

На правах рукописи

Ле Ван Донг

**Алгоритмы комплексирования информации в распределенных
радиофизических системах**

Специальность 1.3.4 – Радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Парфенов Владимир Иванович

Официальные оппоненты: **Сличенко Михаил Павлович,**
доктор технических наук, Акционерное общество
«Концерн «Созвездие», начальник сектора.

Паршин Александр Юрьевич,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Рязанский
государственный университет им. В.Ф. Уткина»,
кафедра радиотехнических устройства, доцент.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
г. Москва.

Защита состоится «09» июня 2022 г. в 15.10 на заседании диссертационного совета 24.2.288.05 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Воронежского государственного университета: <http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3400>

Автореферат разослан _____ 2022 года

Ученый секретарь диссертационного
совета 24.2.288.05



Степкин
Владислав Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. В последнее время в связи с усиливающимися мировыми тенденциями роста стоимости энергии, повышения эффективности и экологичности производства, обеспечения безопасности и т. д. уделяется большое внимание разработке и внедрению инновационных технологий, основанных на миниатюрных вычислительных и коммуникационных системах, в том числе, беспроводных сенсорных системах. Беспроводная сенсорная сеть (БСС) – это распределенная сеть, состоящая из множества распределённых миниатюрных локальных сенсоров, предназначенных для отслеживания физических явлений или условий окружающей среды, а также исполнительных устройств, объединенных между собой радиоканалом.

Благодаря своей высокой гибкости, расширенному охвату наблюдения, надежности, мобильности и энергетической эффективности, БСС находят широкое применение в разных сферах деятельности (промышленность, транспорт, робототехника, жилищно-коммунальное хозяйство и пр.); кроме того, они имеют высокий потенциал в области военного наблюдения, обеспечения безопасности, мониторинга окружающей среды и пр. Несмотря на разнообразное применение БСС во многих сферах деятельности, отметим, что общее функционирование централизованных БСС основывается на одинаковых принципах. Эти принципы заключаются в следующем: каждый локальный сенсор предварительно обрабатывает собственные наблюдения и извлекает информацию об интересующих объектах и явлениях, а затем передаёт эту информацию через канал связи в центральный узел (ЦУ), в котором и реализуется совместная обработка принятых данных и выносится окончательное решение на основе выбранного решающего правила. Учитывая существенное влияние различных факторов (таких, как шум окружающей среды, помехи, возможность выхода из строя сенсоров, наличие априорной неопределённости относительно параметров наблюдаемых объектов или явлений, климатические и погодные условия среды и т. д.) на функционирование БСС, актуальной становится проблема выбора оптимальных алгоритмов комплексирования информации в БСС с целью повышения эффективности их работы.

К типичным решаемым БСС задачам можно отнести задачи, связанные с обнаружением, оценением параметров или отслеживанием цели (объекта наблюдения). В частности, распределенное обнаружение – одна из наиболее важных задач при мониторинге. Существует большое количество научных работ, посвященных решению этой проблемы в различных условиях функционирования БСС. В классических работах Chair и Varshney, а также во многих последующих при синтезе комплексного алгоритма обычно учитываются лишь характеристики эффективности локальных сенсоров. Подобные алгоритмы являются оптимальными только в случае идеального канала связи между сенсорами и ЦУ. Однако, в связи с очевидно имеющимися энергетическими ограничениями в БСС, мощности передач сенсоров обычно невелики; кроме того, из-за наличия замираний, шумов окружающей среды и пр. неизбежно возникают ошибочные решения при передаче информации в канале связи. Учитывая эти особенности при решении задачи распределённого обнаружения, были предложены оптимальное решающее правило на основе алгоритма максимального правдоподобия (LR) и несколько неоптимальных решающих правил типа “maximum ratio combiner (MRC)”, “equal gain combiner (EGC)” и т.д., требующих знания мгновенного состояния канала. Чтобы избежать подобного требования, были предположены правило “LRT-CS”, основанное на статистике канала и решающее правило “LRT-BER”, учитывающее вероятность битовой ошибки (BER). Несмотря на существенные положительные аспекты вышеприведенных алгоритмов, необходимо отметить, что в этих и других литературных источниках для вычисления показателей эффективности принятия решения системой обычно используются либо аналитические выражения, полученные приближенно на основе применения центральной предельной теоремы, либо метод компьютерного моделирования. Наличие перечисленных недостатков также явилось одной из причин, выполненных автором диссертационной работы.

В связи со случайным характером наблюдаемых объектов при применении БСС актуальной является также задача обнаружения цели с неизвестными параметрами, в частности, ее координатами. Кроме того, следует отметить, что в существующих литературных источниках обычно практически никак не учитывается возможность выхода сенсоров из строя. В тоже время характерной особенностью БСС является миниатюризация сенсоров. Вследствие этого необходимо учитывать следующие факторы, влияющие на надежность сенсоров в процессе функционирования БСС: небольшой срок службы батарей, большая возможность физического уничтожения при их функционировании, в значительной степени, на открытой местности, и пр.

Еще одной существенной характерной особенностью вышеприведенных алгоритмов является то, что для формирования решающих правил принятия решения системой, как на уровне локальных сенсоров при вынесении локальных решений о наличии или отсутствии наблюдаемого объекта, так и в центральном узле при приеме данных о локальных решениях, обычно применяются жесткие схемы вынесения решений, в которых информация представляется в бинарной форме: бит «1» означает наличие обнаруживаемого объекта, а бит «0» означает отсутствие объекта. Такие решения называются жесткими (Hard Decision – HD). Несмотря на их простоту, подобные алгоритмы ограничивают эффективность принятия решения системой вследствие как потери части информации о наблюдаемых данных на уровне сенсоров, так и потери части информации о передаваемых локальных решениях на уровне ЦУ. Выходом может служить вынесение локальными сенсорами многобитных мягких решений, на основе которых были синтезированы различные решающие правила. При этом следует отметить, что для вычисления показателей эффективности подобных мягких решающих правил также отсутствуют теоретические аналитические выражения, позволяющие точно найти характеристики эффективности принятия решения системой.

В практических условиях потеря части информации о передаваемых локальных решениях часто обусловлена воздействием помех в канале связи. Очевидно, что для повышения эффективности приема в этих условиях при приеме локальных решений в ЦУ также целесообразно применять мягкую схему принятия решений с целью обеспечения ЦУ большим количеством информации о передаваемых данных. В итоге, действительно, актуализируется проблема синтеза и анализа алгоритма распределенного обнаружения на основе применения мягкой схемы вынесения решений в отдельных звеньях системы, либо во всех звеньях системы: как на уровне локальных сенсоров, так и в центральном узле в различных условиях функционирования.

Цель работы. Целью научного исследования является разработка теоретических основ построения алгоритмов распределенного обнаружения беспроводной сенсорной системы, а также совершенствование методов анализа алгоритмов совместной обработки информации в подобной системе с учетом особенности функционирования ее элементов, в том числе локальных сенсоров, канала связи и центрального узла. Для достижения поставленной цели в диссертационной работе были сформулированы и решены следующие **задачи**:

- синтез и анализ алгоритма комплексирования информации в БСС при решении задачи обнаружения объекта наблюдения с учетом воздействия помех в канале связи. Нахождение точных простых аналитических выражений для характеристик эффективности обнаружения;
- исследование влияния свойств окружающей среды на эффективность обнаружения БСС с использованием датчиков инфракрасного, звукового и вибрационного типа. Обоснованный выбор параметров системы в заданных условиях наблюдения для достижения требуемых характеристик обнаружения;
- синтез и анализ алгоритмов совместной обработки в БСС при охране контуров объектов в различных условиях функционирования системы. Сравнительный анализ характеристик обнаружения цели на контуре протяженного объекта при ее известном и неизвестном местоположении;

- синтез и анализ алгоритма распределённого обнаружения в БСС с учетом возможного выхода сенсоров из строя. Исследование эффективности функционирования синтезированного алгоритма распределённого обнаружения с учетом вероятности ненадежности сенсоров;

- синтез и анализ алгоритмов распределённого обнаружения на основе использования мягких решений в БСС. Исследование эффективности функционирования синтезированных алгоритмов распределенного обнаружения на основе использования мягких решений. Сравнительный анализ характеристик эффективности синтезированных мягких алгоритмов распределенного обнаружения по сравнению с жесткими алгоритмами.

