

На правах рукописи



НГУЕН Конг Хо ай

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
ОТ ОБЪЕКТОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ
РАДИОСИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

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

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина».

Научный руководитель

Клочко Владимир Константинович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Автоматики и информационных технологий в управлении» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина», г. Рязань.

Официальные оппоненты:

Якименко Игорь Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроники и микропроцессорной техники» филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске;

Веремьев Владимир Иванович, кандидат технических наук, директор научно-исследовательского института систем прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций (НИИ «Прогноз») СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация

ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» (НГТУ), г. Нижний Новгород.

Защита состоится « 17 » сентября 2021 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.375.03 (Д 212.211.04) в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина», <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 года.

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

Г.В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние несколько десятилетий в области радиосистем развивается новое направление, основанное на использовании сигналов телевизионного вещания и радиосвязи в интересах изучения сигналов отражения от объектов, находящихся в радиополе действия телевизионных станций или станции радиосвязи. В результате воздействия радиополя на объекты возникают сигналы отражения, которые принимаются радиоприемниками, удаленными от радиопередающих станций, и обрабатываются в них. По результатам измерения параметров принятых сигналов находятся координаты положения объектов в пассивном режиме наблюдения системой приемников, отличающихся своей скрытностью, и, как следствие, неуязвимостью. Также разрабатываются полуактивные радиосистемы приема сигналов отражения от внешнего передатчика.

Примерами пассивных радиосистем, имеющихся в России и за рубежом, являются следующие: 85B6-A Vera (НПП Спец-Радио, Россия), Silent Sentry (Lockheed Martin, США), Celldar (BAE Systems и Roke Manor Research, Великобритания), Homeland Alerter 100 (Thales Air Systems, Франция), Cassidian (Германия), Vera NG (ERA, Чехия), Кольчуга-М (Топаз, Украина), DWL002 CETC International (Китай).

Особенность существующих пассивных радиосистем состоит в том, что они рассчитаны на большую дальность действия (сотни километров), что обусловлено как способом обработки радиосигналов, так и задачей, стоящей перед ними. Что касается полуактивных систем, рассчитанных преимущественно для бортовых носителей, то отсутствует в литературе подробное описание математических моделей и алгоритмов, лежащих в основе их работы, что затрудняет внедрение подобных систем в другие области применения.

В настоящее время ставится новая задача перед разработчиками пассивных и полуактивных радиосистем – определение параметров принимаемых радиоприемниками сигналов при наблюдении за неподвижными и движущимися объектами на малой дальности (сотни метров и несколько километров) с меняющихся наземных позиций. Решение данной задачи представляет большой интерес при создании различного рода охранных систем открытых территорий (стадионы, зоны отдыха, частные владения) от воздушных объектов в виде зондов и дронов. Решению данной задачи посвящена диссертационная работа.

Степень разработанности проблемы. Значительный вклад в развитие теории радиотехнических систем внесли Бакулев П. А., Гуткин Л.С., Мезин Б.К., Сосулин Ю.Г., Тихонов В.И., Фалькович С.Е., Черняк В.С., Ширман Я.Д., Ван Трис Г. Кукек И.С. и другие. В развитие цифровых методов обработки сигналов в радиосистемах значительный вклад внесли Витязев В.В., Денисов В.П., Кириллов С.Н., Шмидт Р.О., Ватса Д., Джонсон К. Р., Кейпон Дж., Марпл-мл. С.Л., Оппенгейм А., Робинсон Э. А. и другие.

Цель диссертации – Повышение эффективности работы многопозиционной радиосистемы оценивания параметров сигналов от объектов, позволяющей находить пространственные координаты объектов и векторы скорости их движения с повышенной точностью и надежностью.

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

1. Разработка способов и алгоритмов оценивания дальностей до объектов и взаимной ориентации многопозиционной системы радиоприемников с повышенной точностью определения пространственных координат объектов в условиях дислокаций приемников при отсутствии активных средств навигации.

2. Разработка способов и алгоритмов определения пространственных координат неподвижных и движущихся объектов, а также векторов скорости движущихся объектов, разрешимых по доплеровской частоте, с повышенной точностью.

3. Разработка алгоритмов определения траекторных параметров одновременно нескольких объектов в течение одного или большего числа периодов наблюдения.

4. Разработка структуры системы приемников с повышенной надежностью работы системы в условиях отказов приемников.

5. Исследование разработанных алгоритмов с получением оценок их точности и вычислительной сложности.

Методы исследования. Для решения перечисленных задач используется современный аппарат математического анализа, линейной алгебры, аналитической геометрии, матричной алгебры, теории цифровой обработки сигналов, теории оценивания и математической статистики, методы математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна выносимых на защиту результатов определяется новыми способами обработки радиосигналов при разработке алгоритмов взаимной ориентации приемников, оценивания пространственных координат и векторов скоростей объектов, защищенных патентами и публикациями в рецензируемых научно-технических изданиях.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Способ взаимной ориентации радиоприемников и алгоритмы его реализации позволяют за счет более точной взаимной ориентации приемников снизить СКО оценок пространственных координат объектов наблюдения в среднем в 3 раза в условиях моделирования по сравнению с альтернативным способом и алгоритмом его реализации.

2. Способы оценивания пространственных координат нескольких объектов многопозиционными сканирующей, а также не сканирующей доплеровской радиосистемами и алгоритмы их реализации позволяют снизить СКО оценок пространственных координат объектов за счет учета вектора скорости движения объектов до 2-х раз и дополнительно снизить СКО оценок до 4-х раз за счет ортогонального расположения линий визирования приемников в условиях моделирования по сравнению с альтернатив-

ными способами и алгоритмами их реализации.

3. Способ оценивания векторов скоростей нескольких объектов в многопозиционной доплеровской радиосистеме и алгоритмы его реализации позволяют снизить в 1,5 раза СКО оценок координат вектора скорости за счет учета всех его проекций и уменьшить СКО оценок примерно в N раз за счет увеличения числа N передатчиков в условиях моделирования по сравнению с альтернативным способом и алгоритмом его реализации.

4. Структуры многопозиционной системы стереопар четырех радиоприемников позволяют при вероятности отказа каждого приемника от 0,1 до 0,5 обеспечить оценки вероятности обнаружения всех нескольких объектов от 0,99 до 0,94 в условиях моделирования по сравнению с системой, состоящей из одной стереопары.

Практическая ценность работы. Разработанные способы и алгоритмы при их реализации в существующих пассивных и полуактивных радиосистемах позволяют повысить эффективность функционирования таких систем в плане повышения точности определения координат и векторов скоростей объектов, а также надежности работы системы.

