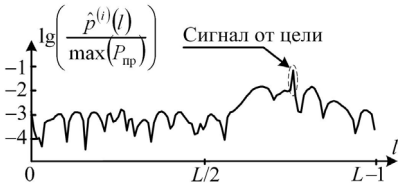


Рис. 8. Результат обработки

На рис. 9 представлены ХО для двух позиций цели, при этом видно, что оба метода проигрывают ОФ, но предлагаемый метод уступает и ОРФ в области слабых отражений от коррелированной помехи (позиция цели № 0).

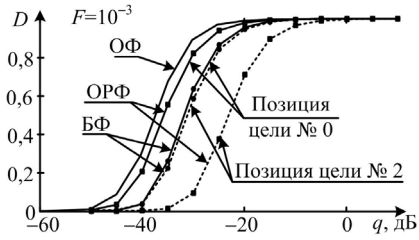


Рис. 9. ХО

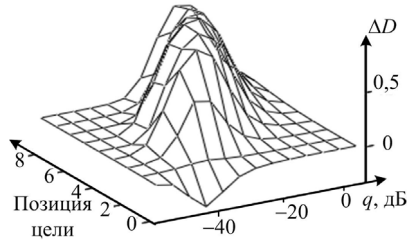


Рис. 10. Разница ХО

При перемещении спектральной компоненты цели в область интенсивных отражений (позиция № 2) от пассивной помехи, поступающих по ГЛ ДНА, у фильтра, формируемого на основе биспектральных оценок (БФ), наблюдаются незначительные изменения в ХО, а у ОРФ ХО резко уходят вправо, проигрывая в q предложенному методу по уровню D=0,8 до 4 дБ.

Для более наглядной визуализации сравнения двух методов фильтрации на рис. 10 представлена разница ΔD вероятностей правильного обнаружения цели в БФ и ОРФ: $\Delta D = D_{\text{БФ}} - D_{\text{ОРФ}}$ для всех анализируемых положений цели в области отражений по ГЛ ДНА (см. рис. 6). Нетрудно

видеть, что предложенный метод наиболее эффективен при выделении целей в области интенсивных коррелированных отражений, т.е. для обнаружения малоподвижных наземных объектов. Сравнительный анализ эффективности выделения малоподвижных объектов предложенным алгоритмом и общеизвестными методами СДЦ (на примере оптимизированного режекторного фильтра) показал наличие выигрыша в коэффициенте улучшения по мощности до $\Delta q = q_{\text{ОРФ}} - q_{\text{БФ}} = 7$ дБ по уровню вероятности правильного обнаружения $D = 0{,}8$ при вероятности ложной тревоги $F=10^{-3}$ (см. рис. 10).

На основе диссертационных исследований разработано программно-методическое обеспечение, предназначенное для проведения лабораторных и курсовых работ, также совместно с кафедрой электронно-вычислительных машин РГРТУ разработан пакет программ априорного формирования РЛИ по маршруту полета ЛА, что позволило оценить адекватность разработанной модели на основе сопоставления модельных и реальных РЛИ местности, полученных в ходе натурных испытаний БРЛС миллиметрового диапазона длин волн.

В заключении подведены итоги диссертационной работы и сформулированы её основные научные и практические результаты, которые сводятся к следующему.

- Разработана методика моделирования РЛИ земной поверхности. Полученные в результате имитационного моделирования радиолокационные изображения были использованы в экспериментальной части работы. Предложенная методика обеспечивает:

– возможность априорного формирования РЛИ сцен местности по маршруту полета в различных режимах работы БРЛС, т.е. формируется база данных эталонных РЛИ;

– триангуляционную аппроксимацию поверхности, что позволило разработать оригинальный алгоритм построения теней, повышающий адекватность моделируемых РЛИ при маловысотном полете носителя РЛС или в условиях горной местности;

– инвариантность методики моделирования радиолокационных сцен к ракурсу наблюдения за счёт использования предлагаемой гибридной карты местности (тензор с дополнительными матрицами рассеяния), формируемой на основе карт геоинформационных систем.