Методы проведения исследований. При решении задачи распределенного обнаружения в БСС использовались методы теории проверки статистических гипотез для вынесения решения о наличии или отсутствии цели на наблюдаемом объекте. На основе применения метода интерполяции удалось получить коэффициенты пропускания излучения водяным паром и углекислым газом с помощью таблиц Пассмана и Лармора. Для математического описания контура охраняемых объектов применялся метод геометрического моделирования с использованием составных кривых Безье. При синтезе и анализе алгоритмов обнаружения цели с неизвестным положением применялся обобщенный метод максимального правдоподобия, а для нахождения статистических характеристик широко использовались методы компьютерного моделирования на ЭВМ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- синтезированы новые алгоритмы распределенного обнаружения с учетом возможных ошибок, возникающих при функционировании БСС, в частности, за счет помех, как на уровне локальных сенсоров, так и в канале радиосвязи. Впервые найдены точные простые теоретические выражения для характеристик эффективности (вероятности ошибок первого и второго рода всей системы) синтезированных алгоритмов;

- впервые выполнен анализ влияния факторов окружающей среды, в том числе географических и климатических условий, на эффективность обнаружения в БСС с использованием датчиков звукового, вибрационного и теплового типа;

- синтезированы новые алгоритмы распределённого обнаружения цели на контуре протяженных объектов в случае неидеального канала связи, а также с учетом вероятности ненадежности сенсоров при априорном неизвестном положении цели;

- впервые синтезированы алгоритмы распределенного обнаружения с учетом вероятности ненадежности сенсоров. Получены простые точные выражения для характеристик их эффективности и выполнен анализ влияния вероятности ненадежности сенсоров на эффективность системы;

- синтезированы новые алгоритмы распределенного обнаружения при применении мягких схем вынесения решений в различных условиях функционирования БСС. Для оценки степени эффективности синтезированных алгоритмов найдены точные аналитические рекуррентные выражения для суммарных вероятностей ошибок принятия решения при различных значениях вероятностей ошибок локальных сенсоров и радиоканала связи.

Теоретическая и практическая значимость. Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в развитии методологии статистической радиофизики применительно к задачам распределенного обнаружения беспроводной сенсорной системой, в том числе в совершенствовании методов синтеза и анализа алгоритма комплексирования информации в подобной системе с учетом характеристик эффективности функционирования ее элементов. Полученные в работе теоретические выражения для вероятностей ошибок всей системы позволяют точно найти и оценить ее эффективность обнаружения разработанными синтезированными алгоритмами. Показано, что использование алгоритмов обнаружения на основе комплексирования мягких решений позволяет повысить эффективность обнаружения по сравнению с жесткими алгоритмами. Приведенные теоретические и численные исследования представляют отдельный практический интерес не только при предварительном выборе типа сенсоров и размера сети БСС при ее эксплуатации, но и при выборе алгоритма распределенного обнаружения в соответствии с требованиями к пропускной способности канала связи при

заданной требуемой эффективности принятия решения системой. Практическая значимость результатов диссертационной работы состоит в возможности применения синтезированных в ней алгоритмов в различных радиофизических приложениях, например, в радиоразведке, охранных системах, при мониторинге за окружающей средой или производственными (и другими) процессами.

Основные результаты и положения, представляемые на защиту.

- методики синтеза алгоритмов комплексирования информации в БСС при решении задачи обнаружения объекта наблюдения с учетом воздействия помех в канале связи, обеспечивающие повышение эффективности обнаружения объектов совокупностью сенсоров;

- повышение эффективности обнаружения объектов в БСС датчиками инфракрасного, звукового и вибрационного типов может быть достигнуто путем выбора определенного частотного диапазона, границы которого существенно зависят от условий окружающей среды и метеобстановки;

- методики синтеза алгоритмов совместной обработки в БСС при охране контуров объектов, обеспечивающие повышенную, по сравнению с одноканальными системами, эффективность обнаружения цели при ее известном и неизвестном местоположении;

- методика синтеза алгоритма распределенного обнаружения объектов в БСС с учетом возможного выхода сенсоров из строя, обеспечивающая повышение эффективности обнаружения в этих условиях;

- методики синтеза новых алгоритмов распределенного обнаружения, основанные на мягких схемах вынесения решений, в различных условиях функционирования БСС, и характеристики их эффективности, позволяющие определить наилучшие условия их функционирования по сравнению с алгоритмами, основанными на жестких схемах вынесения решений.

Достоверность результатов, содержащихся в диссертационной работе, основывается на корректном использовании математического аппарата статистической радиофизики и обоснованных физических методов; подтверждается совпадением выносимых на защиту результатов с ранее известными в частных случаях, а также соответствием аналитических результатов с результатами, полученными путем статистического моделирования на компьютере. Достоверность полученных результатов и работоспособность синтезируемых алгоритмов также подтверждаются результатами исследований, выполненными на экспериментальном, созданном автором, макете.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация и связь”, г. Воронеж, 2019; международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация и связь”, г. Воронеж, 2020; международной научно-технической конференции “Радиолокация, навигация и связь”, г. Воронеж, 2021; всероссийской конференции “Охрана, безопасность, связь”, г. Воронеж, 2019.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 научных работ [1-10], в том числе 5 работ [2-6] опубликованы в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации основных результатов диссертационных работ, а 1 работа [1] - в издании, включенном в глобальные индексы цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора. Представляемые в диссертационной работе результаты были получены совместно с научным руководителем при непосредственном участии автора в процессах формулировки решаемых задач и разработки теоретических и экспериментальных методов их выполнения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы из 103 наименований, приложений. Общий объем диссертации составляет 166 страниц, включая 53 рисунков и 12 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цели и решаемые задачи исследования. Показана научная новизна работы и приведены основные результаты и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена решению задачи распределённого обнаружения в системе охраны, в частности, формированию оптимального правила принятия решения с учетом возможных ошибок, возникающих в БСС. Кроме того, в ней также выполнен анализ степени влияния окружающей среды на качество функционирования БСС с использованием датчиков различного типа, таких, как датчики инфракрасного, звукового и вибрационного типов.

Предполагалось, что для наблюдения за охраняемым объектом, находящимся в некоторой области пространства, используются K сенсоров. Вводятся в рассмотрение две гипотезы: H_1 и H_0 (гипотеза H_1 означает, что проникновение на охраняемый объект присутствует, H_0 – то, что такого проникновения нет). Каждый сенсор в результате обработки имеющегося на его входе сигнала на основе заложенного в нем алгоритма обнаружения независимо друг от друга выносит одно из двух решений: $u_i = 1$, если i -й сенсор обнаруживает проникновение; $u_i = -1$ в противном случае ($i = 1, \dots, K$). Эффективность обнаружения сенсором характеризовалась вероятностями ложной тревоги α_i и пропуска цели β_i . Аналогично, обозначим через U_i – решение, выносимое центральным узлом в результате обработки сигнала, пришедшего от i -ого сенсора. Это решение также может быть представлено в бинарной форме: $U_i = 1$, если в ЦУ на основании принятого сигнала выносится решение, что сенсор обнаружил проникновение на охраняемый объект, и $U_i = -1$ – в противном случае. Для описания эффективности радиоканала между i -м сенсором и ЦУ использовались вероятности ошибок первого A_i и второго B_i рода соответственно.