Достоверность полученных результатов определяется соответствием математических моделей сигналов известным описаниям, корректностью математических преобразований на основе моделей сигналов при разработке алгоритмов, подтверждением работоспособности алгоритмов компьютерным моделированием, согласованием выводов аналитических и экспериментальных исследований.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены в учебный процесс Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина (РГРТУ) в виде программно-алгоритмического обеспечения методических указаний к практическим занятиям, предназначенных для магистрантов направлений магистратуры «Радиотехника» и «Управление в технических системах». Разработанные в диссертационной работе способы и алгоритмы внедрены в разработки компании ООО "Технология и торговля мегалайн" при создании систем охранного наблюдения в зонах промышленного кластера. Внедрения подтверждены соответствующими актами.

Апробация работы. Результаты исследований, составляющих основное содержание диссертации, докладывались на 5 международных и 2 всероссийских научно-технических конференциях:

- Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2018» (Рязань, 28 февраля – 02 марта 2018 г.);
- XX Международная конференция «Цифровая обработка сигналов и её применение — DSPA-2018» (Москва, 28 – 30 марта 2018 г.);
- Всероссийские открытые Армандовские чтения (Муром, 28 – 30 мая 2019 г.);
- II Всероссийская конференция «Современные технологии обработки сигналов – СТОС 2019» (Москва, 13 декабря 2019 г.);

- II Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019» (Рязань, 27 февраля – 01 марта 2019 г.);

- XXV Международная научно-техническая конференция «Радиолокация, навигация, связь – RLNC2019» (Воронеж, 16 – 19 апреля 2019 г.);

- III Международный научно-технический форум «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО-2020) (Рязань, 4 – 6 марта 2020 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК, 4 патента на изобретение, 8 тезисов докладов на международных и всероссийских конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Материал изложен на 136 страницах, включает 15 рисунков и 23 таблицы, а также 3 приложения. Библиографический список содержит 120 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы.

В первой главе сделан обзор методов обработки сигналов в существующих многопозиционных радиосистемах при определении положения источников излучения на основе измерения параметров принимаемых сигналов. Показана актуальность задачи обработки сигналов в радиосистеме позиционирования. Рассмотрена математическая модель сигнала в многопозиционной, в том числе доплеровской, радиосистеме. Даны постановка и формализация задач диссертационного исследования.

Многопозиционная система наблюдения за группой m малоразмерных объектов ($m \geq 1$) состоит из n приемников ($n \geq 2$), принимающих сигналы отражения от объектов в радиодиапазоне длин волн. Приемники ориентированы в единой системе координат и контролируют общую зону обзора (рисунок 1).

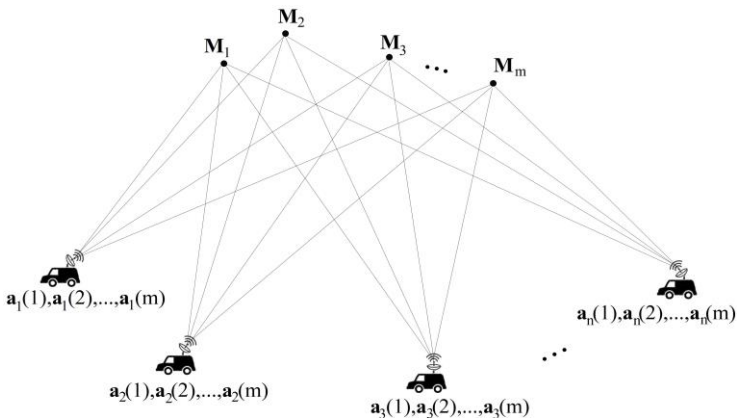


Рисунок 1 - Многопозиционная радиосистема

Результатом наблюдения являются угловые координаты азимута и угла места направлений на источники сигналов, которые пересчитываются в прямоугольные координаты ортов векторов направлений на источники. В радиосистемах для определения пространственных координат объектов используются различные методы. Для системы ближнего зондирования, которая является предметом данного исследования, эффективен метод стереопары, который обычно применяется для двух оптических приемников. Метод стереопары берется за основу для реализации в системе радиотехнических приемников совместно с радиотехническими методами определения угловых координат.

Рассмотрена математическая модель принимаемых сигналов в многопозиционной радиосистеме, позволяющая синтезировать алгоритмы оценивания угловых координат источников сигналов и координат ортов векторов направлений на источники, находить пространственные координаты и векторы скоростей объектов алгебраическими методами.

Предложен общий подход к решению поставленных задач с позиции предложенного критерия достаточного условия сопряжения векторов направлений на источники сигналов в стереопарах приемников.

Во второй главе *разработаны способы и алгоритмы взаимной ориентации приемников в радиосистеме при известных и неизвестных дальностях до контрольных объектов и дан анализ возникающих погрешностей при оценивании дальностей. Получены оценки погрешностей в сравнении с альтернативным алгоритмом. Предложены способы и алгоритмы оценивания дальностей до объектов и пространственного положения объектов на основе достаточного условия сопряжения ортов векторов направлений на источники сигналов в приемниках.*

Проблема при оценивании координат объектов возникает в том случае, когда матрица \mathbf{H} поворота осей и базовый вектор \mathbf{b} неизвестны или требуют уточнения из-за сбоя навигационной системы. Предлагается способ оценивания параметров матрицы \mathbf{H} и вектора \mathbf{b} , основанный на МНК-решении матричных уравнений. Он отличается тем, что позволяет находить параметры матрицы \mathbf{H} одновременно с поиском сопряженных пар векторов направлений на объекты по критерию сопряжения. Алгоритм реализации способа для двух приемников при наличии m контрольных объектов ($m \geq 3$) сводится к следующему.

1. Устанавливается базовый вектор $\mathbf{b} = [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^T$, соединяющий центр системы координат первого приемника с центром второго приемника (T – символ транспонирования).

2. Измеряются расстояния от центра каждого приемника до m контрольных i -х объектов – наклонные дальности $r_1(i)$ и $r_2(j)$, $i, j = \overline{1, m}$, $m \geq 3$ (например, с помощью лазерного дальномера).

3. Измеряются угловые координаты объектов и на их основе определяются орты $\mathbf{a}_1(i)$ и $\mathbf{a}_2(j)$ направлений на объекты в прямоугольных си-

стемах координат приемников.

4. Для измеренных дальностей $r_1(i)$ и $r_2(j)$ координаты ортов пересчитываются в координаты векторов: $\mathbf{M}_1(i) = r_1(i)\mathbf{a}_1(i) = [x_1(i) \ y_1(i) \ z_1(i)]^T$ и $\mathbf{M}_2(j) = r_2(j)\mathbf{a}_1(j) = [x_2(j) \ y_2(j) \ z_2(j)]^T$, $i, j = \overline{1, m}$.

