

На правах рукописи



НГУЕН ЧУНГ ТХЫК

**АЛГОРИТМЫ ОЦЕНИВАНИЯ
ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КООРДИНАТ
ЭЛЕМЕНТОВ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
В ДОПЛЕРОВСКИХ СИСТЕМАХ
РАДИОВИДЕНИЯ**

Специальности: 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы и
устройства телевидения
05.12.14 – Радиолокация и радионавигация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2015

Работа выполнена на кафедре ЭиММ федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рязанский государственный радиотехнический университет» (ФГБОУ ВПО «РГРТУ», РГРТУ).

Научный руководитель	Клочко Владимир Константинович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой ЭиММ ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет», г. Рязань.
Официальные оппоненты:	Колядов Дмитрий Валерьевич, доктор технических наук, профессор кафедры ТЭРЭО ВТ ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА); Кривченков Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, ведущий инженер ОАО «Государственный рязанский приборный завод», г. Рязань.
Ведущая организация	Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВПО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых», г. Муром.

Защита состоится « 11 » июня 2015 года в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО «Рязанский государственный радиотехнический университет».

Автореферат разослан « _____ » _____ 2015 года.

Учёный секретарь диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Последние десятилетия свидетельствуют о появлении новых областей инженерной деятельности на стыке радиотехники, телевидения, радиолокации и радионавигации. Ярким примером этого является область радиовидения, в которой для получения развертки изображения участка земной поверхности после его радиолокационного зондирования и обработки отраженных сигналов в тракте одного канала первичной обработки используется узкополосная доплеровская фильтрация. Такая развертка осуществляется по типу телевизионного (TV) изображения, в котором столбцами являются элементы разрешения доплеровской частоты. Дополненная элементами разрешения по дальности как строками, она дает двумерное (2D) радиолокационное изображение (РЛИ) участка земной поверхности, подобное TV-изображению. Формирование РЛИ имеет определенные преимущества по сравнению с получением оптических изображений – это слабая зависимость от метеоусловий и возможность работы в любое время суток.

Примером может служить бортовая информационная система посадки гражданских самолетов в плохих метеоусловиях с использованием алгоритмов радиовидения. В составе такой системы должен присутствовать алгоритм измерения пространственных координат отражающих элементов земной поверхности. Совокупность измеренных координат, переданная на алгоритм отображения, позволяет пилоту наблюдать рельеф местности. Для посадки на аэродром наиболее информативными являются координаты высотных элементов земной поверхности и объектов на поверхности, которые находятся на линии полета. От точности измерения координат таких элементов зависит безопасность посадки. Проблема заключается в том, что бортовые РЛС, работающие в режиме реального луча (низкого разрешения), не обладают необходимой точностью измерения пространственных координат элементов земной поверхности. А бортовые РЛС, работающие в режиме доплеровского “обужения” луча – ДОЛ (среднего разрешения), основанные на доплеровской фильтрации, потенциально обладают необходимой точностью, но не имеют соответствующего алгоритмического обеспечения. Объективная необходимость развития всепогодных систем наблюдения при посадке самолетов стимулирует разработку новых и эффективных по точности и быстродействию алгоритмов измерения пространственных координат рельефа местности на базе бортовой РЛС, работающей в режиме ДОЛ. В этом состоит актуальность данной работы.

Степень разработанности проблемы. Предпосылки создания современных систем радиовидения – новая элементная база в радиоэлектронной промышленности, а также развитие теории радиотехники, радиолокации и цифровой обработки сигналов в направлении радиовидения.

Значительный вклад в развитие радиотехники и радиолокации внесли такие ученые, как Бакулев П.А., Бакут П.А., Большаков И.А., Левин Б.Р.,

Репин В.Г., Сосулин Ю.Г., Гартаковский Г.П., Тихонов В.И., Финкельштейн М.И., Ширман Я.Д. и др., в развитие радиовидения – Бойко Б.В., Буренин Н.И., Горяинов В.Т., Караваев В.В., Комаров А.А., Кондратенков Г.С., Кулин А.Н., Мельник Ю.А., Митник Л.Н., Михайлов Б.А., Потехин В.А., Реутов А.П., Саблин В.Н., Толстов Е.Ф. и др., в развитие цифровой обработки сигналов (ЦОС) – Витязев В.В., Гольденберг Л.М., Гоулд Б., Марпл.-мл. С.Л., Оппенгейм А.В., Рабинер Л., Хемминг Р.Н., Шафер Р.В. и др., а также зарубежные ученые – Bearse S.V., Hansen R.C., Harger R.O., Iain A., Kovaly I.I., Raney R.K., Shervin C.W., Wiley C.A. и др.

Цель диссертации заключается в повышении эффективности функционирования бортовых систем радиовидения, работающих в режиме ДЮЛ, при посадке гражданского самолета на аэродром за счет разработки алгоритмов оценивания пространственных координат элементов земной поверхности, позволяющих увеличить точность измерения координат и быстродействие при выполнении операций.

Задачи исследования. Поставленная цель достигается путем решения следующих основных задач:

1. Разработка математической модели системы наблюдения с несколькими пространственными каналами.
2. Разработка алгоритмов оценивания пространственных координат элементов отражения земной поверхности на основе полученной модели.
3. Исследование точности предложенных алгоритмов и оценка их вычислительной сложности.
4. Сравнительный анализ разработанных алгоритмов с известными альтернативными подходами.

Методы исследования. Для решения перечисленных задач используется современный аппарат математического анализа, линейной алгебры, цифровой обработки сигналов, теории оценивания и статистической радиотехники. Активно применяется метод компьютерного моделирования.