Принцип формирования решающего правила принятия решения в ЦУ должен основываться на комплексировании информации, принятой от локальных сенсоров с учетом возможных ошибок, возникающих в БСС. Учитывая возможные ошибки в системе, был синтезирован оптимальный алгоритм комплексирования информации в БСС. Решающее правило подобного алгоритма на основе отношения правдоподобия (ОП) (Likelihood Ratio Test - LRT) имеет вид

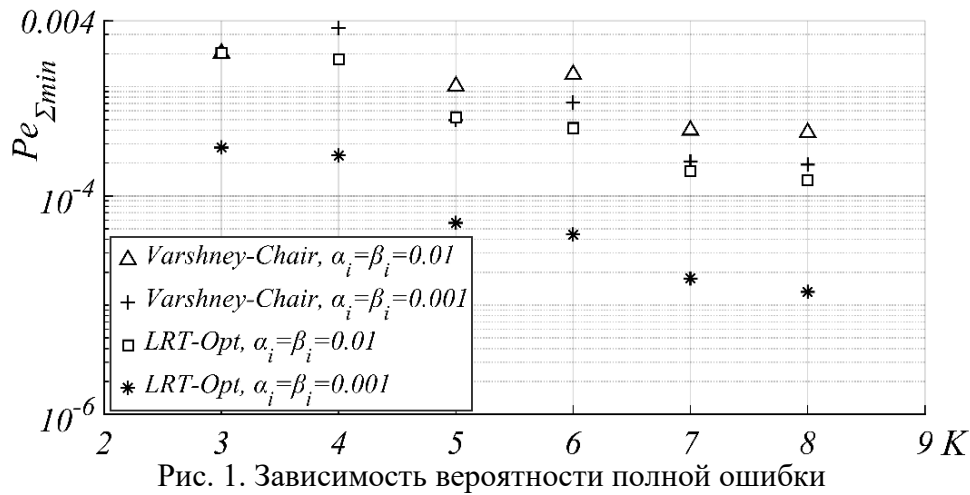
$$N = \sum_{i=1}^K Y_i \begin{cases} > h_1, \\ < h_0 \end{cases}, Y_i = \begin{cases} C1_i = \ln(\varphi_i^{(1)}/\varphi_i^{(0)}), & \text{если } U_i = 1, \\ C2_i = \ln[(1-\varphi_i^{(1)})/(1-\varphi_i^{(0)})], & \text{если } U_i = -1, \end{cases} \quad (1)$$

где $\varphi_i^{(0)} = \alpha_i(1-B_i) + (1-\alpha_i)A_i$, $\varphi_i^{(1)} = (1-\beta_i)(1-B_i) + \beta_iA_i$, пороговое значение h_1 определяется в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

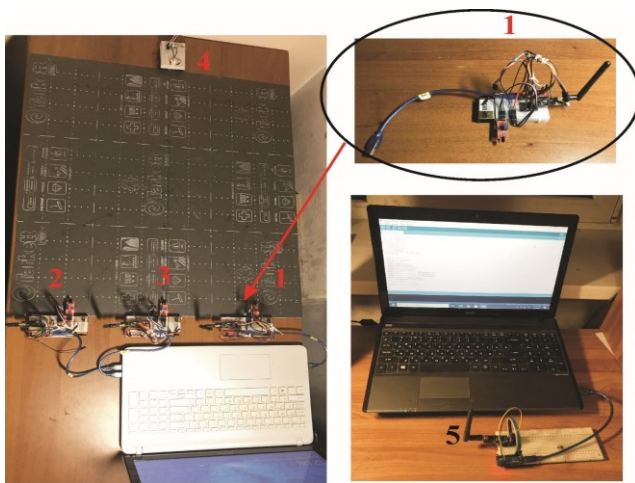
Впервые были найдены простые аналитические рекуррентные выражения для вероятностей ошибок всей системы: $A_\Sigma = \int_{h_1}^{+\infty} p_K(N|H_0)dN = 1 - \Psi 1_K^{(0)}(h_1)$, $B_\Sigma = \int_{-\infty}^{h_1} p_K(N|H_1)dN = \Psi 1_K^{(1)}(h_1)$,

где $\Psi 1_{K-1}^{(j)}(h_1) = \varphi_K^{(j)}\Psi 1_{K-1}^{(j)}(h_1 - C1_K) + (1 - \varphi_K^{(j)})\Psi 1_{K-1}^{(j)}(h_1 - C2_K)$, $\Psi 1_0^{(j)}(h_1) = \sigma(h_1)$, причем $\sigma(h)$ – функция единичного скачка.

Далее всюду эффективность принятия решения всей системой описывалась минимумом вероятности полной ошибки $Pe_{\Sigma \min} = \min(A_\Sigma + B_\Sigma)/2$, достигаемым при определённом значении порога. На рисунке 1 показан график зависимости вероятности полной ошибки от количества сенсоров для оптимального алгоритма LRT-Opt (1) и классического алгоритма Chair-Varshney в случае неидеального канала связи. Установлено, что в рассматриваемых условиях оптимальный алгоритм имеет определенный выигрыш в эффективности относительно классического алгоритма Varshney-Chair.



С целью подтверждения достоверности полученных результатов и работоспособности



1 – 1-й сенсорный узел; 2 – 2-й сенсорный узел; 3 – 3-й сенсорный узел; 4 – наблюдаемая цель; 5 – ЦУ
Рис. 2. Фотография экспериментального макета.

синтезированного алгоритма проведены исследования на основе разработанного автором экспериментального макета (Рис. 2).

Результаты измерений характеристик эффективности всей системы представлены в табл. 1.

Анализ полученных данных показывает достаточно хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретическими. Подтверждено, что использование синтезированного алгоритма обнаружения обеспечивает повышение эффективности обнаружения цели по сравнению с эффективностью отдельных локальных сенсоров.

Таблица 1– Характеристики эффективности обнаружения всей системой

	Вероятность ложной тревоги системы, A_{Σ}	Вероятность пропуска цели системы, B_{Σ}	Вероятность полной ошибки системы, $Pe_{\Sigma \min}$
Эксперимент	$7 \cdot 10^{-3}$	$3.5 \cdot 10^{-3}$	$5.25 \cdot 10^{-3}$
Расчет	$9.797 \cdot 10^{-3}$	$2.765 \cdot 10^{-3}$	$6.281 \cdot 10^{-3}$

В распределенной системе обнаружения для наблюдения за объектом окружающая среда будет оказывать непосредственное влияние на эффективность вынесения решения сенсором. В случае энергетического обнаружения в i -ом локальном сенсоре (при расстоянии r_i от i -ой цели до сенсора) вероятности обнаружения сенсором можно найти как $\alpha_i = 1 - \Phi(H)$, $\beta_i = \Phi[H - Z(r_i)]$, где $\Phi(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2) dx$ – интеграл вероятности, H – порог обнаружения, $Z(r_i)$ – отношение сигнал/шум (ОСШ). При применении БСС звукового и вибрационного вида ОСШ для i -го локального сенсора можно определить как $Z(r_i) = \sqrt{q_{0i}^2 \cdot \exp(-2\mu \cdot r_i) / r_i^2}$, где q_{0i} – отношение сигнал/шум при нулевом расстоянии от цели до i -го сенсора, μ – коэффициент ослабления поглощения, зависящий от частоты излучения f и свойства среды.