5. Записывается уравнение сопряжения двух векторов, связывающее координаты i -го вектора с координатами j -го вектора с точностью до вектора ошибок сопряжения \mathbf{e}_i :

$$\mathbf{M}_1(i) - \mathbf{b} = \mathbf{H}\mathbf{M}_2(j_i) + \mathbf{e}_i = \mathbf{X}_{j_i}\mathbf{h} + \mathbf{e}_i, \quad i, j = \overline{1, m} \quad (1)$$

где номер j_i поставлен соответствие номеру i , \mathbf{h} - вектор искоемых параметров матрицы \mathbf{H} ,

$$\mathbf{X}_{j_i} = \begin{bmatrix} x_2(j_i) & y_2(j_i) & z_2(j_i) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_2(j_i) & y_2(j_i) & z_2(j_i) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_2(j_i) & y_2(j_i) & z_2(j_i) \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{h} = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ f_4 \ f_5 \ f_6 \ f_7 \ f_8 \ f_9]^T.$$

6. Далее рассматриваются $m!$ вариантов соединения m векторов первого и m векторов второго приемников в m неповторяющихся сопряженных пар $\mathbf{M}_1(i)$ и $\mathbf{M}_2(j_i)$ $i = \overline{1, m}$, $j_i \in \{1, 2, \dots, m\}$. Для каждого варианта на основе (1) составляется блочно-матричное уравнение

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X} \cdot \mathbf{h} + \mathbf{E} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1(1) - \mathbf{b} \\ \dots \\ \mathbf{M}_1(m) - \mathbf{b} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{j_1} \\ \dots \\ \mathbf{X}_{j_m} \end{bmatrix} \mathbf{h} + \mathbf{E},$$

где \mathbf{Y} - $(3m \times 1)$ -блочный вектор-столбец, составленный из $\mathbf{M}_1(i)$, $i = \overline{1, m}$, и \mathbf{b} ; \mathbf{X} - $(3m \times 9)$ -блочная матрица, составленная из матриц \mathbf{X}_{j_i} , $j_i = \overline{1, m}$; \mathbf{h} - (9×1) -вектор-столбец неизвестных девяти параметров; $\mathbf{E} = [e_1 \ \dots \ e_m]^T$ - $(3m \times 1)$ -блочный вектор-столбец, составленный из векторов ошибок \mathbf{e}_i .

7. Из условия минимума квадрата евклидовой нормы вектора ошибок $\|\mathbf{E}\|^2$ вычисляется вектор оценок параметров

$$\hat{\mathbf{h}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}.$$

8. Среди $m!$ вариантов соединения векторов в m сопряженных пар выбирается один "наилучший" вариант с наименьшим значением показателя $\|\hat{\mathbf{E}}\|^2$, имеющего смысл суммарного квадрата нормы вектора ошибок

$$J = \|\hat{\mathbf{E}}\|^2 = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{h}})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\hat{\mathbf{h}}). \quad (2)$$

9. Оценки $\hat{\mathbf{h}}$ помещаются в матрицу $\hat{\mathbf{H}}$ - оценку матрицы \mathbf{H} .

Найденная матрица $\hat{\mathbf{N}}$ в дальнейшем используется для оценивания пространственных координат произвольных объектов.

10. При неизвестном векторе \mathbf{b} в состав вектора \mathbf{h} дополнительно включаются неизвестные координаты $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ вектора \mathbf{b} , а в состав матрицы \mathbf{X}_{j_i} – три столбца $[1 \ 0 \ 0]^T$, $[0 \ 1 \ 0]^T$, $[0 \ 0 \ 1]^T$. При этом оцениваются двенадцать параметров по $m \geq 4$ парам векторов.

Способ оценивания дальностей до нескольких произвольных объектов алгоритмически заключается в следующем.

1. Для каждой пары ортов $\mathbf{a}_1(i)$ и $\mathbf{a}_2(j_i)$, поставленных в соответствие друг другу, находится вектор оценок дальностей:

$$\hat{\mathbf{R}}(i) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (3)$$

где $\hat{\mathbf{R}}(i) = [\hat{r}_1(i) \ \hat{r}_2(j_i)]^T$, $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{1x}(i) & -a'_{2x}(j_i) \\ a_{1y}(i) & -a'_{2y}(j_i) \\ a_{1z}(i) & -a'_{2z}(j_i) \end{bmatrix}$, $\mathbf{a}'_2(j_i) = \mathbf{H}\mathbf{a}_2(j_i)$,

отвечающий критерию минимума квадрата евклидовой нормы вектора ошибок сопряжения в данной i -й паре векторов

$$J_i = \|\mathbf{e}_i\|^2 = (\mathbf{A}\mathbf{R} - \mathbf{b})^T (\mathbf{A}\mathbf{R} - \mathbf{b}).$$

2. Из $m!$ вариантов соединения ортов в m неповторяющихся пар $\mathbf{a}_2(i)$ и $\mathbf{a}_1(j_i)$, $i = \overline{1, m}$, $j_i \in \{1, 2, \dots, m\}$, выбирается вариант с наименьшим значением суммарного показателя правильности сопряжения $J = \sum_{i=1}^m J_i$. Значениям частных показателей J_i в составе суммарного показателя J соответствуют оценки дальностей $\hat{r}_1(i)$ и $\hat{r}_2(j_i)$, $i = \overline{1, m}$.

3. На основе найденных оценок $\hat{r}_1(i)$ и $\hat{r}_2(j_i)$ вычисляются оценки пространственных координат m объектов в системах координат двух призмиков:

$$\hat{\mathbf{M}}_1(i) = \hat{r}_1(i) \cdot \mathbf{a}_1(i), \quad \hat{\mathbf{M}}_2(j_i) = \hat{r}_2(j_i) \cdot \mathbf{a}_2(j_i), \quad i = \overline{1, m}.$$

Данный алгоритм сравнивался с известным альтернативным алгоритмом, основанным на проверке выполнения необходимого условия сопряжения векторов $\mathbf{a}_1(i)$, $\mathbf{a}_2(j_i)$, $i = \overline{1, m}$, по критерию минимума квадратичной формы, содержащей квадраты ошибок смешанных произведений троек векторов $\mathbf{a}_1(i)$, $\mathbf{H}\mathbf{a}_2(j_i)$, \mathbf{b}_0 , $i = \overline{1, m}$, где \mathbf{b}_0 – орт вектора \mathbf{b} , с применением численных процедур линейной алгебры.

Недостатком альтернативного алгоритма является то, что условию компланарности могут отвечать векторы, не являющиеся сопряженными. Также требуются дополнительные вычислительные затраты на поиск собственных векторов квадратичной формы. Для устранения данных недо-

статков предложен модифицированный алгоритм, в котором необходимое условие сопряжения векторов в виде суммы модулей смешанных произведений троек векторов

$$I = \sum_{i=1}^m |(\mathbf{a}_1(i), \mathbf{H}\mathbf{a}_2(j), \mathbf{b})| \quad (4)$$

используется в качестве вспомогательного инструмента при выборе углов α, β, γ в составе матрицы \mathbf{H} по критерию минимума показателя (4). Окончательное решение принимается на основе достаточного условия сопряжения проверкой выполнения условия для показателя (2): $J \leq \gamma$, где γ - малое положительное число, выбираемое с учетом допустимых ошибок сопряжения. При этом требуется значительно меньшее количество вычислительных операций.