Научная новизна выносимых на защиту результатов определяется следующими положениями по созданию новых алгоритмов оценивания пространственных координат элементов земной поверхности:

1. Разработка математической модели системы наблюдения.
2. Разработка алгоритма выделения спектральных отсчетов.
3. Разработка алгоритмов оценивания пространственных координат на основе выделенных спектральных отсчетов с использованием различных методов оценивания.

На защиту выносятся следующие новые научные результаты:

1. Математическая модель системы наблюдения, отличающаяся учетом нескольких пространственных каналов в доплеровской РЛС, что позволяет на её основе разрабатывать более точные и быстродействующие алгоритмы оценивания пространственных координат элементов земной поверхности.

2. Алгоритм выделения спектральных отсчетов, полученных одновременно в нескольких пространственных каналах на одинаковых частотах, позволяющий получать несколько измерений для каждого элемента поверхности.

3. Алгоритмы оценивания пространственных координат элементов поверхности, отличающиеся методами обработки выделенных спектральных отсчетов – моноимпульсным методом, фазовым методом, методом восстановления и методом максимума амплитуды, позволяющие оценивать положение центров элементов отражения с погрешностью до 1 м на дальности 1 км, что в 10 раз точнее по сравнению с алгоритмами, учитывающими только один пространственный канал, а также увеличивать быстродействие как минимум в 5 раз по сравнению с альтернативными алгоритмами.

Практическая ценность работы. Разработанные алгоритмы при их реализации в бортовых вычислителях позволяют повысить эффективность функционирования систем радиовидения, то есть с большей точностью и быстродействием оценивать пространственные координаты высотных препятствий по линии полета в условиях отсутствия оптической видимости, что повышает безопасность посадки гражданских самолетов в сложных метеоусловиях.

Достоверность полученных результатов определяется корректностью математической модели, ее соответствием радиотехническим описаниям, корректностью математических преобразований на основе построенной модели при разработке алгоритмов, подтверждением работоспособности алгоритмов компьютерным моделированием, применением разных подходов к оцениванию пространственных координат и получением близких результатов.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены в лабораторный практикум Рязанского государственного радиотехнического университета в виде лабораторной работы, предназначенной для магистрантов, обучающихся по направлению «Радиотехника», а также для слушателей курсов повышения квалификации по дополнительной программе подготовки «Авиационное приборостроение». Внедрение подтверждается актом в приложении.

Личное участие автора в проведении исследований. Автору принадлежат на правах соавтора математическая модель системы наблюдения, математическая постановка задачи и алгоритмы ее решения, отраженные в главах диссертации, а также компьютерное моделирование работы алгоритмов. Факт авторства и соавторства подтверждается списком публикаций.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 4 международных и 1 всероссийской (с международным участием) научно-технических конфе-

ренциях: 2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO-2013 (Budva, Montenegro, June 2013); 6-й Международной научно-технической конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика» (Рязань, 1 – 3 октября 2013 г.); 11th IEEE East-West Design & Test Symposium EWDTs-2013 (Ростов-на-Дону, 27 – 30 сентября 2013 г.); 15-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2013» (Москва, 27 – 29 марта 2013 г.); 4-й Всероссийской конференции (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» РСПОВИ-2014 (Нижний Новгород, 24 – 26 сентября 2014 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 1 патент на способ, 5 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3-х глав, заключения, библиографического списка и приложения. Общий объем работы составляет 120 с., в том числе основной текст – 94 с., 21 рисунок, 36 таблиц, библиографический список из 102 наименований на 10 с., приложение – 16 с.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе *излагается аналитический обзор источников, физическая постановка задачи оценивания пространственных координат элементов земной поверхности применительно к доплеровской системе радиовидения, направление решения задачи, математическая модель тракта первичной обработки принимаемых сигналов, математическая постановка задачи, а также алгоритм выделения спектральных отсчетов.*

Бортовая импульсная доплеровская РЛС, работающая в миллиметровом или сантиметровом диапазоне длин волн в режиме высокочастотного повторения импульсов, формирует узкий луч, круговая диаграмма направленности (ДН) которого на уровне 0,5 мощности составляет $1^0 - 2^0$ по азимуту и углу места. Принятый в одном пространственном канале периодический сигнал $s(t)$ проходит тракт первичной обработки, включающий усиление промежуточной частоты (УПЧ), фазовое детектирование (ФД), низкочастотную фильтрацию (ФНЧ), аналого-цифровое преобразование (АЦП) и стробирование по дальности (во времени t). Запомненная в ОЗУ для каждого i -го элемента (пояса) дальности R_i , $i = 1, m$ (m – число элементов дальности), комплексная временная последовательность $\dot{s}_i(t_j)$, $j = \overline{1, N}$ (N – объем выборки), подается на блок быстрого преобразования Фурье (БПФ). Порядок преобразований показан на рисунке 1 для одного пространственного канала. На выходе БПФ в каждом i -м элементе дальности

сти ($i = \overline{1, m}$) получается комплексный спектр в выделенной полосе частот в виде частотной последовательности $\hat{s}_i^*(f_j)$, $j = \overline{1, N}$. Каждому элементу разрешения по частоте этого спектра соответствует пространственный элемент, в котором зафиксировано действие электромагнитного поля излучения. Развертка амплитуды $|\hat{s}_i^*(f_j)|$ по частоте f_j в строках дальности R_i дает матрицу амплитудного 2D-РЛИ участка земной поверхности в координатах $R_i - f_j$ (дальность – доплеровская частота) по ширине ДН антенны (ДНА).