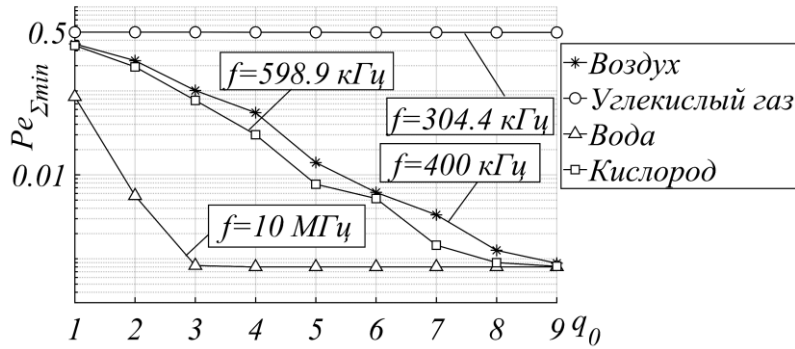


Рис.3. Зависимость вероятности полной ошибки от энергетического параметра q_0 для БСС звукового вида.

В случае применения БСС инфракрасного вида предполагалось, что цель является источником плоской волны. При этом отношение сигнал/шум для i -го локального сенсора можно найти, как $Z(d_i) = \sqrt{q_0^2 \cdot \tau(d_i)}$, где q_0 – ОСШ при нулевом расстоянии, τ – коэффициент пропускания среды, d_i – расстояние от i -ого сенсора до цели.

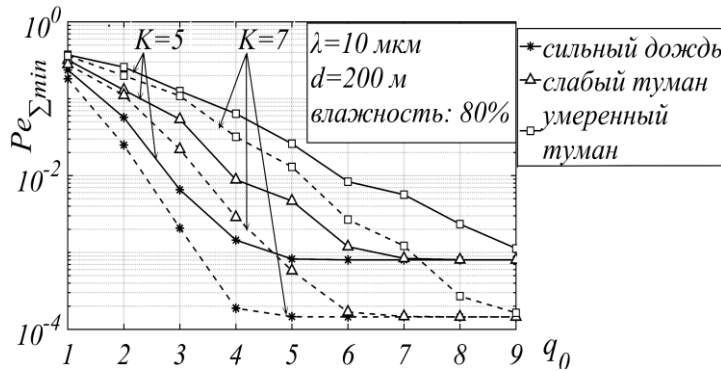


Рис. 4. Зависимость полной вероятности ошибки от ОСШ q_0 для различных метеоусловий.

Важным фактором влияния среды на функционирование БСС являются также замирания в канале связи. В случае рэлеевского замирания вероятности ошибок первого и второго рода канала связи A_i и B_i могут быть определены как $B_i = 1 - A_i^{1/(1+q_i^2/2)}$, где $q_i' = q_0' \sqrt{l_i^{-\gamma}}$ – ОСШ в канале радиосвязи, при этом q_0' – ОСШ при опорном расстоянии $l_0=1$ км для определённой частоты передаваемого сигнала f_c и известных характеристиках передатчика и приемника. При этом параметр γ показывает степень ослабления мощности сигнала на длине трассы распространения согласно модели Ли.

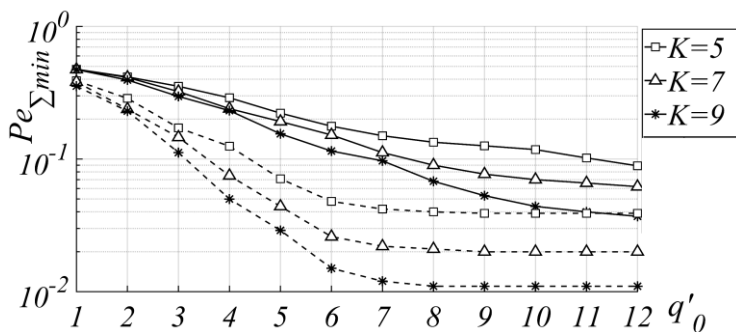


Рис.5. Зависимость вероятности полной ошибки от энергетического параметра q_0' .

На основе синтезированного алгоритма (1) вычислялась минимальная вероятность полной ошибки БСС

$$P_{\Sigma \min} = \min(A_{\Sigma} + B_{\Sigma})/2,$$

достигаемая при определенном значении порога. Для примера на рисунке 3 приведена зависимость вероятности полной ошибки от энергетического параметра q_0 для БСС звукового вида.

Для анализа эффективности принятия решения БСС инфракрасного вида на основе алгоритма (1) в качестве примера на рисунке 4 приведены графики зависимостей полной вероятности ошибки от энергетического параметра ОСШ q_0 в различных условиях.

В результате было установлено, что среда распространения существенно влияет на эффективность принятия решения как локальными сенсорами, так и всей системой.

На рисунке 5 приведена зависимость полной вероятности ошибки от ОСШ q_0' для рэлеевского замирания (сплошные кривые) и для детерминированного сигнала (пунктирные кривые).

Установлено, что замирание в канале связи существенно ухудшает эффективность системы. В этих условиях простое увеличение

мощности передатчика не позволяет существенно улучшить эффективность приема.

Во второй главе рассмотрена задача синтеза и анализа алгоритмов совместной обработки в БСС при охране контуров объектов в различных условиях функционирования системы. В результате синтеза алгоритмов вынесения решений во всех звеньях БСС, как на уровне локального сенсора, так и в ЦУ, получено оптимальное решающее правило принятия решения. Выполнен сравнительный анализ характеристик обнаружения цели на контуре протяженного объекта при ее известном и неизвестном местоположении.

Для алгоритма вынесения локальных решений в сенсорах был использован обобщенный энергетический обнаружитель в связи с неопределённым характером наблюдаемой цели. Характеристики эффективности такого алгоритма целесообразно находить на основе гауссовской аппроксимации распределения решающей статистики. Если также предположить, что в радиоканале для передачи информации от сенсора к ЦУ использовалась двоичная система связи, то комплексный алгоритм обнаружения будет совпадать с (1), куда следует подставить

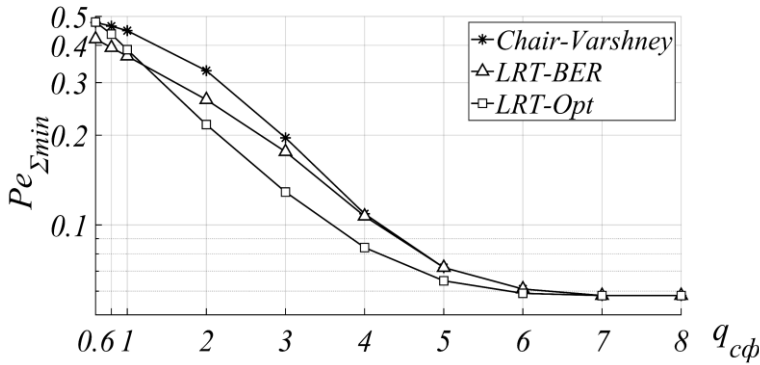


Рис. 6. Зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ канала связи $q_{cф}$ для алгоритмов LRT-Opt, Chair-Varshney и LRT-BER.

соответствующие вероятности ошибок. В качестве примера на рисунке 6 представлена зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ в канале связи $q_{cф}$ для оптимального алгоритма LRT-Opt, алгоритмов Chair-Varshney и LRT-BER.