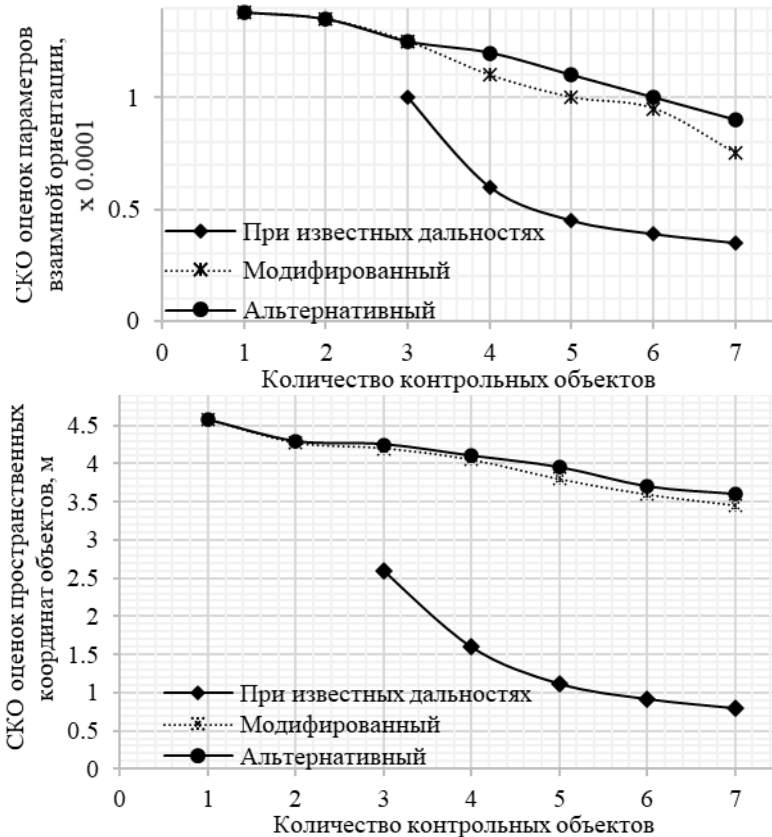


Рисунок 2 - Зависимости SCO оценок параметров взаимной ориентации и SCO оценок пространственных координат от количества контрольных объектов в эксперименте

Из результатов моделирования (рисунок 2) следует, что за счет более точной взаимной ориентации приемников при известных дальностях до контрольных объектов удастся снизить СКО оценок пространственных координат объектов наблюдения в среднем в 3 раза по сравнению с альтернативным алгоритмом нахождения параметров ориентации, основанным на необходимом условии сопряжения.

Точность оценок $\hat{\mathbf{R}} = [\hat{r}_1 \quad \hat{r}_2]^T$ в (3) для некоррелированных координат вектора \mathbf{e} ; ошибок сопряжения характеризуется ковариационной матрицей $\mathbf{K}_{\text{AR}} = \sigma_e^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ ошибок оценивания $\Delta \mathbf{R} = \hat{\mathbf{R}} - \mathbf{R}$, где σ_e^2 – дисперсия отдельной координаты вектора \mathbf{e} . С учетом того, что скалярное произведение ортов равняется косинусу угла между ними, выражение матрицы \mathbf{K}_{AR} для случаев $n = 2$ и $n = 3$ раскрывается как

$$\mathbf{K}_{\text{AR}} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \beta} \begin{bmatrix} 1 & \cos \beta \\ \cos \beta & 1 \end{bmatrix} \text{ при } n = 2, \quad (5)$$

$$\mathbf{K}_{\text{AR}} = \frac{\sigma_e^2}{\sin^2 \alpha + \sin^2 \beta} \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha & \cos \beta \\ \cos \alpha & 1 + \sin^2 \beta & \cos \alpha \cos \beta \\ \cos \beta & \cos \alpha \cos \beta & 1 + \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \text{ при } n = 3.$$

где β и α – углы между ортами $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ и $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_3$ соответственно.

Из (5) следует, что наименьшие дисперсии оценок дальностей получаются при ортогональном положении линий визирования приемников, что используется в дальнейшем в 3 и 4 главах.

В третьей главе решаются задачи обработки сигналов в сканирующей радиосистеме на основе двух подходов. Первый подход позволяет по данным одного периода сканирования находить алгебраически оценки пространственного положения объектов и скорости изменения их координат в системе трех приемников. Второй – по данным двух периодов сканирования находить те же оценки в системе двух радиоприемников. Разработан алгоритм нахождения траекторных параметров группы объектов в последовательности периодов сканирования двух приемников.

Пусть n приемников ($n \geq 3$) ориентированы в пространстве с помощью базовых векторов \mathbf{b}_k , $k = \overline{1, n}$, соединяющих центры k -х систем координат, ($k = \overline{2, n}$) с центром первого приемника, и матриц \mathbf{H}_k , $k = \overline{2, n}$, поворота осей координат k -й системы координат относительно первой. В процессе сканирования зоны обзора формируются орты $\mathbf{a}_k(i)$, $k = \overline{1, n}$, векторов направлений на i -е объекты $\mathbf{M}_k(i)$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$ (m – число объектов) в прямоугольных системах координат приемников. Фиксируются моменты времени образования ортов $t_k(i)$, $k = \overline{1, n}$, $i = \overline{1, m}$, которые в общем случае отличаются в силу различия пространственной ориентации

приемников.

Запишем достаточное условие сопряжения пар векторов $\mathbf{M}_1(i)$, $\mathbf{M}_k(j_i)$ в виде системы уравнений связи координат

$$\mathbf{M}_1(i) - \mathbf{H}_k \mathbf{M}_k(j_i) + \Delta \mathbf{M}_{1,k}(i, j_i) - \mathbf{b}_k = \mathbf{e}_k, \quad k = \overline{2, n}, \quad (6)$$

где $\Delta \mathbf{M}_{1,k}(i, j_i) = \mathbf{V}_1(i) \Delta t_k(i, j_i)$ представляет приращение вектора $\mathbf{M}_1(i)$ вследствие изменения его координат за время $\Delta t_k(i) = t_k(j_i) - t_1(i)$; $\mathbf{V}_1(i) = [v_{1x}(i) \quad v_{1y}(i) \quad v_{1z}(i)]^T$ – вектор скоростей изменения координат i -го объекта в системе первого приемника на момент времени $t_1(i)$; С учетом $\mathbf{M}_k(i) = r_k(i) \mathbf{a}_k(i)$ система уравнений (6) принимает вид

$$\begin{aligned} r_1(i) \mathbf{a}_1(i) - r_k(i) \mathbf{a}'_k(i) + \mathbf{V}_1(i) \Delta t_k(i) - \mathbf{b}_k = \mathbf{e}_k, \\ \mathbf{a}'_k(j_i) = \mathbf{H} \mathbf{a}_2(j_i), \quad k = \overline{2, n}. \end{aligned} \quad (7)$$