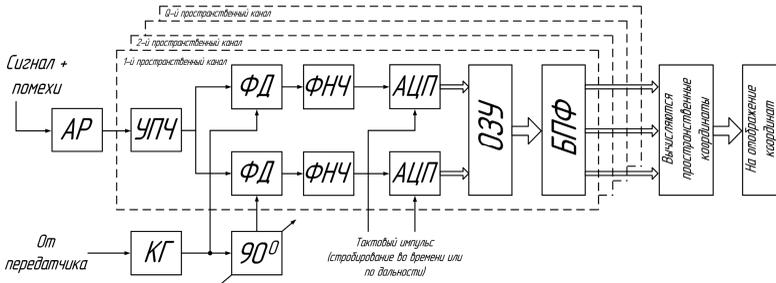


Рисунок 1 – Структурная схема первичной обработки

Однако матрица высоты рельефа местности, полученная в тех же координатах, содержит большую абсолютную погрешность измерения высоты. Величина погрешности определяется наклоном линий доплеровской частоты f_j (изодоп), пересекающих ДНА, и максимально равняется половине линейной ширины ДНА по углу места. Этого недостаточно для совершения безопасной посадки самолета.

Возникает необходимость оценивания пространственных координат элементарных отражателей (центров элементов поверхности), расположенных на изодопах частоты f_j , что возможно сделать за счет увеличения числа пространственных каналов первичной обработки. На рисунке 1 показано предлагаемое дополнение структурной схемы первичной обработки системы наблюдения Q каналами первичной обработки. Каждый q -й пространственный канал ($q = \overline{1, Q}$) обрабатывает сигнал $s_q(t)$, принятый q -м приемным элементом антенной решетки – АР (или q -й группой элементов АР). Так как элементы АР разнесены в пространстве, то сигналы в q -х каналах отличаются фазами. Обработка сигналов $s_q(t)$ в каждом q -м канале ведется независимо (параллельно).

Полученные на выходе q -х каналов частотные последовательности $\hat{s}_{q_i}^*(f_j)$, $j = \overline{1, N}$, $q = \overline{1, Q}$, запомненные в i -х элементах дальности ($i = \overline{1, m}$), подаются на алгоритм выделения спектральных отсчетов, структурная схема которого показана на рисунке 2.

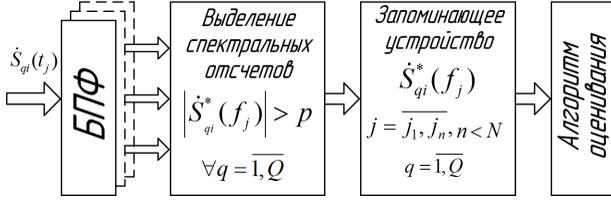


Рисунок 2 – Структурная схема выделения спектральных отсчетов

Данный алгоритм выделяет n частот f_j , $j = \overline{j_1, j_n}$, где n – число элементов разрешения по частоте ($n < N$), на которых получены полезные сигналы отражения от элементов поверхности. Соответствующие этим частотам комплексные спектральные отсчеты $\dot{S}_{qi}^*(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$, в i -х элементах дальности подаются на вход алгоритмов оценивания координат, которые в соответствии с тем или иным методом находят оценки искомым координат x_{ij}, y_{ij}, z_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{j_1, j_n}$, в прямоугольной системе наблюдателя. Совокупность полученных координат передается на алгоритмы формирования и отображения 3D-РЛИ.

Спектральные отсчеты $\dot{S}_q(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$ (символы i и “*” опустим), подчинены модели:

$$\dot{S}_q(f_j) = \gamma_q \sum_{k=1}^{m_j} U(\varphi_{j_k}, \theta_{j_k}) G(\varphi_{j_k}, \theta_{j_k}) \exp\{i[(2\pi / \lambda)\delta_q + \xi_q]\} + \dot{p}_q(f_j), \quad (1)$$

$$\delta_q(x, y) = (x_q x_{j_k} + y_q y_{j_k}) / R,$$

$$\xi_q = -(4\pi / \lambda)R + \varepsilon(\varphi, \theta) + \eta_q(f_j), \quad \xi_q = \xi_q(f_j), \quad \gamma_q = \gamma_q(f_j).$$

Каждой j -й частоте f_j в (1) соответствуют m_j элементов отражения земной поверхности с координатами центров $x_{j_k}, y_{j_k}, z_{j_k}$, сигналы от которых суммируются. В частном случае, определяющем характер гладкой поверхности, принимается $m_j = 1 \forall j = \overline{j_1, j_n}$ и модель (1) упрощается:

$$\dot{S}_q(f_j) = \gamma_q U(\varphi_j, \theta_j) G(\varphi_j, \theta_j) \exp\{i[(2\pi / \lambda)\delta_q + \xi_q]\} + \dot{p}_q(f_j), \quad (2)$$

$$\delta_q(x, y) = (x_q x + y_q y) / R.$$

В моделях (1) и (2) используются следующие обозначения:

γ_q – мультипликативная помеха, описывающая амплитудную нестабильность; $U(\varphi, \theta)$ – амплитуда сигнала в координатах азимута φ и угла места θ ; $G(\varphi, \theta)$ – амплитудная характеристика ДНА; i – мнимая единица; λ – длина волны; δ_q – запаздывание или опережение по фазе отраженного сигнала при приеме его в q -м приемном элементе антенны по сравнению с

центром антенны, зависящее от искоемых координат x, y центра элемента отражения, дальности R и известных координат x_q, y_q центра q -го приемного элемента (величина δ_q получается как отклонение плоского фронта волны, достигшей центра антенны, от центра q -го приемного элемента АР); ξ_q – составляющая фазы, зависящая от R и случайных величин $\varepsilon(\varphi, \theta)$ и $\eta_q(f_j)$, где ε меняет свои значения по равномерному закону на $[0, 2\pi]$ при переходе от одного φ -го, θ -го элемента отражения поверхности к другому, а η_q представляет собой нормальный белый фазовый шум, меняющий свои значения по j и q ; $\dot{p}_q(f_j)$ – аддитивный комплексный нормальный белый шум.

