

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

*На правах рукописи*

**ТАРАКАНОВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**АГРЕГИРОВАНИЕ ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРОВ В  
БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук,  
профессор Муравьев Сергей Васильевич

Томск – 2012

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. Агрегирование данных мультисенсоров .....	11
1.1. Восприятие информации .....	11
1.2. Агрегирование данных и динамическое моделирование .....	12
1.3. Принципы агрегирования воспринимаемой информации .....	14
1.4. Методы агрегирования цифровых данных .....	17
1.4.1. Фильтр Калмана .....	19
1.4.2. Сеть Байеса .....	26
1.4.3. Теория Демпстера-Шефера .....	27
1.4.4. Теория голосования .....	28
1.5. Применение метода динамического моделирования .....	29
1.6. Выводы к главе 1 .....	32
ГЛАВА 2. Агрегирование данных мультисенсоров на основе отношения консенсуса .....	33
2.1. Определение отношения консенсуса .....	33
2.2. Принципы голосования .....	35
2.3. Определение ранжирования Кемени .....	40
2.4. Методы решения задачи о ранжировании Кемени .....	41
2.5. Неоднозначность задачи о ранжировании Кемени .....	44
2.6. Решение задачи об отношении консенсуса по правилу Борда .....	46
2.7. Выводы к главе 2 .....	47
ГЛАВА 3. Разработка протокола передачи измерительных данных мультисенсоров в беспроводных сенсорных сетях .....	4
3.1. Устройство беспроводных сенсорных сетей .....	49
3.1.1. Узлы беспроводной сенсорной сети .....	49
3.1.2. Стек протоколов беспроводной сенсорной сети .....	51
3.1.3. Технология ZigBee .....	52
3.1.4. Беспроводные модули MICAz .....	54
3.1.5. Архитектура беспроводной сенсорной сети .....	56

3.1.6. Особенности передачи данных в беспроводной сенсорной сети	58
3.2. Протокол передачи пакетов данных мультисенсоров.....	59
3.2.1. Алгоритм назначения интервалов ожидания передачи пакетов данных.....	61
3.2.2. Формирование очереди передачи пакетов данных .....	62
3.3. Статистическое обоснование предложенной схемы .....	63
3.3.1. Обоснование выбора количества кластеров и допустимого числа отбрасываемых пакетов данных.....	63
3.3.2. Вероятность потери пакета в зависимости от приоритета узла...	67
3.4. Выводы к главе 3.....	68
ГЛАВА 4. Экспериментальная проверка метода передачи пакетов данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети.....	70
4.1. Выбор среды эмуляции .....	70
4.2. Описание среды эмуляции TOSSIM .....	71
4.3. Обзор существующих протоколов передачи данных в беспроводных сенсорных сетях .....	73
4.4 Эмуляция передачи пакетов данных в системе пожарной сигнализации .....	75
4.5. Выводы к главе 4.....	79
Заключение .....	81
Список литературы .....	82
Приложение. Акты внедрения результатов диссертационной работы .....	94

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Сенсорная сеть представляет собой распределенную, самоорганизующуюся, устойчивую к отказам отдельных элементов сеть из необслуживаемых и не требующих специальной установки устройств. В таких системах разнородные измерительные данные собираются мультисенсорами, входящими в состав узлов, расположенных в подлежащих мониторингу точках определенной географической области, и передаются по беспроводной сети в центральный узел для обработки и принятия решений. Мультисенсор представляет собой набор датчиков (первичных измерительных преобразователей) измеряющих одновременно несколько физических величин. Обычно сеть имеет иерархическую (древовидную) структуру, в которой на каждом уровне данные могут передаваться от узлов-источников к одному или нескольким узлам-приемникам. Благодаря быстрому развитию технологий беспроводной связи, миниатюризации и снижения энергопотребления электронных устройств, все большее развитие получают беспроводные сенсорные сети (БСС). Основными преимуществами беспроводных (БСС) являются простота развертывания, высокая надежность сети в целом и стойкость к электромагнитным помехам. Благодаря этому БСС все чаще используются для организации различных видов мониторинга: параметров окружающей среды, состояния конструкций, зданий и сооружений, в системах безопасности (пожарной, сейсмической, экологической и др.), для отслеживания целей в процессе ведения боевых действий и т.п.