При $n = 3$ векторные уравнения (7) записываются в виде шести уравнений с шестью неизвестными $r_1(i), r_2(i), r_3(i), v_{1x}(i), v_{1y}(i), v_{1z}(i)$ в следующей матричной форме:

$$\mathbf{A} \mathbf{X} - \mathbf{B} = \mathbf{E} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a_{1x} & -a'_{2x} & 0 & \Delta t_2 & 0 & 0 \\ a_{1y} & -a'_{2y} & 0 & 0 & \Delta t_2 & 0 \\ a_{1z} & -a'_{2z} & 0 & 0 & 0 & \Delta t_2 \\ a_{1x} & 0 & -a'_{3x} & \Delta t_3 & 0 & 0 \\ a_{1y} & 0 & -a'_{3y} & 0 & \Delta t_3 & 0 \\ a_{1z} & 0 & -a'_{3z} & 0 & 0 & \Delta t_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ v_{1x} \\ v_{1y} \\ v_{1z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} b_{2x} \\ b_{2y} \\ b_{2z} \\ b_{3x} \\ b_{3y} \\ b_{3z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{2x} \\ e_{2y} \\ e_{2z} \\ e_{3x} \\ e_{3y} \\ e_{3z} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Из (8) находится вектор МНК-оценок дальностей и скоростей

$$\hat{\mathbf{X}}(i) = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}, \quad (9)$$

где $\hat{\mathbf{X}}(i) = [\hat{r}_1(i) \quad \hat{r}_2(i) \quad \hat{r}_3(i) \quad \hat{v}_{1x}(i) \quad \hat{v}_{1y}(i) \quad \hat{v}_{1z}(i)]^T$.

Вектор оценок координат пространственного положения объекта $\hat{\mathbf{M}}_1(i) = \hat{r}_1(i) \mathbf{a}_1(i)$ вместе с вектором оценок скорости изменения координат $\hat{\mathbf{V}}_1(i) = [\hat{v}_{1x}(i) \quad \hat{v}_{1y}(i) \quad \hat{v}_{1z}(i)]^T$ дает описание траекторных параметров объекта на момент времени $t_1(i)$ в первой системе координат.

Точность оценок $\hat{\mathbf{X}}(i)$ определяется ковариационной матрицей $\mathbf{K}_{\Delta \mathbf{X}} = \sigma_e^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}$ ошибок оценивания $\Delta \mathbf{X} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}$.

Второй подход – определение параметров движения объектов по двум периодам сканирования двумя приемниками ($n = 2$). Считается, что скорость за два периода не меняется. В первом периоде получены векторы $\mathbf{a}_1(i), \mathbf{a}_2(i)$, $i = \overline{1, m}$, во втором периоде – $\mathbf{a}_3(i), \mathbf{a}_4(i)$, $i = \overline{1, m}$. Уравнения

сопряжения можно записать для двух сопряженных пар $\mathbf{a}_1(i), \mathbf{a}_2(i)$ и $\mathbf{a}_1(i), \mathbf{a}_4(i)$ в векторной форме как

$$\begin{aligned} r_1(i)\mathbf{a}_1(i) - r_2(i)\mathbf{H}_2\mathbf{a}_2(i) + \mathbf{V}_1(i)\Delta t_2(i) - \mathbf{b}_2 &= \mathbf{e}_2, \\ r_1(i)\mathbf{a}_1(i) - r_4(i)\mathbf{H}_2\mathbf{a}_4(i) + \mathbf{V}_1(i)\Delta t_4(i) - \mathbf{b}_2 &= \mathbf{e}_4. \end{aligned} \quad (10)$$

Система (10) в матричной форме повторяет выражение (8), если у $\mathbf{a}'_3(i)$ и Δt_3 заменить индекс 3 на 4, а \mathbf{b}_3 заменить на \mathbf{b}_2 . По формуле (9) находятся оценки $\hat{\mathbf{X}}(i)$.

Недостатком второго подхода по сравнению с первым является предположение о неизменности скорости движения объектов за два периода сканирования, что может приводить к увеличению динамических ошибок по сравнению с одним периодом. Преимущество – наличие только двух приемников.

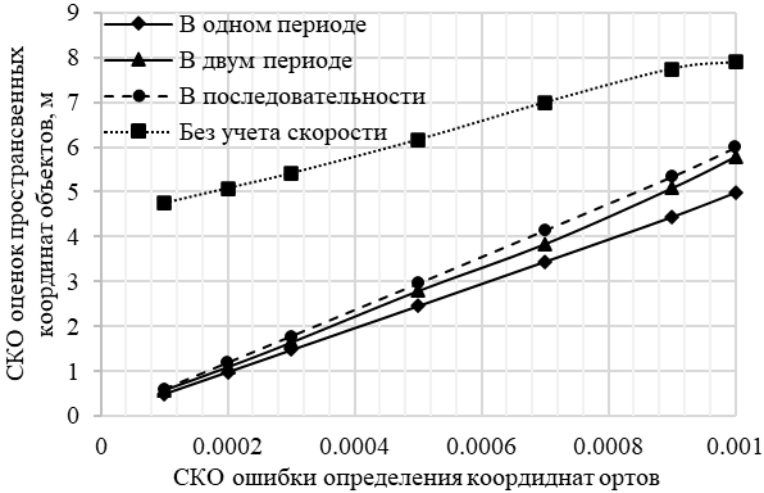


Рисунок 3 - Зависимость СКО оценок пространственных координат объектов от СКО ошибки определения координат ортов

Из результатов моделирования (рисунок 3) следует, что СКО оценок пространственных координат объектов за счет учета скорости движения объектов снижается в несколько раз.

Алгоритм оценивания параметров движения объектов в последовательности периодов сканирования отличается построением траекторий движения объектов во времени и сводится к следующему.

1. В последовательности k -х периодов сканирования ($k = \overline{1, N}$, N – число периодов) фиксируются полученные на момент времени $t_k(i)$ i -е оценки $\mathbf{M}_k(i)$, $\mathbf{V}_k(i)$, $i = \overline{1, \hat{m}_k}$, по числу оценок \hat{m}_k в k -м периоде.

2. Проверяется соответствие между i -ми оценками, полученными в

предыдущем $(k - 1)$ -м периоде, и j -ми оценками k -го периода вычислением показателя вида

$$J_{i,j} = c_1 \| \mathbf{M}_{k-1}^{\circ}(i) - \mathbf{M}_k(j) \| + c_2 \| \mathbf{V}_{k-1}(i) - \mathbf{V}_k(j) \| ,$$

где $\mathbf{M}_{k-1}^{\circ} = \mathbf{M}_{k-1}(i) + \mathbf{V}_{k-1}(i)[t_k(j) - t_{k-1}(i)]$ – экстраполированные на текущий период оценки координат; c_1 и c_2 – нормирующие множители.

3. Если выполняется неравенство $J_{i,j} \leq \gamma$, где γ – порог, выбираемый из эмпирических соображений, то i -е и j -е оценки объединяются в одну s -ю группу, и запоминается суммарный показатель группы $J_s(k) = J_s(k-1) + J_{i,j}$, $s = \overline{1, n_k}$, где n_k – число сформированных в k -м периоде групп, при начальном значении $J_s(1) = 0$, $s = \overline{1, \hat{m}_1}$.