- Разработан алгоритм коррекции РЛИ подстилающей поверхности, полученного с помощью бортовых радиолокационных систем, работающих в режиме доплеровского обужения луча, в передней полусфере при маловысотном полете. Алгоритм осуществляет коррекцию искажений, обусловленных отражениями в пределах одной изодопы по боковым лепесткам ДНА, форма которых априорно неизвестна. Сравнительный анализ эффективности методов формировании РЛИ в БРЛС показал, что величина

выигрыша, в сравнении с классическим режимом ДОЛ, составляет 6...13,67 дБ и достигает максимума в миллиметровом диапазоне как при непосредственном применении, так и с разработанной дополнительной весовой обработкой спектральных компонент, соответствующих отражениям по ГЛ ДНА.

- Предложен алгоритм обнаружения малоподвижных наземных целей на фоне отражений по главному лепестку диаграммы направленности антенны. Сущность алгоритма заключается в предварительной высокочастотной фильтрации (фильтром нулевого фазового сдвига) части спектрально-дальностного портрета отражений от подстилающей поверхности. Коэффициенты фильтра формируются путем биспектрального анализа спектра мощности отраженного сигнала когерентно-импульсной БРЛС.
- Проведен анализ характеристик обнаружения алгоритма селекции малоподвижных наземных целей на основе высокочастотной фильтрации. При этом пороговые сигналы получены аналитически методом собственных значений. Сравнительный анализ предложенного метода и метода на основе оптимизированного режекторного фильтра показал, что величина выигрыша в отношении мощностей сигнал-(помеха+шум) составила до 3...7 дБ при вероятностях правильного обнаружения D=0,8 и ложной тревоги F=10^{-3}.
- Показано, что восстановление границ затенений в спектре отражений и последующая обработка СДП на основе алгоритмов фоновой локации с анализом динамики изменений спектральных компонент вдоль линии визирования позволили выделить в спектре компоненту, обусловленную теневым полем цели, что дало возможность оценить угловые координаты и скорость наземных малоподвижных объектов без компенсации собственной скорости носителя РЛС.
- Разработан программный модуль, используемый в учебном процессе РГРТУ, для анализа режимов работы БРЛС, исследования пассивных помех от подстилающей поверхности и радиолокационных изображений.

В приложениях приведены: список условных обозначений и аббревиатур, встречающихся в тексте диссертации; результаты экспериментальных исследований на основе совмещения РЛИ, полученных имитационным моделированием и при натурных испытаниях; математическое описание метода собственных значений, используемого для расчета характеристик обнаружения; копии актов внедрения результатов, полученных в рамках данной диссертационной работы.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах

1. **Юкин С.А.** Моделирование радиоотражений от подстилающей поверхности при неоднозначном измерении дальности // Математическое и программное обеспечение вычислительных систем: межвуз. сб. науч.

тр./ под ред. А.Н. Пылькина.– М.: Горячая линия – Телеком, 2007.– С. 61–64.

2. **Юкин С.А.** Алгоритмы распознавания типов радиолокационных помех по ковариационным моментам выборки / А.В. Гуменюк, А.С. Логинов, И.С. Холопов, С.А. Юкин // Цифровая обработка сигналов и ее применение: труды РНТОРЭС им. А.С. Попова.– М., 2008.– Том 1.— С. 388-391.

3. **Гуменюк А.В., Юкин С.А.** Оценка коэффициентов адаптации режекторного фильтра параллельной структуры // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 15-й Международной научно-технической конференции. Часть 1.– Рязань: РГРТУ, 2008.– С 75-77.

4. **Андреев В.Г., Юкин С.А.** Методика моделирования радиоизображений подстилающей поверхности при наличии радиолокационных теней // Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации; вып. 2: труды Российского научно-технического общества радиотехники, электроники и связи имени А.С. Попова, Рос. Секция IEEE.– М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2007.– С. 187-191.