Искомые координаты x, y, z центра элемента отражения связаны с доплеровской частотой f_j уравнением изодопы:

$$v_x x + v_y y + v_z z = R (\lambda / 2v) f_j, \quad (3)$$

где v – величина скорости носителя РЛС; v_x, v_y, v_z – координаты орта \vec{v}^0 вектора скорости \vec{v} . Для узкой ДНА принимается $z \approx R$ и (3) упрощается:

$$v_x x + v_y y = c_j, \quad c_j = R [(\lambda / 2v) f_j - v_z]. \quad (4)$$

Из (4) вытекают практически важные случаи переднебокового обзора, когда $\vec{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$, и координата x определяется доплеровской частотой: $x = c_j / v_x$, а также передненижнего обзора, когда $\vec{v}^0 = (0, v_y, v_z)$ и $y = c_j / v_y$.

Математически задача заключается в нахождении оценок $\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij}$ координат x, y, z центров элементов отражения поверхности независимо в каждом i -м элементе разрешения дальности ($i = \overline{1, m}$) на j -й доплеровской частоте ($j = \overline{1, n}$) на основе совокупности Q комплексных измерений $\dot{s}_{qi}(f_j)$, $q = \overline{1, Q}$ и моделей (1), (2).

Характеристика точности оценивания. В моделях (1), (2) элементы отражения рассматриваются как элементарные отражатели – точки в пространстве. Поэтому точность оценок $\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij}$ характеризуется евклидовым расстоянием между точкой $M(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$ – центром i -го, j -го элемента отражения – и найденной точкой $\hat{M}(\hat{x}_{ij}, \hat{y}_{ij}, \hat{z}_{ij})$, которое принимается за ошибку оценивания: $\Delta = \|M - \hat{M}\|$. В статистическом смысле мерой точности будут: средняя ошибка Δ_{cp} , СКО ошибки σ_Δ и доверительный интервал ошибок.

Во второй главе разработаны алгоритмы оценивания пространственных координат элементов поверхности, основанные на разных подходах к обработке выделенных спектральных отсчетов. При этом используются моноимпульсный метод (алгоритм 1), фазовый метод (алгоритм 2), метод восстановления (алгоритм 3) и метод максимума амплитуды (алгоритм 4).

В алгоритме 1 координаты x_q, y_q центров 4-х приемных АР расположены в точках $M_1(d, d), M_2(-d, d), M_3(-d, -d), M_4(d, -d)$. С учетом этого для каждой четверки измерений $\dot{s}_q, q = 1, 4$, из (2) получаем:

$$\begin{aligned} \dot{s}_1 &= U \exp\{i\xi\} \exp\{i\mu(x+y)\} + \dot{p}_1, \quad \dot{s}_2 = U \exp\{i\xi\} \exp\{i\mu(-x+y)\} + \dot{p}_2 \\ \dot{s}_3 &= U \exp\{i\xi\} \exp\{i\mu(-x-y)\} + \dot{p}_3, \quad \dot{s}_4 = U \exp\{i\xi\} \exp\{i\mu(x-y)\} + \dot{p}_4, \end{aligned}$$

где $\mu = 2\pi d/(R\lambda)$. При этом выполняются следующие операции:

1. Определяются суммарный и разностные сигналы:

$$\dot{S}_z = \dot{s}_1 + \dot{s}_2 + \dot{s}_3 + \dot{s}_4, \quad \dot{S}_x = \dot{s}_2 + \dot{s}_3 - \dot{s}_1 - \dot{s}_4, \quad \dot{S}_y = \dot{s}_3 + \dot{s}_4 - \dot{s}_1 - \dot{s}_2.$$

2. Вычисляются пеленгационные характеристики:

$$U_x = -\text{Im}\{\dot{S}_x\} / \text{Re}\{\dot{S}_z\}, \quad U_y = -\text{Im}\{\dot{S}_y\} / \text{Re}\{\dot{S}_z\}.$$

3. Находятся оценки координат для i -х элементов дальности и j -х частот:

$$\hat{x}_{ij} = k U_x, \quad \hat{y}_{ij} = k U_y, \quad \hat{z}_{ij} = \sqrt{R_i^2 - \hat{x}_{ij}^2 - \hat{y}_{ij}^2}, \quad k_1 = 1 / \mu.$$

4. Операции 1 – 3 повторяются для всех i -х элементов дальности ($i = 1, m$) и j -х элементов разрешения доплеровской частоты ($j = 1, n$).

Совокупность полученных оценок передается на алгоритм отображения 3D-РЛИ или алгоритм формирования матрицы высот.

Алгоритм прост в реализации, применим в любом режиме наблюдения, однако работает на линейной части пеленгационной характеристики при достаточно большом отношении сигнал-шум, зависит от амплитудных и фазовых искажений. Все это диктует поиск более точных и помехозащищенных алгоритмов.