Установлено, что в рассматриваемых условиях оптимальный алгоритм LRT-Opt имеет определенный выигрыш в эффективности относительно алгоритмов LRT-BER и Chair-Varshney, за исключением случая очень малых значений

ОСШ в канале связи ($q_{cф} > 1.2 \div 1.3$), однако в таких условиях рассматриваемая распределенная система практически неработоспособна.

При решении задачи распределенного обнаружения цели с неизвестным положением на контуре объектов, в частности, береговой линии (БЛ), использовался обобщённый метод максимального отношения правдоподобия. Причем оценка положения цели (точнее, координаты цели на БЛ (x, y)) определялась по положению максимума ОП. В частности, при использовании кривых Безье было получено выражение для ОП в виде параметрической функции от аргумента t :

$$N(t) = \sum_{i=1}^K Y_i(t), \quad Y_i(t) = \begin{cases} C1_i(t) = \ln \left(\frac{\varphi_i^{(1)}(x(t), y(t))}{\varphi_i^{(0)}} \right), & U_i = 1, \\ C2_i(t) = \ln \left(\frac{1 - \varphi_i^{(1)}(x(t), y(t))}{1 - \varphi_i^{(0)}} \right), & U_i = -1, \end{cases} \quad (2)$$

где $\varphi_i^{(1)}(x(t), y(t)) = (1 - \beta_i(x(t), y(t)))(1 - B_i) + A_i \beta_i(x(t), y(t))$, причем t ($0 \leq t \leq 1$) – приведенный параметр, функцией от которого описывается контур БЛ на основе использования соединенных составных кривых Безье. Оценка нового приведенного параметра \hat{t} находилась как положение абсолютного максимума ОП (2): $\max N(t)$. Следовательно, следующее решающее правило, используемое в ЦУ, выглядит так

$$N(\hat{t}) = \sum_{i=1}^K Y_i(\hat{t}) \underset{H_0}{\overset{H_1}{\geq}} h', \quad (3)$$

где h' – порог, определяемый в соответствии с выбранным критерием оптимальности.

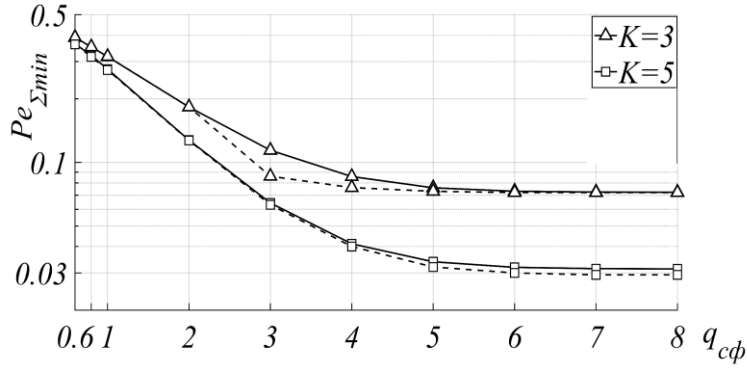


Рис. 7. Зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ в канале связи q_{cf} при обнаружении цели с неизвестным положением.

тивность обнаружения (при одном и том же количестве сенсоров).

Третья глава посвящена задаче распределенного обнаружения с учетом ненадежности сенсоров. Синтезированы новые алгоритмы распределенного обнаружения с учетом вероятности ненадежности сенсоров. Получены простые точные выражения для характеристик их эффективности. Учитывая возможность выхода из строя сенсоров, было получено следующее решающее правило принятия решения в ЦУ:

$$L = \sum_{i=1}^K Z_i \begin{cases} > h_2, & Z_i = \\ < h_2, & Z_i = \end{cases} \begin{cases} C1'_i = \ln \left[\frac{(1-p_0)\varphi_i^{(1)} + p_0\tilde{p}_i}{(1-p_0)\varphi_i^{(0)} + p_0\tilde{p}_i} \right], & U_i = 1, \\ C2'_i = \ln \left[\frac{(1-p_0)(1-\varphi_i^{(1)}) + p_0(1-\tilde{p}_i)}{(1-p_0)(1-\varphi_i^{(0)}) + p_0(1-\tilde{p}_i)} \right], & U_i = -1, \end{cases} \quad (4)$$

где p_0 – априорная вероятность выхода из строя сенсора, вероятность \tilde{p}_i зависит только от алгоритма приема локальных решений в ЦУ и порог h_2 также определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

Для характеристики эффективности алгоритма (4) найдены точные аналитические выражения для суммарных вероятностей ошибок первого и второго рода системы

$$A'_\Sigma = \int_{h_2}^{+\infty} p_K(L|H_0)dL = 1 - \Psi_K^{(0)}(h_2), \quad B'_\Sigma = \int_{-\infty}^{h_2} p_K(L|H_1)dL = \Psi_K^{(1)}(h_2),$$

где $\Psi_K^{(i)}(h_2) = V_K^{(i)}\Psi_{K-1}^{(i)}(h_2 - C1'_K) + (1 - V_K^{(i)})\Psi_{K-1}^{(i)}(h_2 - C2'_K)$, $\Psi_0^{(i)}(h_2) = \sigma(h_2)$, причем $i=0$ или 1 , $V_k^{(i)} = (1-p_0)\varphi_k^{(i)} + p_0\tilde{p}_i$.

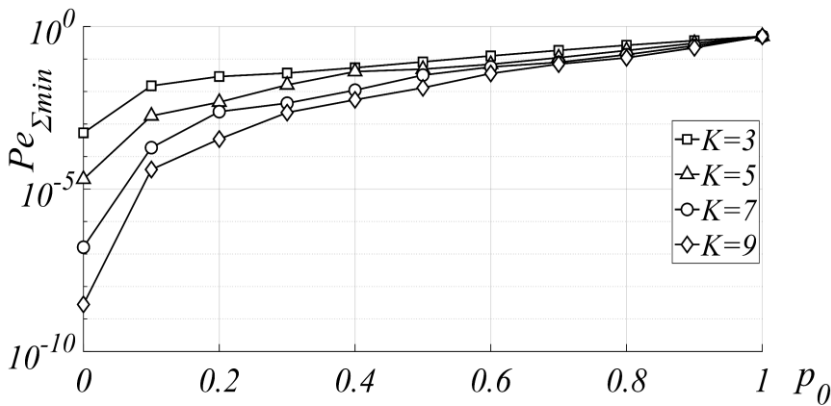


Рис.8. Зависимость вероятности полной ошибки от вероятности выхода сенсоров из строя p_0 .

На основе применения численных методов в имитационной программной среде были найдены характеристики эффективности принятия решения алгоритмом (3). На рисунке 7 изображена зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ канала связи q_{cf} при обнаружении цели с неизвестным (сплошные линии) и известным (штриховые линии) положением.

Установлено, что неизвестное местоположение цели лишь незначительно ухудшает эффек-

Для примера на рисунке 8 приведена зависимость вероятности полной ошибки $Pe_{\Sigma min}$ от вероятности выхода сенсоров из строя p_0 при различном числе этих сенсоров K . Из анализа рисунка 8 следует, что вероятность выхода из строя сенсоров оказывает существенное влияние на эффективность принятия решения системой: с ее увеличением возрастает и вероятность полной ошибки системы.

С учетом результатов, приведенных в главе 2, на основе (4) также были синтезированы алгоритмы обнаружения цели, как при известном ее положении, так и при неизвестном ее положении на БЛ с учетом вероятности выхода из строя сенсоров. Установлено, что синтезированные алгоритмы, основанные на учете вероятностей выхода из строя сенсоров, являются обобщениями ранее рассматриваемых алгоритмов в соответствующих условиях функционирования системы: как при идеальном, так и неидеальном канале связи.