При передаче данных в беспроводных сенсорных сетях возникают существенные проблемы, связанные с ограниченной полосой пропускания используемых в качестве линий связи радиоканалов. В частности, в ситуациях, когда много узлов-источников одновременно инициируют передачу данных, может возникать перегрузка или даже коллапс сети, в результате чего ее пропускная способность, выражаемая в количестве проходящих от источника к центральному узлу пакетов данных в единицу времени, падает практически

до нуля. Кроме того, отдельные сенсорные узлы могут как добавляться в сеть, так и, по разным причинам, выходить из состава сети. Изменение в конфигурации сети, как правило, приводит к необходимости изменять маршруты пакетов данных, что также снижает пропускную способность сети.

Одним из возможных подходов к решению проблемы является назначение приоритетов передаваемым по сети пакетам и организация первоочередной доставки пакетов с более высоким приоритетом. Перспективным является способ назначения приоритетов узлам беспроводной сенсорной сети с использованием некоторого бинарного отношения консенсуса, получаемого в результате процедуры агрегирования предпочтений. Предпочтения в форме  $m$  ранжирований  $n$  узлов формируются на основе показаний мультисенсоров. Он позволяет динамически назначать приоритеты узлам сети (и, следовательно, передаваемым ими пакетам), формировать очередь передачи пакетов и распределять пропускную способность сети в зависимости от смыслового содержания (семантики) передаваемых данных. Таким образом, решение о приоритетной передаче данных принимается на основе агрегирования разнородных данных мультисенсоров.

Этот подход согласуется с концепцией качества обслуживания (Quality of Service, QoS), являющейся общепринятой для сенсорных сетей, основанных на обнаружении событий. Основными показателями QoS являются малая задержка передачи данных от источника к центральному узлу и низкие потери данных о событиях.

**Целью диссертационной работы** является исследование подходов к агрегированию измерительных данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети на основе теории голосования и разработка, программная реализация и экспериментальная апробация метода управления передачей пакетов данных в беспроводной сенсорной сети с учетом приоритета передаваемых данных.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи исследования:

1. анализ методов агрегирования данных мультисенсоров;
2. разработка метода назначения приоритетов пакетам данных мультисенсоров с использованием агрегирования разнородных данных на основе отношения консенсуса;
3. разработка протокола передачи пакетов данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети на основе разработанного метода назначения приоритетов;
4. программная реализация и экспериментальная проверка метода передачи пакетов данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети.

**Методы исследования.** При разработке метода агрегирования измерительных данных использованы методы теории бинарных отношений и теории голосования, теории измерений, теории вероятностей и математической статистики. Для экспериментальной апробации протоколов передачи данных в сенсорной сети использовалась среда моделирования TOSSIM (эмулятор сенсорной сети на основе операционной системы TinyOS).

**Достоверность полученных результатов** диссертационной работы подтверждается совпадением с достаточной точностью расчетных данных и результатов моделирования и эксперимента.

**Научная новизна работы:**

1. Предложен метод использования агрегирования предпочтений для организации передачи данных в беспроводной сенсорной сети, позволяющий решить проблему ограниченной пропускной способности радиоканалов и обеспечивающий минимальную задержку при передаче пакетов данных, несущих информацию о событиях.
2. Предложен метод обеспечения максимальной пропускной способности беспроводной сенсорной сети на основе функции расстояния Кемени с учетом вероятности потери пакетов.

3. Разработан и экспериментально апробирован программный комплекс передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети, управляющий интервалами передачи пакетов данных и очередью передачи пакетов данных на основании приоритетов узлов БСС.

**Практическая ценность работы.** Разработанный в ходе диссертационных исследований программный пакет передачи данных в беспроводной сенсорной сети, благодаря первоочередной передачи более приоритетных данных и назначению интервалов передачи пакетов данных узлам сети, может найти широкое применение в распределенных системах экологического мониторинга, контроля состояния промышленных и гражданских объектов.

**Реализация и внедрение результатов работы.** Результаты работы использованы

- в ОАО Иркутскэнерго при организации сбора данных для экологического мониторинга окружающей среды на территории ТЭЦ 9 (акт внедрения приложен к диссертации);
- при выполнении проекта "In-network importance ranking in wireless sensor network data collection (Внутрисетевое ранжирование при организации сбора данных в сенсорной сети)", грант Национального университета Сингапура по программе EERSS, 2007-2009 гг.).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Рекурсивный алгоритм ветвей и границ позволяет находить все возможные решения труднорешаемой задачи об отношении консенсуса в виде линейного строгого порядка (ранжирования Кемени).
2. Предложенный метод агрегирования предпочтений, сформированных на основе передаваемых по беспроводной сенсорной сети данных измерений мультисенсоров, позволяет избавиться от перегрузок сети и обеспечить минимальную задержку при передаче пакетов данных (заявка на патент № 2011154473).