В алгоритме 2 приемные элементы АР расположены на плоскости в точках с координатами: $M_1(d, 0), M_2(0, d), M_3(-d, 0), M_4(0, -d)$. Для каждой четверки комплексных измерений $\dot{s}_q, q = 1, 4$, их фазы ψ_q зависят от x, y :

$$\psi_q = \arg\{\dot{s}_q(f_j)\} = (2\pi/\lambda)\delta_q + \xi_q = 2\pi/(R\lambda)(x_q x + y_q y) + \xi_q.$$

При оценивании искомым координат x, y выполняется следующее:

1. Измеряются аргументы комплексных величин \dot{s}_q – фазы

$\psi_q = \arg\{\dot{s}_q\}, q = 1, Q$, с помощью фазового детектора.

2. Вычисляются разности фаз:

$$\Delta\psi_X = \psi_1 - \psi_2, \quad \Delta\psi_Y = \psi_2 - \psi_4.$$

3. Находятся оценки координат для i -х элементов дальности и j -х частот:

$$\hat{x}_{ij} = k \Delta\psi_X, \quad \hat{y}_{ij} = k \Delta\psi_Y, \quad \hat{z}_{ij} = \sqrt{R_i^2 - \hat{x}_{ij}^2 - \hat{y}_{ij}^2}, \quad k = R\lambda / (4\pi d).$$

4. Операции п.п. 1 – 3 повторяются для всех значений $i = \overline{1, m}$ и $j = \overline{1, n}$.

Алгоритм 2 отличается простотой реализации и применим для любого режима наблюдения. В частном случае при $\vec{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$, когда координата x определяется доплеровской частотой, для оценки y можно задействовать только два измерительных канала (что отличает его от алгоритма 1).

Алгоритм 2 рассчитан на один элементарный отражатель на каждой доплеровской частоте (так, как алгоритм 1). При наличии нескольких элементарных отражателей на одной частоте оценке подлежит центр тяжести этой группы и точность оценивания каждого отражателя снижается.

В алгоритме 3 для матричной АР сделана попытка избавиться от указанного недостатка за счет получения распределения комплексных амплитуд вдоль изодопы, уравнение (4) которой известно в зависимости от частоты и положения вектора скорости. Рассматривался частный случай переднебокового обзора, когда положение вектора скорости $\vec{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$ и частота f_j из (4) определяют координату x : $x_j = c_j / v_x$, $c_j = R [(\lambda / 2v) f_j - v_z]$, тогда оценке подлежит одна координата y . Алгоритм выполняет следующие операции:

1. Для матричной формы записи системы уравнений (1) в k -х элементах дискретизации y_k координаты y :

$$S = GU + P,$$

где S – Q -вектор измерений \dot{s}_q ; G – $Q \times K$ -матрица коэффициентов ДНА \dot{G}_{gk} : $\dot{G}_{gk} = G(\varphi_j, \theta_k) \exp\{i(2\pi / \lambda) \delta_q(x_j, y_k)\}$, U – K -вектор искоемых амплитуд \dot{U}_k ; P – Q -вектор шумов \dot{p}_q ;

заранее для нескольких j -х частот находится $K \times Q$ – псевдообратная матрица G^+ .

2. Для полученного вектора S измерений вычисляется вектор оценок

$$\hat{U} : \quad \hat{U} = G^+ S, \quad (5)$$

оптимальный по критерию минимума нормы $\|S - GU\|$.

Элементами вектора \hat{U} являются оценки комплексных амплитуд \hat{U}_k для k -х элементов дискретизации. Практически (5) сводится к умножению

комплексных измерений \hat{s}_q на известные комплексные весовые коэффициенты \hat{w}_{qk} – элементы матрицы G^+ и суммированию.

В соответствии с методом максимального правдоподобия наибольшими амплитудами должны обладать те k -е оценки \hat{U}_k , координаты которых y_k соответствуют наблюдениям \hat{s}_q , $q = \overline{1, Q}$.

3. Выбирается k -я оценка с максимальной амплитудой: $\max |\hat{U}_k|$. Ей соответствует оценка координаты y : $\hat{y} = y_k$. Для более точного оценивания возможна интерполяция полученного распределения амплитуд. Оценки координат x, y, z на множестве i -х элементов дальности и j -х доплеровских частот будут:

$$\hat{x}_{ij} = c_j / v_x, \quad \hat{y}_{ij} = y_k, \quad \hat{z}_{ij} = \sqrt{R^2 - \hat{x}_{ij}^2 - \hat{y}_{ij}^2}, \quad i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Замечание. Алгоритм 3 в отличие от алгоритмов 1 и 2 характеризуется большой памятью, необходимой для хранения весовых коэффициентов \hat{w}_{qk} , и большим количеством приемных элементов ($Q = 15 - 20$) плоской

АР. Для режима наблюдения при $\vec{v}^0 = (0, v_y, v_z)$ алгоритм оценивает одну координату x . При этом координата y зависит от частоты f_j и v_y :

$$y_j = c_j / v_y, \quad c_j = R [(\lambda / 2v) f_j - v_z].$$

Увеличение числа приемных элементов АР и применение более сложного метода восстановления комплексных амплитуд не привели к желаемому результату: алгоритм 3 показал в дальнейшем низкую точность оценивания координат.