5. **Андреев В.Г., Юкин С.А.** Формирование радиолокационного изображения подстилающей поверхности по цифровой топографической карте // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 21.– Рязань: РГРТУ, 2007.– С. 25-31.

6. **Андреев В.Г., Юкин С.А.** Математическое моделирование радиолокационных эталонов в системах навигационного обеспечения // Физика и технические приложения волновых процессов: тезисы докладов VII МНТК, посвященной 150-летию со дня рождения А.С. Попова: Приложение к журналу «Физика волновых процессов и радиотехнические системы» / под ред. В.А. Неганова и Г.П. Ярового.– Самара: Самарское книжное издательство, 2008.– С. 61-62.

7. **Юкин С.А.** Исследование радиолокационного изображения поверхности земли при маловысотном полете // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 4.– Рязань: РГРТУ, 2008.– С. 70–75.

8. **Юкин С.А.** Коррекция формируемого на базе бортовых радиолокационных систем яркостного портрета подстилающей поверхности // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 10/ под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина.– М.: Радиотехника, 2008.– С. 230-237.

9. **Андреев В.Г., Юкин С.А.** Коррекция радиолокационного изображения, формируемого в режиме доплеровского обужения луча // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 25.– Рязань: РГРТУ, 2008.– С. 39-44.

10. **Андреев В.Г., Юкин С.А.** Формирование радиолокационного изображения поверхности в передней полусфере при маловысотном полете // Международная научно-техническая конференция к 100-летию со дня рождения В.А. Котельникова: Москва, 21-23 октября 2008: тезисы докладов.–М.: Издательский дом МЭИ, 2008.– С. 162-164.

11. **Юкин С.А.** Формирование амплитудно-частотной характеристики фильтра обработки изображения в бортовой системе на основе биспектральных оценок // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сб. науч. тр. Вып. 11/ под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина.– М.: Радиотехника, 2009.– С. 309-316.

12. **Андреев В.Г., Юкин С.А.** Биспектральный анализ радиоотражений в задаче селекции наземных движущихся целей // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. Вып. 29.– Рязань: РГРТУ, 2009.– С. 7-11.

13. **Юкин С.А.** Разработка программного обеспечения по формированию радиолокационного изображения поверхности Земли // Методы и устройства обработки сигналов в радиотехнических системах: межвуз. сб. науч. тр. Вып.5 / Рязань: РГРТУ, 2009.– С. 72–77.

14. Разработка архитектуры, математического и программного обеспечения системы комплексной обработки информации для БПЛА с целью обеспечения высокоточной навигации: отчет о НИР (закл.) / РГРТУ; Науч. рук. Злобин В.К.– Тема №3-06; №ГР01200602603.– Рязань, 2006.– 173 с.– Соисполн.: Логинов А.А., Елесина С.И., Юкин С.А. и др.

15. Разработка программного стенда для моделирования системы комплексной обработки радиолокационной и цифровой картографической информации для коррекции навигационных параметров: отчет о НИР (закл.) / РГРТУ; Науч. рук. Злобин В.К.– Тема №1-07; №ГР01200701843.– Рязань, 2008.– 204 с.– Соисполн.: Логинов А.А., Елесина С.И., Юкин С.А. и др.

16. Разработка технологии комплексной обработки радиолокационной и телевизионной (тепловизионной) информации: отчет о НИР (закл.) / РГРТУ; Науч. рук. Злобин В.К.– Тема №3-08; №ГР01200810601.– Рязань, 2009.– 157 с.– Соисполн.: Кошелев В.И., Логинов А.А., Юкин С.А. и др.

ЮКИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ФОРМИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА РАДИОЛОКАЦИОННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ПРИ МАЛОВЫСОТНОМ ПОЛЁТЕ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.2010. Формат бумаги 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л.1,0.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.