В четвертой главе рассмотрена задача распределенного обнаружения на основе применения мягких схем вынесения решений в БСС. Синтезированы новые алгоритмы распределенного обнаружения при применении мягких схем вынесения решений в БСС. Для характеристики эффективности синтезированных алгоритмов найдены точные аналитические рекуррентные выражения для суммарных вероятностей ошибок всей системы.

В случае применения мягкой схемы только в локальных сенсорах использовалась 4-х уровневая схема принятия мягких решений. В этом случае локальные решения представлялись в следующем дискретном виде: $u_i = u_{11}$ – надежное решение о наличии объекта, $u_i = u_{10}$ – ненадежное решение о наличии объекта, $u_i = u_{01}$ – надежное решение об отсутствии объекта и $u_i = u_{00}$ – ненадежное решение об отсутствии объекта. Эффективность вынесения мягких локальных решений характеризовались условными вероятностями: $p_{11i}^{(j)} = P(u_i = u_{11} | H_j)$,

$$p_{10i}^{(j)} = P(u_i = u_{10} | H_j), p_{01i}^{(j)} = P(u_i = u_{01} | H_j), p_{00i}^{(j)} = P(u_i = u_{00} | H_j); j = 1 \text{ или } 0.$$

При применении квадратурной фазовой манипуляции (QPSK) для передачи информации о мягких локальных решениях, если учитывать в канале лишь аддитивный гауссовский шум, то вероятность битовой ошибки p_{bi} можно определить как $p_{bi} = 1 - \Phi(q_i)$, где q_i – ОСШ для одного бита. В результате мягкий алгоритм принятия решения в ЦУ принял вид

$$M = \ln(\Lambda) = \sum_{i=1}^K X_i \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} h, \quad X_i = \begin{cases} C1_i = \ln(\varphi_{11i}^{(1)} / \varphi_{11i}^{(0)}), & \text{если } U_i = u_{11}, \\ C2_i = \ln(\varphi_{10i}^{(1)} / \varphi_{10i}^{(0)}), & \text{если } U_i = u_{10}, \\ C3_i = \ln(\varphi_{01i}^{(1)} / \varphi_{01i}^{(0)}), & \text{если } U_i = u_{01}, \\ C4_i = \ln(\varphi_{00i}^{(1)} / \varphi_{00i}^{(0)}), & \text{если } U_i = u_{00}, \end{cases} \quad (5)$$

где $\varphi_{11i}^{(j)} = p_{11i}^{(j)} \cdot (1 - p_{bi})^2 + (p_{10i}^{(j)} + p_{01i}^{(j)}) \cdot (1 - p_{bi}) p_{bi} + p_{00i}^{(j)} \cdot (p_{bi})^2$, $\varphi_{10i}^{(j)} = p_{10i}^{(j)} \cdot (1 - p_{bi})^2 + (p_{00i}^{(j)} + p_{11i}^{(j)}) \cdot (1 - p_{bi}) p_{bi} + p_{01i}^{(j)} \cdot (p_{bi})^2$, $\varphi_{01i}^{(j)} = p_{01i}^{(j)} \cdot (1 - p_{bi})^2 + (p_{00i}^{(j)} + p_{11i}^{(j)}) \cdot (1 - p_{bi}) p_{bi} + p_{10i}^{(j)} \cdot (p_{bi})^2$, $\varphi_{00i}^{(j)} = p_{00i}^{(j)} \cdot (1 - p_{bi})^2 + (p_{10i}^{(j)} + p_{01i}^{(j)}) \cdot (1 - p_{bi}) p_{bi} + p_{11i}^{(j)} \cdot (p_{bi})^2$, а пороговое значение h определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

Для описания эффективности принятия решения алгоритмом (5) (который назван LRT-SD) найдены простые рекуррентные выражения для суммарных вероятностей ошибок:

$$A_{\Sigma} = 1 - \Psi_K^{(0)}(h), \quad B_{\Sigma} = \Psi_K^{(1)}(h),$$

где $\Psi_i^{(j)}(h) = \varphi_{11i}^{(j)} \cdot \Psi_{i-1}^{(j)}(h - C1_i) + \varphi_{10i}^{(j)} \cdot \Psi_{i-1}^{(j)}(h - C2_i) + \varphi_{01i}^{(j)} \cdot \Psi_{i-1}^{(j)}(h - C3_i) + \varphi_{00i}^{(j)} \cdot \Psi_{i-1}^{(j)}(h - C4_i)$, причем $j = 0$ или 1 , $i = 1, \dots, K$, $\Psi_0^{(j)}(h) = \sigma(h)$.

Если приемник локального сенсора построен по двухэтапной схеме обнаружения, то решающее правило в i -м сенсоре может быть представлено в виде

$$L_i = d_i(u_i) \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} \gamma_i, \quad d_i(u_i) = \begin{cases} l_{1i} = p_{11i}^{(1)} / p_{11i}^{(0)}, & \text{если } u_i = u_{11}, \\ l_{2i} = p_{10i}^{(1)} / p_{10i}^{(0)}, & \text{если } u_i = u_{10}, \\ l_{3i} = p_{01i}^{(1)} / p_{01i}^{(0)}, & \text{если } u_i = u_{01}, \\ l_{4i} = p_{00i}^{(1)} / p_{00i}^{(0)}, & \text{если } u_i = u_{00}, \end{cases} \quad (6)$$

где γ_i – пороговое значение, определяемое, исходя из выбранного критерия оптимальности.

Вероятности ошибок принятия решения алгоритмом (6) описываются выражениями

$$\alpha'_i = 1 - \left[p_{11i}^{(0)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{1i}) + p_{10i}^{(0)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{2i}) + p_{01i}^{(0)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{3i}) + p_{00i}^{(0)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{4i}) \right],$$

$$\beta'_i = p_{11i}^{(1)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{1i}) + p_{10i}^{(1)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{2i}) + p_{01i}^{(1)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{3i}) + p_{00i}^{(1)} \cdot \sigma(\gamma_i - l_{4i}).$$

Далее функционирование алгоритма распределенного обнаружения в БСС осуществляется аналогично, как и при комплексировании жестких решений от разных локальных сенсоров, основываясь на ОП. Используя (1), с учетом эквивалентной замены $A_i = B_i = p_{bi}$, получено следующее решающее правило (которое названо как LRT-SHD) в ЦУ:

$$M = \sum_{i=1}^K C_i \cdot U_i \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} H_1 \\ H_0 \end{matrix} h_1, \quad C_i = \begin{cases} C1_i = \ln(\varphi_i^{(1)}/\varphi_i^{(0)}), & \text{если } U_i = 1, \\ C2_i = \ln((1-\varphi_i^{(0)})/(1-\varphi_i^{(1)})), & \text{если } U_i = -1, \end{cases} \quad (7)$$

где $\varphi_i^{(0)} = \alpha'_i \cdot (1 - p_{bi}) + (1 - \alpha'_i) \cdot p_{bi}$, $\varphi_i^{(1)} = (1 - \beta'_i) \cdot (1 - p_{bi}) + \beta'_i \cdot p_{bi}$.