Алгоритм 4, подобно алгоритму 3, ориентирован на переднебоковой обзор, когда координата x определяется положением вектора $\vec{v}^0 = (v_x, 0, v_z)$ и частотой f_j , и требуется найти оценку одной координаты y . Алгоритм основан на получении распределения амплитуд вдоль оси ou с помощью метода, подобного методу сканирования лучом и фиксации углового положения луча с максимальной амплитудой отраженного сигнала. Отличие заключается в том, что вместо сканирования используются приемные элементы АР с разным направлением биссектрис ДН. Применяется линейная АР, центры приемных элементов которой расположены на оси ou в Q точках с координатами $x_q = 0, y_q = \pm i d, i = \overline{1, n_y}, Q = 2n_y + 1$. Биссектрисы ДН q -х приемных элементов АР смещены по углу места θ на величину θ_{0q} таким образом, чтобы амплитудная характеристика ДН каждого q -го канала зависела от углового направления θ_{0q} :

$$D_q(\varphi, \theta) = \exp\{-k_0(\varphi^2 / \Delta_\varphi^2 + (\theta - \theta_{0q})^2 / \Delta_\theta^2)\}. \quad (6)$$

Практически это достигается за счет пространственной ориентации q -го элемента АР по углу места в направлении θ_{0q} . Возможно электронное управление лучом. Величины θ_{0q} задаются на промежутке $[-\Delta_\theta / 2, \Delta_\theta / 2]$ с шагом $h_\theta = \Delta_\theta / (Q - 1)$. Алгоритм оценивания координат следующий:

1. Для полученных измерений \dot{s}_q , $q = \overline{1, Q}$, вычисляются модули $|\dot{s}_q|$, которые дают распределение амплитуд $A_q = |\dot{s}_q|$, $q = \overline{1, Q}$, вдоль оси ou с шагом дискретизации $h_y = R h_\theta$.

2. В последовательности $\{A_q\}$ выбирается максимальная по q амплитуда $A_{\max} = \max_q A_q$. Соответствующий A_{\max} номер q дает начальную оценку координаты y с точностью, определяемой величиной линейного шага h_y :

$$\hat{y}_0 = -R \Delta_\theta / 2 + h_y (q - 1).$$

3. Оценка \hat{y}_0 уточняется методом интерполяции: находится смещение Δy в сторону точки максимума и для i -го элемента дальности и j -й частоты вычисляется уточненная оценка $\hat{y}_{ij} = \hat{y}_0 + \Delta y$. Оценки координат x , z вычисляются так же, как в других алгоритмах для $i = \overline{1, m}$ и $j = \overline{1, n}$:

$$\hat{x}_{ij} = c_j / v_x, \quad \hat{z}_{ij} = \sqrt{R^2 - \hat{x}_{ij}^2 - \hat{y}_{ij}^2}, \quad \text{где } c_j = R [(\lambda / 2\nu) f_j - v_z].$$

Замечание. В сравнении с алгоритмом 3, алгоритм 4 прост в реализации, отличается меньшим числом измерительных каналов и не требует памяти для запоминания значений амплитудных ДН.

Возможно применение алгоритма в режиме передненижнего обзора, когда вектор скорости лежит в вертикальной плоскости uoz . При этом частота f_j определяет координату y_j по формуле: $y_j = c_j / v_y$, где $c_j = R [(\lambda / 2\nu) f_j - v_z]$, и оценке подлежит одна координата x .

Алгоритм 4 показал хорошие результаты по точности при наличии нескольких элементарных отражателей на каждой частоте для частных случаев переднебокового и передненижнего обзоров. К недостатку алгоритма 4 можно отнести его чувствительность к ошибкам измерения положения вектора скорости носителя РЛС и величины скорости, что не являлось принципиальным для алгоритмов 1 и 2. Возможно комбинированное (адаптивное) применение алгоритмов 2 и 4 как наиболее точных в определенных условиях наблюдения.

В третьей главе описываются условия компьютерного моделирования работы предложенных алгоритмов, исследуется точность работы алгоритмов, производится оценка их вычислительной сложности, проводится сравнительный анализ с известными подходами и излагаются аспекты технической реализации.

Свойства предложенных алгоритмов изучались методом компьютерного моделирования. Исследование точности работы алгоритмов с помощью разработанных компьютерных программ проводилось в условиях различного рода помех: аддитивного шума, мультипликативной помехи, фазового шума, изменения скорости движения, при наличии точечных и протяжённых элементов отражения, а также при разных режимах наблюдения: переднебоковом (вектор скорости в горизонтальной плоскости), передненижнем (вектор скорости в вертикальной плоскости) и общем (вектор скорости составляет одинаковые углы с осями). В описании условий моделирования приводятся конкретные параметры системы наблюдения и задается модель участка земной поверхности.

На рисунках 3 – 8 показаны следующие экспериментальные зависимости, полученные в режиме переднебокового обзора для алгоритмов 1 – 4: рисунок 3 – средняя ошибка оценивания координат в зависимости от уровня сигнал-шум (в дБ); рисунок 4 – средняя ошибка в зависимости от СКО мультипликативной помехи; рисунок 5 – средняя ошибка в зависимости от СКО фазового шума; рисунок 6 – средняя ошибка в зависимости от количества точек отражения на каждой частоте; рисунки 7 и 8 – сложность алгоритмов в тактах в зависимости от числа доплеровских частот.