3. Использование функции расстояния Кемени с учетом вероятности потери пакетов позволяет обеспечить максимальную пропускную способность беспроводной сенсорной сети.

4. Разработанный на базе агрегирования предпочтений протокол передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети протестирован в системе TOSSIM и показал достаточное совпадение значений показателей эффективности сети с предсказанными теоретическими исследованиями.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- XV Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2009», г. Томск, 2009 г.;
- Региональная научно-методическая конференция «Электронные дидактические материалы в инженерном образовании», г. Томск, 2009 г.;
- XVI Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2010», г. Томск, 2010 г.;
- Университетская научно-методическая конференция «Совершенствование содержания и технологии учебного процесса», г. Томск, 2010 г.;
- IEEE Sensors Applications Symposium (SAS-2010), г. Лимерик, Ирландия, 2010 г.;
- XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии СТТ'2011», г. Томск, 2011 г. (доклад отмечен дипломом II степени);
- International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems, ICIMCS 2011, Гонконг, 2011 г.

**Публикации.** Основные результаты исследований отражены в 11 публикациях: две статьи в ведущем рецензируемом научном журнале, рекомендуемом ВАК; одна статья в рецензируемом журнале; две статьи в трудах зарубежных конференций, шесть статей в сборниках трудов российских конференций.

Диссертационная работа состоит из четырех глав.

В первой главе представлен аналитический обзор существующих в настоящее время методов агрегирования измерительной информации – сети Байеса, теории Демпстера-Шефера, фильтра Калмана. Проведенный обзор показывает, что корректность результатов традиционно применяемых подходов зависит от выбора той или иной функции преобразования измеряемых величин в суждения. Поскольку данная функция, как правило, выбирается из субъективных предположений или на основе весьма приближенных вычислений, указанные подходы уступают в корректности методам теории голосования, в которых ранжирования формируются на основе непосредственных показаний мультисенсоров, а суждения выносятся без использования каких-либо функций преобразования показаний. Следовательно, разработка подхода к агрегированию данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети на основе теории голосования является актуальной задачей.

Во второй главе рассматриваются рассматриваются методы построения отношения консенсуса на основе измерительной информации и обсуждается использование ранжирования Кемени для построения отношения консенсуса.

В третьей главе рассматриваются особенности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях и описывается применение отношения консенсуса для формирования очереди передачи сенсорного узла и распределения пропускной способности сети. Также приводится статистическое обоснование предложенной схемы организации передачи данных в сенсорной сети.

В четвертой главе приведены результаты моделирования разработанного протокола передачи данных. В качестве объекта моделирования использована беспроводная сенсорная сеть пожарной сигнализации, состоящая из 241 узла на базе модулей MICAz, обменивающихся информацией по протоколу ZigBee. Приведены данные об основных параметрах качества обслуживания для беспроводных сенсорных сетей.

## ГЛАВА 1

### АГРЕГИРОВАНИЕ ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРОВ

Под разнородными измерительными данными будем понимать данные, полученные на выходе различных сенсоров (датчиков присутствия, оптических, ультразвуковых, датчиков температуры, давления, линейных перемещений и т.д.), образующих мультисенсорную систему.

Задача агрегирования (слияния, интеграции) данных мультисенсоров (multisensor data fusion problem) состоит в формировании суждений о состоянии объекта на основе результатов измерений разнородных физических величин. При этом полученное в результате процедуры агрегирования суждение обладает большей достоверностью по сравнению с суждениями, сформированными на основе индивидуальных измерений. То есть агрегирование обладает синергетическим эффектом.

Агрегирование воспринимаемой от сенсоров информации можно рассматривать как логически связанное описание внешней окружающей среды. В данной главе восприятие информации рассматривается как процесс создания динамической модели окружающей среды. Агрегирование воспринимаемой информации является центром этого процесса.

Динамическое моделирование – это циклический процесс, состоящий из следующих этапов: прогнозирование, согласование и улучшение [1].

В процессе восприятия информации от объекта с помощью сенсоров основной является проблема объединения всех полученных наблюдений в одно логически связанное описание. Для интеграции цифровых данных сенсоров могут быть использованы методы теории оценивания, тогда как для символьных – специальные принципы интеграции данных.