В случае применения декодирования мягких решений в ЦУ, предполагалось, что условия функционирования локальных сенсоров аналогичны условиям в случае применения в них традиционного жесткого алгоритма обнаружения. При приеме локальных решений в ЦУ выход демодулятора можно квантовать не на 2, а на 2^m уровней, причем m – это количество информационных битов. Следовательно, решение, выносимое декодером U_i , может принимать

одно из 2^m значений: $\{U_{00}, U_{01}, \dots, U_{0M}, U_{10}, U_{11}, \dots, U_{1M}\}$, причем $M = 2^{m-1} - 1$. Для описания эффективности такого алгоритма введены следующие условные вероятности:

$$P_{1ki}^{(1)} = P(U_i = U_{1k} | u_i = 1), P_{0ki}^{(1)} = P(U_i = U_{0k} | u_i = 1), P_{1ki}^{(0)} = P(U_i = U_{1k} | u_i = -1), P_{0ki}^{(0)} = P(U_i = U_{0k} | u_i = -1).$$

В результате, было синтезировано мягкое решающее правило принятия решения в ЦУ (которое названо LRT-SD*)

$$L = \ln(\Lambda) = \sum_{i=1}^K X_i \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} h, \quad X_i = \begin{cases} C1_{ki} = \ln(\varphi_{1ki}^{(1)}/\varphi_{1ki}^{(0)}), & U_i = U_{1k}, \\ C0_{ki} = \ln(\varphi_{0ki}^{(1)}/\varphi_{0ki}^{(0)}), & U_i = U_{0k}, \end{cases} \quad (8)$$

где $k = 0, \dots, M$, $\varphi_{1ki}^{(1)} = (1 - \beta_i) \cdot P_{1ki}^{(1)} + \beta_i \cdot P_{1ki}^{(0)}$, $\varphi_{0ki}^{(1)} = (1 - \beta_i) \cdot P_{0ki}^{(1)} + \beta_i \cdot P_{0ki}^{(0)}$, $\varphi_{1ki}^{(0)} = (1 - \alpha_i) \cdot P_{1ki}^{(0)} + \alpha_i \cdot P_{1ki}^{(1)}$, $\varphi_{0ki}^{(0)} = (1 - \alpha_i) \cdot P_{0ki}^{(0)} + \alpha_i \cdot P_{0ki}^{(1)}$ и пороговое значение h определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

Заметим, что если в (8) положить $M=0$ (т.е. $m=1$), то мы приходим к жесткому решающему правилу LRT-HD (1). Для характеристик эффективности алгоритма LRT-SD* (8) найдены аналитические выражения для суммарных вероятностей ошибок всей системы

$A_\Sigma = 1 - \Psi_K^{(0)}(h)$, $B_\Sigma = \Psi_K^{(1)}(h)$, где $\Psi_i^{(j)}(h) = \sum_{k=0}^M \varphi_{1ki}^{(j)} \cdot \Psi_{i-1}^{(j)}(h - C1_{ki}) + \varphi_{0ki}^{(j)} \cdot \Psi_{i-1}^{(j)}(h - C0_{ki})$, причем $j=0$ или 1 , $i = 1, \dots, K$, $\Psi_0^{(j)}(h) = \sigma(h)$.

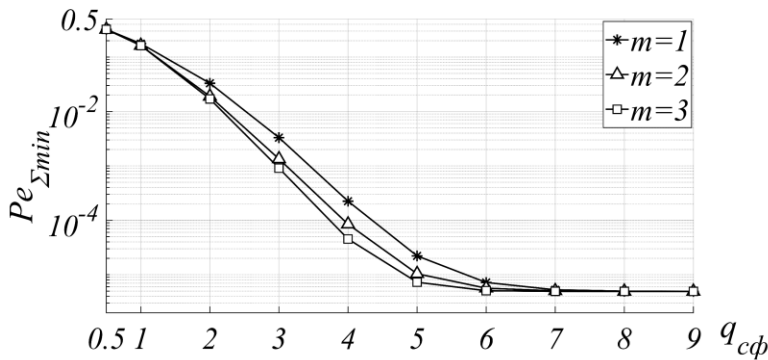


Рис. 10. Зависимость вероятности полной ошибки алгоритма LRT-SD* от ОСШ в канале связи $q_{cф}$.

Для примера на рисунке 10 приведены зависимости вероятности полной ошибки алгоритма LRT-SD* от ОСШ $q_{cф}$ при количестве сенсоров $K=5$. Установлено, что алгоритм LRT-SD* имеет определенный выигрыш по сравнению с жестким алгоритмом. При одном и том же количестве сенсоров эффективность принятия системой решения увеличивается с ростом числа битов мягких решений m ; в то же время увеличение

количества бит, больших трех, нецелесообразно, т.к. не приводит к заметному улучшению в эффективности обнаружения.

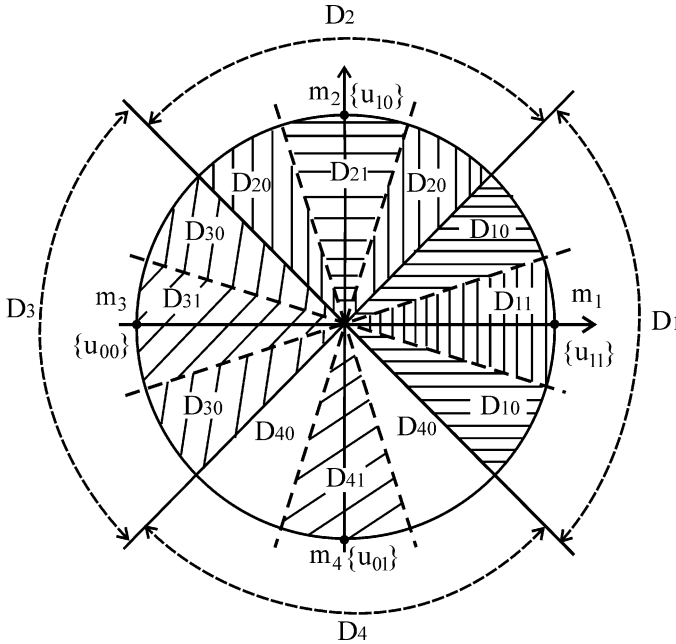


Рис.11. Сигнальное пространство для QPSK и области решений.

Принцип принятия мягких решений для детектора ЦУ заключается в разделении каждой области решений D_j на две подобласти мягких решений D_{j1} и D_{j0} . Причем, если вектор принятого сигнала попадает в область D_{j1} , то детектор выносит надежное решение о том, что от локального сенсора передан сигнал m_j ; если вектор принятого сигнала попадает в область D_{j0} , то выносится ненадежное решение о том, что от локального сенсора передан сигнал m_j .

Учитывая все возможные ошибочные решения в системе, а также симметрию созвездия сигналов с QPSK и подобластей решений, было получено решающее правило принятия решения в ЦУ

$$M_1 = \ln(\Lambda) = \sum_{i=1}^K X_i \begin{cases} > \\ < \end{cases} \zeta, \quad X_i = C_{ij} = \ln(\varphi_{ij}^{(1)} / \varphi_{ij}^{(0)}), \quad \text{если } U_i = c_j, \quad (9)$$

где $\varphi_{ij}^{(0)} = p_{11i}^{(0)} P_{i1}^{(j)} + p_{01i}^{(0)} P_{i2}^{(j)} + p_{00i}^{(0)} P_{i3}^{(j)} + p_{10i}^{(0)} P_{i4}^{(j)}$, $\varphi_{ij}^{(1)} = p_{11i}^{(1)} P_{i1}^{(j)} + p_{01i}^{(1)} P_{i2}^{(j)} + p_{00i}^{(1)} P_{i3}^{(j)} + p_{10i}^{(1)} P_{i4}^{(j)}$, $j=1, \dots, 8$, порог ζ определяется, исходя из выбранного критерия оптимальности.