4. Оценки $\mathbf{M}_k(j)$, $\mathbf{V}_k(j)$, не прошедшие через порог γ , фиксируются как начальные оценки не подтвержденных групп.

5. Если к последовательности, сформированной в $(k - 1)$ -м периоде, не присоединена ни одна из оценок k -го периода, то для нее фиксируется пропуск и осуществляется экстраполяция на следующий период при допустимом числе пропусков подряд.

6. По окончании указанных операций в N -м периоде из всех сформированных групп выделяются \hat{m} непересекающихся групп (\hat{m} – оценка числа объектов m) в порядке увеличения показателей $\bar{J}_s(N)$, нормированных по числу присоединенных оценок. Оценки групп могут дополнительно обрабатываться с целью уточнения траекторных параметров на основе более сложных динамических моделей.

В четвертой главе решаются задачи обработки сигналов в доплеровской системе позиционирования радиоприемников без сканирования. Также, как в третьей главе, реализованы два подхода: алгебраический, основанный на решении системы уравнений, и алгоритмический, основанный на выделении наиболее правдоподобных групп векторов в последовательности периодов обзора. Разработан алгоритм определения векторов скорости объектов в доплеровской системе, основанный на алгебраическом подходе. Предложены структуры системы приемников с повышенной надежностью и точностью работы системы в целом.

Особенность доплеровской системы заключается в возможности обнаружения нескольких движущихся объектов, различимых по доплеровской частоте, в пределах широкой ДНА порядка 30^0 без сканирования за короткий промежуток времени, длительность которого определяется скоростью работы вычислительного процессора. Это снимает необходимость запоминания моментов времени образования ортов направлений на объекты и позволяет привязывать все моменты времени к началу или концу каждого периода обзора.

В системе позиционирования n приёмников показатель сопряжения $(n - 1)$ пар ортов направления на объект записывается как

$$J = \sum_{k=2}^n \|\mathbf{e}_k\|^2 = \sum_{k=2}^n \|r_1 \mathbf{a}_1 - r_k \mathbf{H}_k \mathbf{a}_k - \mathbf{b}_k\|^2 = \sum_{k=2}^n (r_1 \mathbf{a}_1 - r_k \mathbf{H}_k \mathbf{a}_k - \mathbf{b}_k)^T (r_1 \mathbf{a}_1 - r_k \mathbf{H}_k \mathbf{a}_k - \mathbf{b}_k). \quad (11)$$

Необходимое условие существования экстремума показателя (11)

$$\partial J / \partial r_1 = 0, \quad \partial J / \partial r_2 = 0, \dots, \quad \partial J / \partial r_n = 0,$$

представляет систему n линейных уравнений относительно n искомых дальностей r_1, r_2, \dots, r_n , которая имеет следующий матричный вид:

$$\mathbf{AR} = \mathbf{B} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} (n-1)\mathbf{a}_1^T \mathbf{a}_1 & -\mathbf{a}_1^T \mathbf{H}_2 \mathbf{a}_2 & -\mathbf{a}_1^T \mathbf{H}_3 \mathbf{a}_3 & \dots & -\mathbf{a}_1^T \mathbf{H}_n \mathbf{a}_n \\ \mathbf{a}_1^T \mathbf{H}_2 \mathbf{a}_2 & -\mathbf{a}_2^T \mathbf{a}_2 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{a}_1^T \mathbf{H}_3 \mathbf{a}_3 & 0 & -\mathbf{a}_3^T \mathbf{a}_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{a}_1^T \mathbf{H}_n \mathbf{a}_n & 0 & 0 & \dots & -\mathbf{a}_n^T \mathbf{a}_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^T \sum_{k=2}^n \mathbf{b}_k \\ \mathbf{a}_2^T \mathbf{H}_2^T \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{a}_3^T \mathbf{H}_3^T \mathbf{b}_3 \\ \dots \\ \mathbf{a}_n^T \mathbf{H}_n^T \mathbf{b}_n \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Вектор $\hat{\mathbf{R}}$ оценок дальностей находится из (12) методом обратной матрицы:

$$\hat{\mathbf{R}} = [\hat{r}_1 \quad \hat{r}_2 \quad \hat{r}_3 \quad \dots \quad \hat{r}_n]^T = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{B}.$$

Разработан алгоритм определения траекторных параметров объектов в доплеровской радиосистеме в последовательности периодов наблюдения на основе оценок дальностей и координат положения.

Для нахождения оценок скорости движения объектов в доплеровской системе предлагается следующий подход.

Для каждого i -го найденного объекта рассмотрим соответствующие ему доплеровские сдвиги частот F_{ok} , измеренные в k -х приемниках ($k = \overline{1, n}$): $F_{ok} = (v_0 + v_k) / \lambda$, где λ – длина волны, $v_0 = n\mathbf{p}_{\hat{\mathbf{a}}_0}^T \vec{\mathbf{V}}$ и $v_k = n\mathbf{p}_{\hat{\mathbf{a}}_k}^T \vec{\mathbf{V}}$ – проекции вектора скорости $\vec{\mathbf{V}} = [v_x \quad v_y \quad v_z]^T$ на направления к объекту от передатчика и от k -го приемника соответственно.

Скалярные произведения векторов в матричной форме дают систему уравнений

$$\begin{aligned} v_{r0} &= \mathbf{V}^T \mathbf{a}'_0 = v_x a'_{0x} + v_y a'_{0y} + v_z a'_{0z}, \\ v_{rk} &= \mathbf{V}^T \mathbf{a}'_k = v_x a'_{kx} + v_y a'_{ky} + v_z a'_{kz}, \quad k = \overline{1, n} \end{aligned} \quad (13)$$

где $\mathbf{V} = [v_x \quad v_y \quad v_z]^T$, v_x, v_y, v_z координаты вектора скорости в системе координат 1-го приемника; $\mathbf{a}'_0 = \mathbf{H}_0 \mathbf{a}_0$ – орт вектора направления на объект в системе координат передатчика, пересчитанный в систему координат 1-го приемника с помощью матрицы поворота осей \mathbf{H}_0 в матричной фор-

ме; $\mathbf{a}'_k = \mathbf{H}_k \mathbf{a}_k$, $k = \overline{2, n}$ – орты векторов направлений на объект в системах координат k -х приемников, пересчитанные в систему координат 1-го приемника с помощью матриц поворота осей \mathbf{H}_k .