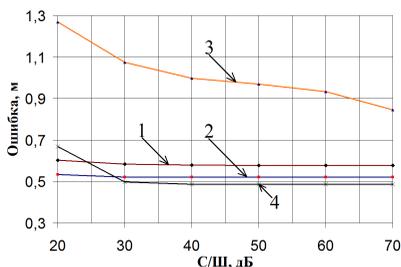


Рисунок 3 – Ошибка влияния аддитивного шум

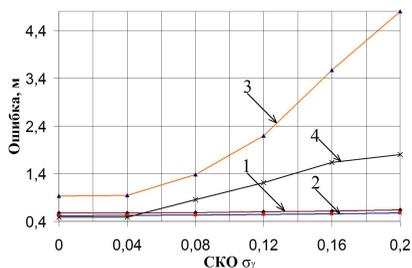


Рисунок 4 – Ошибка влияния мультипликативной помехи

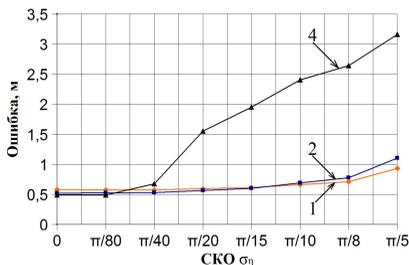


Рисунок 5 – Ошибка влияния фазового шума

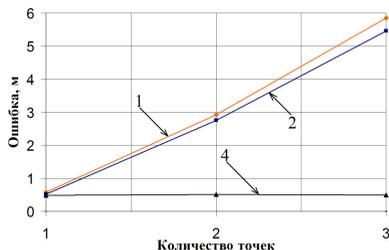


Рисунок 6 – Ошибка влияния количества точек

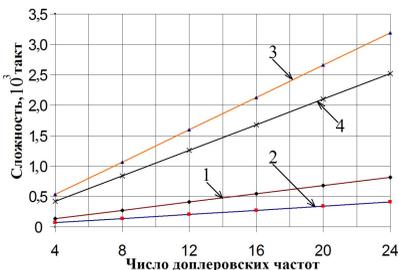


Рисунок 7 – Линейная сложность в одном элементе дальности

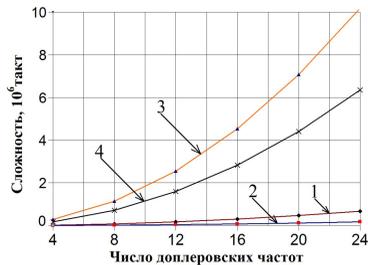


Рисунок 8 – Квадратичная сложность на множестве элементов

Анализ результатов моделирования подтверждает свойства предложенных алгоритмов: алгоритмы 2 и 4 отличаются от остальных повышенной точностью в определенных режимах наблюдения. Рекомендуется их комбинированное применение. Сложность разработанных алгоритмов линейно возрастает с увеличением числа частот при параллельной обработке сигналов в элементах дальности и имеет квадратичную зависимость при последовательной обработке в элементах дальности.

Использование нескольких пространственных каналов имеет очевидное преимущество по сравнению с одним каналом первичной обработки. Так, на дальности 1 км при ширине ДНА 2^0 максимальная погрешность оценки положения элементарного отражателя в системе с одним пространственным каналом составляет 0,7 (при наклоне изодоп 45^0) от половины линейной ширины ДНА – 12 м. Предлагаемые алгоритмы позволяют измерить положение с погрешностью до 1 м (с учетом доверительного интервала ошибок оценивания, найденного по закону Рэля). Следовательно, точность удастся повысить в 10 раз.

Для оценки положительного эффекта по сравнению с альтернативными подходами рассматривались такие методы, как пространственное восстановление полей отражения, формирование матрицы высот за счет сканирования по углу места, применение интерферометрической системы, измерение высоты с помощью радиолокационной тени. По каждому подходу дана оценка сложности реализации соответствующего алгоритма. Показано, что при точности оценивания, соизмеримой с точностью предлагаемых алгоритмов (за исключением высокоточного интерферометрического метода), сложность реализации альтернативных алгоритмов как минимум в 5 раз выше сложности предлагаемых.

Произведена оценка затрат на реализацию предложенных алгоритмов с помощью современной элементной базы вычислительной техники, которая показала возможность реализации алгоритмов в доплеровских системах радиовидения в реальном масштабе времени.

В приложении к диссертации содержатся акт внедрения, блок-схемы алгоритмов и программы компьютерного моделирования.

В заключении подведены итоги диссертационной работы. Решена актуальная научно-техническая задача – разработка алгоритмов оценивания пространственных координат элементов земной поверхности с целью повышения эффективности функционирования доплеровских систем радиовидения. Основные новые научные и практические результаты работы следующие:

1. Разработана математическая модель системы наблюдения, отличающаяся учетом нескольких пространственных каналов в доплеровской РЛС, что позволяет на её основе разрабатывать более точные и быстродействующие алгоритмы оценивания координат элементов земной поверхности.

2. Сформулирована математическая постановка задачи оценивания пространственных координат элементов поверхности и предложен алгоритм выделения спектральных отсчетов, полученных одновременно в нескольких пространственных каналах на одинаковых частотах, позволяющий найти несколько измерений для каждого элемента отражения поверхности.

3. Разработаны алгоритмы оценивания пространственных координат элементов поверхности, отличающиеся методами обработки выделенных спектральных отсчетов: моноимпульсным методом, фазовым методом, методом восстановления и методом максимума амплитуды, позволяющие оценивать положение центров элементов отражения с погрешностью до 1 м (с учетом доверительного интервала ошибок) на дальности 1 км, что в 10 раз точнее по сравнению с алгоритмами, учитывающими только один пространственный канал, а также увеличить быстродействие как минимум в 5 раз по сравнению с альтернативными алгоритмами.