Поскольку алгоритм (9) синтезирован на основе использования мягко-мягких решений (SSD), его название LRT-SSD. Для описания эффективности синтезированного алгоритма LRT-SSD (9) были найдены простые рекуррентные выражения для вероятностей ошибок первого и второго рода всей системы $A_\Sigma = 1 - \Psi_K^{(0)}(\zeta)$, $B_\Sigma = \Psi_K^{(1)}(\zeta)$, где $\Psi_i^{(k)}(\zeta) = \sum_{j=1}^8 \varphi_{ij}^{(k)} \cdot \Psi_{i-1}^{(k)}(\zeta - C_{ij})$

, причем $k=0$ или 1 , $i=1, \dots, K$, $\Psi_0^{(k)}(\zeta) = \sigma(\zeta)$.

С целью анализа эффективности приведенных синтезированных мягких алгоритмов для примера на рисунке 12 показана зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ в канале связи q при $K=5$.

С точки зрения энергетической эффективности актуальным также является синтез алгоритмов совместной обработки информации в БСС при комплексном применении мягких схем вынесения решений во всех звеньях системы. На уровне локальных сенсоров для вынесения мягких решений о наличии или отсутствии проникновения целесообразно применять 4-х уровневую схему принятия мягких решений, основанную на сигналах с QPSK. С целью обеспечения ЦУ большим количеством информации при приеме данных от сенсоров, в ЦУ также можно применять мягкую схему принятия решений. Для подробного описания такого принципа на рисунке 11 показаны сигнальное пространство для QPSK, а также соответствующие области выносимых решений. Принцип принятия мягких реше-

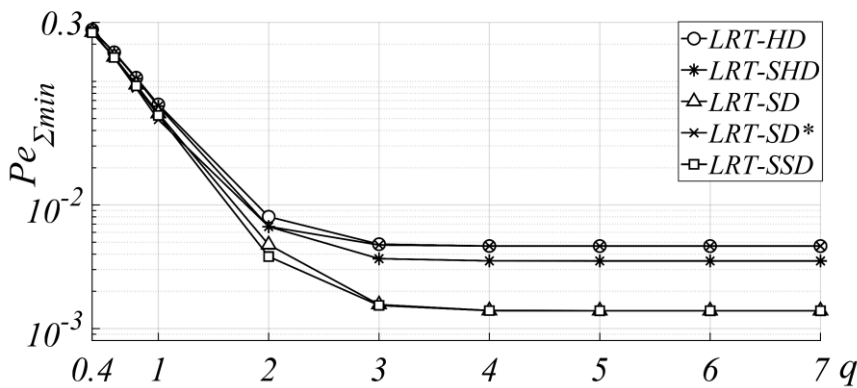


Рис.12. Зависимость вероятности полной ошибки от ОСШ в канале связи q при $K=5$.

Таким образом, показано, что применение мягкой схемы принятия решений при синтезе алгоритма распределенного обнаружения позволяет повысить эффективность принятия решения системой по сравнению с жестким алгоритмом. При этом алгоритм LRT-SSD, основанный на применении мягких схем, как в локальных сенсорах, так и в ЦУ,

имеет определенный выигрыш относительно остальных алгоритмов.

В заключении сформулированы основные результаты исследований и сделаны заключительные выводы по диссертационной работе:

1. Предложенный оптимальный жесткий алгоритм распределенного обнаружения БСС с учетом воздействия помех в канале связи при использовании только жестких решений в системе позволяет существенно повысить эффективность обнаружения относительно известных алгоритмов в аналогичных условиях. Полученные теоретические рекуррентные выражения для вероятностей ошибок первого и второго рода всей системы позволяют точно найти показатели эффективности принятия решений системой.
2. Важным элементом БСС является окружающая среда, свойства которой (тип среды распространения, географические и погодные условия, длина трассы распространения и пр.) непосредственно влияют на эффективность обнаружения, как локальными сенсорами, так и всей системой. Полученные в работе для различных условий наблюдения результаты позволяют предварительно выбирать тип сенсоров и определять рациональные размеры сети БСС при заданной эффективности.
3. Предложены алгоритмы распределенного обнаружения при наличии априорной неопределенности относительно местоположения наблюдаемой цели на контуре объектов в различных условиях функционирования системы: в случае, как идеального, так и неидеального канала связи, а также с учетом вероятности ненадежности сенсоров. Установлено, что наличие неизвестного местоположения цели лишь незначительно ухудшает эффективность принятия решения системой. Применение способа построения контура объектов с использованием составных кривых Безье позволяет существенно упростить решение задачи распределенного обнаружения цели с неизвестным положением за счет уменьшения размерности обрабатываемых данных.
4. Возможность выхода из строя сенсоров существенно ухудшает эффективность принятия решения системой. Установлено, что при больших значениях вероятностей выхода из строя сенсоров, подобная система может стать практически неработоспособной даже при большом количестве используемых сенсоров и при большом значении ОСШ в системе. Для повышения эффективности предложен алгоритм обнаружения объекта БСС, учитывающий возможный выход сенсоров из строя. Полученные аналитические формулы и результаты на их основе позволяют оценить эффективность системы при ее эксплуатации и выбрать тип сенсоров (с учетом различия в их эффективности) при заданных характеристиках канала связи и при заданной вероятности выхода сенсоров из строя.
5. Предложенные различные мягкие алгоритмы обнаружения на основе комплексирования мягких решений позволяют повысить эффективность принятия решения системой по сравнению с жесткими алгоритмами. Приведенные теоретические выражения для характеристик эффективности системы позволяют точно найти ее показатели эффективности обнаружения. На основе полученных результатов можно обоснованно выбирать соответствующий алгоритм

распределенного обнаружения с учетом требования к пропускной способности канала связи и при заданной требуемой эффективности обнаружения.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых в базе Web of Science, SCOPUS

1. Парфенов, В.И. Применение беспроводной сенсорной системы для охраны объектов с использованием датчиков инфракрасного излучения / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Компьютерная оптика. – 2021. – Т. 45, № 3. – С. 364-371.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

2. Парфенов, В.И. Оптимальный алгоритм комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом влияния помех в канале радиосвязи / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Телекоммуникации. – 2020. – № 2. – С. 12-17.

3. Парфенов, В.И. Алгоритмы комплексирования информации в беспроводных сенсорных сетях с учетом вероятности выхода сенсоров из строя / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Радиотехника. – 2019. – № 12(19). – С. 53-59.

4. Парфенов, В.И. Анализ влияния окружающей среды на эффективность алгоритма обработки информации в беспроводных сенсорных сетях / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2020. – Т. 23. – № 2. – С. 49-54.

5. Парфенов, В.И. Распределенное обнаружения на основе применения мягких схем вынесения решений как в локальных сенсорах, так и в центральном узле / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Вопросы радиоэлектроники. – 2021, № 3. – С. 49-56.

6. Парфенов, В.И. Распределённое обнаружение на основе применения декодирования мягких решений в центральном узле / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Телекоммуникации. – 2022. – № 1. – С. 2-9.

Публикации в сборниках международных конференций

7. Парфенов, В.И. Анализ показателей эффективности алгоритмов обработки информации в беспроводных сенсорных сетях / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Сборник докладов XXV Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2019. – Т. 1. – С. 63-70.

8. Парфенов, В.И. Применение беспроводных сенсорных систем для охраны береговой линии / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Сборник докладов XXVI Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2020. – Т. 1. – С. 374-381.

9. **Ле, В.Д.** Анализ эффективности алгоритмов распределенного обнаружения при неидеальном канале связи / **В.Д. Ле**, В.И. Парфенов, // Сборник докладов XXVII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь». – Воронеж, 2021. – Т. 1. – С. 85-93.

10. Парфенов, В.И. Комплексная обработка информации, поступающей от пространственно-разнесенных охранных извещателей, при обнаружении объекта с неизвестным местоположением / В.И. Парфенов, **В.Д. Ле** // Охрана, безопасность, связь. – 2020. – № 5-2. – С. 178-185.