Сумма проекций вектора скорости в (13) связана с частотой F_{ok} :

$$\lambda F_{ok} = \mathbf{V}^T (\mathbf{a}'_0 + \mathbf{a}'_k), \quad k = \overline{1, n},$$

или в следующей матричной форме:

$$\mathbf{A}\mathbf{V} = \lambda \mathbf{F}_o \Leftrightarrow \begin{bmatrix} a'_{0x} + a'_{1x} & a'_{0y} + a'_{1y} & a'_{0z} + a'_{1z} \\ \dots & \dots & \dots \\ a'_{0x} + a'_{nx} & a'_{0y} + a'_{ny} & a'_{0z} + a'_{nz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} F_{o1} \\ \dots \\ F_{on} \end{bmatrix}.$$

По критерию минимума квадрата нормы ошибок измерения доплеровского сдвига частот находится вектор МНК-оценок

$$\hat{\mathbf{V}} = \lambda (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{F}_o. \quad (14)$$

Ковариационная матрица вектора ошибок оценок скорости найдется для некоррелированного вектора ошибок $\Delta \mathbf{F}_o$ с нулевым средним как

$$\mathbf{K}_{\Delta \mathbf{V}} = M[\Delta \mathbf{V} \Delta \mathbf{V}^T] = \lambda^2 \sigma_{\Delta F}^2 (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}, \quad (15)$$

где $\sigma_{\Delta F}^2$ – дисперсия ошибки измерения сдвига доплеровской частоты.

Введем показатель в виде корня усредненного следа матрицы (15):

$$\sigma[\Delta v_x] = \lambda \sigma_{\Delta F} \sqrt{(1/n) \text{Tr}(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}},$$

который представляет СКО оценки отдельной координаты вектора скорости.

В соответствии с изложенным подходом разработан алгоритм оценивания скоростей объектов в радиосистеме.

В качестве альтернативного подхода к нахождению оценок скорости рассмотрен алгоритм, в котором не учитывается проекция вектора скорости на направление к объекту от передатчика. При этом возникает ошибка $\Delta \mathbf{A}$ задания матрицы \mathbf{A} в (14), которая приводит к ошибке $\Delta \mathbf{V}$ определения вектора скорости. Показано преимущество (14).

Рассмотрен общий случай наличия нескольких передатчиков.

Для увеличения точности и надежности работы системы приемников предложены два подхода к организации структуры системы. При первом подходе параллельно работают N схем взаимодействия приемников. В каждой k -й схеме ($k = \overline{1, N}$) i -й приемник ($i = \overline{1, N}$) является основным и составляет $N - 1$ стереопар с остальными приемниками. По результатам обработки данных в стереопарах определяется избыточное количество векторов пространственных координат объектов, которое подвергается операциям кластеризации. Надежность такой организации системы определяется вероятностью p_N того, что при вероятности p безотказной работы каждого приемника хотя бы 2 из N приемников будут работать надежно:

$$p_N = \sum_{k=2}^n p_N(k) = 1 - p_N(0) - p_N(1) = 1 - (1-p)^N - Np(1-p)^{N-1}.$$

Во втором подходе близкий эффект достигается за счет выполнения операций в единой системе координат и предварительного распределения приемников по N парам с учетом ортогональности направлений на объекты в парах. Если происходит отказ в работе отдельного приемника в какой-либо паре, то продолжают работать остальные пары. Оставшийся в неработающей паре второй приемник соединяется с другим приемником с учетом ортогональности направлений на объекты. Тем самым образуется новая пара. По результатам моделирования даны количественные оценки повышения точности и надежности при системной работе приемников.

Из результатов моделирования (рисунок 4) следует, что при вероятности отказа каждого приемника от 0,1 до 0,5 оценка вероятности обнаружения всех объектов при системной работе 4-х приемников (надежность работы системы в целом) составляет от 0,99 до 0,94. При СКО ошибки измерения пространственной координаты от 0,1 м до 0,5 м и вероятности безотказной работы 0,1 вероятность обнаружения всех объектов при системной работе 4-х приемников составляет от 0,99 до 0,80.

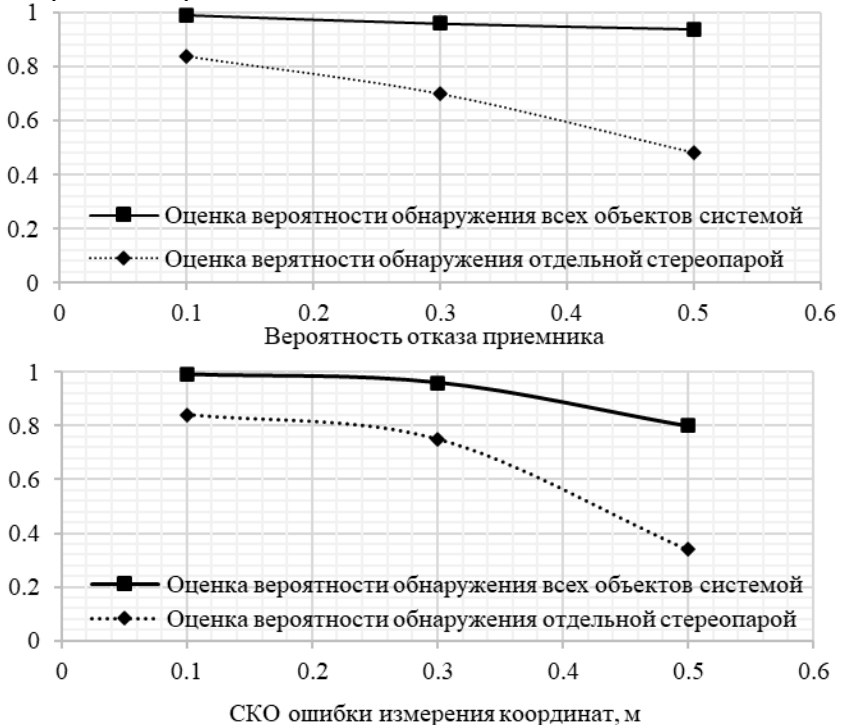


Рисунок 4 - Исследование точности и надежности системы

Аналитическое исследование ковариационной матрицы ошибок показывает (рисунок 5), что с увеличением числа передатчиков СКО оценки отдельной координаты вектора скорости снижается в несколько раз.

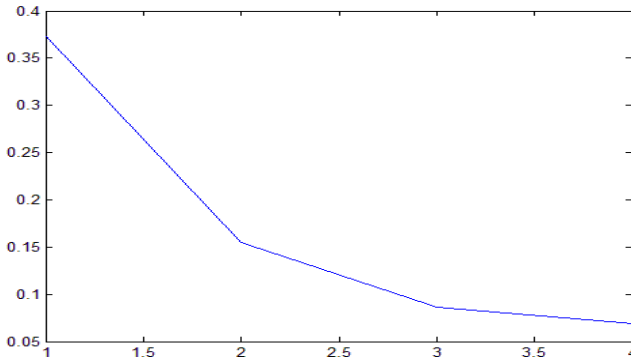


Рисунок 5 - Зависимость СКО оценки отдельной координаты вектора скорости от числа передатчиков

В заключении приводятся результаты диссертации, реализующие основные положения, выносимые на защиту.

1. Разработаны способ и алгоритм взаимной ориентации радиоприемников, отличающиеся поиском сопряженных векторов направлений на контрольные объекты при известных дальностях до объектов по критерию достаточного условия сопряжения и позволяющие за счет более точной взаимной ориентации приемников снизить СКО оценок пространственных координат объектов наблюдения в среднем в 3 раза по сравнению с альтернативным алгоритмом нахождения параметров ориентации, основанном на необходимом условии сопряжения.