Первые два алгоритма работают в любых режимах обзора, но ограничены наблюдением за гладкими поверхностями с одним элементарным отражателем на каждой частоте. Два других алгоритма работают в отдельных режимах для более сложных поверхностей и производят оценивание координат при наличии нескольких элементарных отражателей на каждой частоте с помощью полученного распределения амплитуд.

4. Проведено исследование точности работы алгоритмов с помощью разработанных компьютерных программ моделирования в условиях различного рода помех: аддитивного шума, мультипликативной помехи, фазового шума, изменения скорости движения, при наличии точечных и протяжённых элементов отражения, а также при разных режимах наблюдения: переднебокового и передненижнего обзоров. Алгоритм фазового метода при наблюдении гладких поверхностей показал наименьшую погрешность оценок, которая на 20 – 50 % меньше, чем у остальных алгоритмов. Алгоритм метода максимума амплитуды показал погрешность, как минимум в 5 раз меньшую по сравнению с остальными алгоритмами при наличии нескольких элементарных отражателей на каждой доплеровской частоте.

5. Произведена оценка вычислительной сложности предложенных алгоритмов, которая линейно возрастает с увеличением числа доплеровских

частот при параллельной обработке сигналов в элементах разрешения дальности и имеет квадратичную зависимость при последовательной обработке. При этом выявлено преимущество алгоритмов моноимпульсного и фазового методов: их сложность примерно в 1,7 раза меньше сложности алгоритма метода максимума амплитуды и в 6 раз ниже сложности алгоритма метода восстановления.

6. Проведен сравнительный анализ с альтернативными подходами, основанными на восстановлении полей отражения, формировании матрицы высот за счет сканирования по углу места, применении интерферометрической системы и измерении высоты рельефа местности с помощью радиолокационной тени. Сравнение показало преимущество разработанных алгоритмов в быстродействии – как минимум в 5 раз при близкой точности. Такая экономия вычислительных затрат позволяет на промежутке времени синтезирования РЛИ использовать дополнительные функции бортовой системы радиовидения.

7. Произведена оценка затрат на реализацию предложенных алгоритмов с помощью современной элементной базы вычислительной техники, которая показала возможность реализации разработанных алгоритмов в доплеровских системах радиовидения в реальном масштабе времени.

8. Дальнейшие исследования целесообразно проводить в направлении формирования трехмерных радиолокационных изображений.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Математическая модель системы формирования трехмерных радиоизображений на основе доплеровской фильтрации и оценивания координат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 2 (выпуск 44). С. 11 – 18.

2. Нгуен Ч.Т. Алгоритмы формирования трехмерных радиоизображений на основе доплеровской фильтрации и оценивания координат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2013. № 3 (выпуск 45). С. 27 – 31.

3. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Алгоритмы формирования трехмерного изображения земной поверхности в бортовой доплеровской РЛС // Успехи современной радиоэлектроники. 2014. № 10. С. 44 – 49.

4. Ключко В.К., Усачев А.Н., Нгуен Ч.Т. Алгоритм формирования изображений объектов на основе фазового метода измерения пространственных координат // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 3 (выпуск 49). Часть 1. С. 128 – 131.

5. Ключко В.К., Нгуен Ч.Т. Сравнительный анализ алгоритмов формирования трехмерных изображений земной поверхности в бортовой доплеровской РЛС // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 4 (выпуск 50). С. 11 – 17.

Патент

6. Патент RU 2 534 224 С1. Способ измерения координат элементов земной поверхности в бортовой четырехканальной доплеровской РЛС / В.К. Клочко, Ч.Т. Нгуен. Приоритет 25.04.2013. Опубл. 27.11.2014. Бюл. № 33.

Тезисы докладов на конференциях

7. Клочко В.К., Витязев С.В., Нгуен Ч.Т. Формирование трехмерных радиоизображений в системах доплеровской фильтрации // Тез. докл. «2nd Mediterranean Conference on Embedded Computing» (MECO–2013), 15 – 20 июня 2013. Харьков: ХНУР, 2013. С. 121 – 123.

8. Клочко В.К., Нгуен Ч.Т. Формирование трехмерного радиоизображения земной поверхности с помощью антенной решетки // Тез. докл. 6-й Междунар. Науч.–техн. конференции «Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика», 1 – 3 октября 2013. Рязань: РГРТУ, 2013. С. 147 – 149.

9. Клочко В.К., Нгуен Ч.Т. Сверхвидение в бортовых системах с антенной решеткой // Тез. докл. «11th IEEE East–West Design & Test Symposium» (EWDTS–2013), 27 – 30 сентября 2013. Харьков: ХНУР, 2013. С. 297 – 300.

10. Нгуен Ч.Т. Формирование трехмерных радиоизображений на основе доплеровской фильтрации и оценивания координат // Тез. докл. 15-й Международной конференции «Цифровая обработка сигналов и ее применение» (DSPA–2013), 27 – 29 марта 2013. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2013. Том 1. С. 394 – 397.

11. Нгуен Ч.Т. О возможности формирования трехмерного радиоизображения земной поверхности в бортовой доплеровской РЛС // Тез. докл. 4-й Всероссийской конференции (с международным участием) «Радиоэлектронные средства получения, обработки и визуализации информации» (РСПОВИ–2014), 24 – 26 сентября 2014. Нижний Новгород: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2014. С. 221 – 225.

Н г у е н Чунг Тхык

Алгоритмы оценивания пространственных
координат элементов земной поверхности
в доплеровских системах радиовидения

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 2015. Формат бумаги 60×84 1/16.

Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.

Тираж 100 экз. Заказ

Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.