2. Разработаны способы и алгоритмы оценивания пространственных координат нескольких объектов на основе измеряемых параметров сигналов, принимаемых многопозиционными сканирующей, а также не сканирующей доплеровской радиосистемами, отличающиеся соединением радиотехнического метода определения угловых координат объектов и алгебраического метода сопряжения векторов направлений на объекты в стереопарах приемников и позволяющие снизить СКО оценок пространственных координат объектов за счет учета вектора скорости движения объектов в 2 раза, а также снизить СКО оценок до 4 раз за счет ортогонального расположения линий визирования приемников.

3. Разработаны способ и алгоритм оценивания векторов скоростей нескольких объектов на основе измеряемых параметров сигналов, принимаемых многопозиционной доплеровской радиосистемой, отличающиеся алгебраическим методом учета проекций векторов скоростей как на направления приемников, так и на направление передатчика, а также увеличением числа передатчиков, позволяющие снизить в 1,5 раза СКО оце-

нок координат вектора скорости за счет учета всех его проекций и уменьшить СКО оценок примерно в N раз за счет увеличения числа N передатчиков.

4. Разработана структура многопозиционной системы 4 радиоприемников, отличающаяся организацией взаимосвязей приемников и позволяющая при вероятности отказа каждого приемника от 0,1 до 0,5 обеспечить вероятность обнаружения всех нескольких объектов от 0,99 до 0,94.

5. Разработано программное обеспечение разработанных алгоритмов.

6. Проведено аналитическое и численное исследование свойств алгоритмов.

В приложении содержатся титульные листы патентов, акты внедрения и блок-схемы разработанных алгоритмов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК

1. Клочко В. К., Гудков С.М., Нгуен К. Х. Задачи пространственно-временной обработки изображений объектов в пассивной системе радиовидения // Радиотехника. 2018. № 5. С. 78 – 85.

2. Клочко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Оценивание пространственных координат объектов в системах тепло- и радиовидения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. Выпуск 63. С. 27 – 33. DOI:10.21667/1995-4565-2018-63-1-27-33.

3. Клочко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Сравнительный анализ методов оценивания координат объектов в пассивной системе радиовидения // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2018. № 2. Выпуск 64. С. 23 – 28, DOI: 10.21667/1995-4565-2018-64-2-23-28.

4. Нгуен К.Х. Определение параметров движения объектов в пассивной сканирующей системе // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. Выпуск. 67. С. 19 – 23. DOI: 10.21667/1995-4565-2019-67-1-19-23.

5. Клочко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Анализ погрешностей при передаче координат объектов в системе совмещенных приемников // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2019. Выпуск 69. С. 33 – 41, DOI: 10.21667/1995-4565-2019-69-33-41.

6. Клочко В. К., Нгуен К. Х. Алгоритмы траекторного сопровождения нескольких объектов в пассивных системах радиовидения // Радиотехника. 2019. № 6. С. 168 – 174. DOI: 10.18127/j00338486-201905(6)-18.

7. Клочко В. К., Нгуен К. Х. Обнаружение движущихся объектов в многопозиционной системе радиоприемников // Радиотехника. 2019. Т. 83, № 11 (18). С. 47 – 56. DOI: 10/18127/j00338486-201911(18)-07.

Патенты

8. Патент RU 2 681 518 С1. Способ определения дальностей до объектов в пассивных системах видения / Клочко В. К., Нгуен К. Х. Приоритет 02.04.2018. Оpubл. 07.03.2019. Бюл. № 7.

9. Патент RU 2 682 382 С1. Способ ориентации систем координат

наблюдателей в пассивной системе видения / Ключко В. К., Нгуен К. Х. Приоритет 02.04.2018. Оpubл. 19.03.2019. Бюл. № 8.

10. Патент RU 2 700 275 C1. Способ определения пространственного положения, скорости и ускорения объекта в пассивной сканирующей системе видения / Ключко В. К., Нгуен К. Х. Приоритет 12.11.2018. Оpubл. 16.09.2019. Бюл. № 26.

11. Патент RU 2 726 321 C1. Способ определения пространственного положения и скорости в группе объектов системой доплеровских приемников / Ключко В. К., Нгуен К. Х. Приоритет 29.11.2019. Оpubл. 13.07.2020. Бюл. № 20.

Тезисы докладов на конференциях

12. Ключко В.К., Гудков С.М., Нгуен К. Х. Пространственно-временная обработка изображений объектов в пассивной системе радиовидения // 20-я Международная конференция DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 3. С. 44-49.

13. Ключко В.К., Нгуен К.Х. Повышение точности и надежности пассивной системы ближнего видения // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2020. Сборник трудов III Международного научно-технического форума: в 10 т. Рязань, 2020. С. 121-125

14. Ключко В.К., Нгуен К.Х. Алгоритмы пространственной обработки сигналов от движущихся объектов в пассивной радиосистеме // Современные технологии обработки сигналов. 2-я Всероссийская конференция: доклады конференции. 2019. С. 146-150.

15. Ключко В.К., Нгуен К.Х. Пассивная локация объектов ближнего зондирования: нахождение пространственных координат и траекторных параметров движения // Всероссийские открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2019. С. 308-313.

16. Ключко В.К., Гудков С.М., Нгуен К.Х. Пассивное обнаружение и сопровождение объектов в системах ближнего зондирования // Радиолокация, навигация, связь. Сборник трудов XXV Международной научно-технической конференции, посвященной 160-летию со дня рождения А.С. Попова. В 6-ти томах. 2019. С. 41-50.

17. Нгуен К.Х. Свойства алгоритмов оценивания параметров движения объектов в пассивной антенной системе // В сборнике: Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2019. Сборник трудов II международного научно-технического форума: в 10 томах. Под общей редакцией О.В. Миловзорова. 2019. С. 60-66.

18. Нгуен Х.К. Исследование алгоритмов оценивания пространственных координат объектов в двухпозиционной системе радиовидения // В сборнике: Актуальные вопросы в науке и практике // Сборник статей по материалам IX международной научно-практической конференции. В 2-х частях. 2018. С. 141-153.

19. Ключко В.К., Нгуен К.Х. Модель стереопары и совмещение изображений объектов в системах тепло- и радиовидения // Современные тех-

нологии в науке и образовании - СТНО-2018. Сборник трудов международного научно-технического форума: в 11 томах. Под общ. ред. О.В. Миловзорова.

НГУЕН Конг Хоай

**СПОСОБЫ И АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ
ОТ ОБЪЕКТОВ В МНОГОПОЗИЦИОННОЙ
РАДИОСИСТЕМЕ НАБЛЮДЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 25.06.2021. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага писчая. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0 Тираж 100 экз.

Рязанский радиотехнический государственный радиоуниверситет
имени В.Ф. Уткина
390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.
Редакционно-издательский центр РГРТУ.