#### 1.1 Восприятие информации

Восприятие это не задача сама по себе, а способ получения точного описания объекта с помощью сенсора. Для создания систем восприятия информации нужно знать тип сенсоров и их режимы работы. Это обусловлено

тем, что интеграция воспринимаемой информации может осуществляться от различных по природе и типу сенсоров в различные моменты времени.

Под «восприятием» будем понимать процесс описания внешней окружающей среды.

Под «внешней окружающей средой» будем понимать ту часть окружающего мира, которая воспринимается сенсором в различные моменты времени.

Теоретически возможно использовать внутреннюю модель внешней окружающей среды. Но на практике это связано с большими требованиями к точности и быстродействию сенсоров. Поэтому гораздо удобнее создать общее описание, полученное от различных источников информации и использовать относительную непрерывность внешнего окружающего мира во времени для того, чтобы объединить различные наблюдения.

Для этой цели используют динамическое моделирование. Под динамикой здесь понимается процесс создания изменяющегося во времени описания внешней окружающей среды, основанного на информации, воспринимаемой сенсором. Это описание является моделью, так как позволяет симулировать условия внешней окружающей среды с помощью сенсора.

## **1.2 Агрегирование данных и динамическое моделирование**

Основная структура динамического моделирования представлена на рисунке 1.

На этой структуре независимые наблюдения преобразованы в общее упорядоченное пространство и терминологию. Наблюдения интегрированы в виде внутренней модели циклического процесса, состоящего из трех этапов: прогнозирование, согласование и улучшение.

На этапе прогнозирования текущее состояние модели используется для прогнозирования состояния внешней окружающей среды в момент времени, когда получено следующее наблюдение.

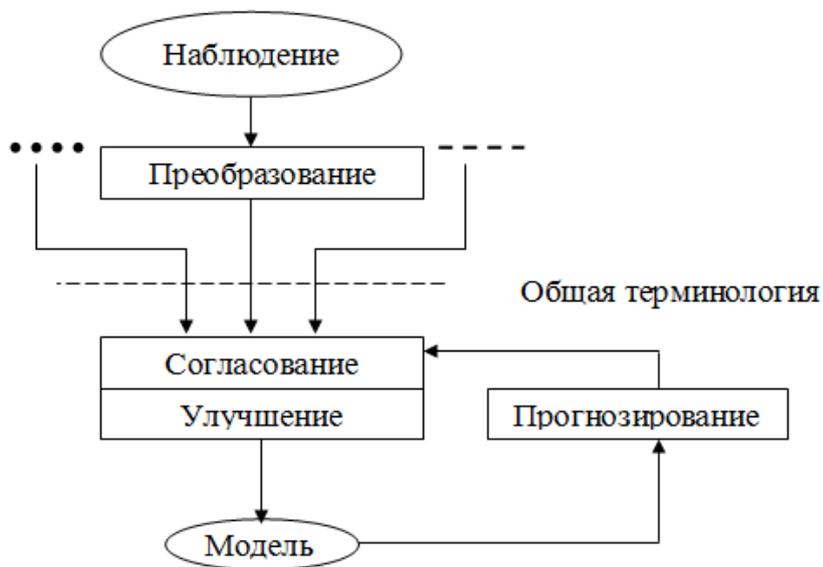


Рисунок 1. Структурная схема динамической модели

На этапе согласования, преобразованные наблюдения приводятся в соответствие с прогнозом. Такое согласование гарантирует (доказывает), что наблюдение и прогнозируемое отображение информации совпадают. Согласование доказывает, что наблюдения и их прогнозы могут быть преобразованы, и иметь одинаковую систему координат и общую терминологию.

На этапе улучшения происходит интеграция информации, полученной при проведении наблюдений с прогнозируемым состоянием модели для создания усовершенствованного описания внешней окружающей среды, состоящего из гипотез.

Этап улучшения служит как для внесения в модель новой информации, так и для удаления из нее «старой». В течение этого этапа, информация, которая больше, чем фокус внимания системы, также как кратковременная и ложная информация, удаляются из модели. Этот процесс «интеллектуального отсечения» необходим для предотвращения выхода внутренней модели за рамки.

Таким образом, продемонстрированная структура системы применяется для создания отдельных моделей внешней окружающей среды различной величины и с информацией на различных уровнях абстракции. Например, в системе активного зрения SAVA [21] динамическая модель используется для создания трехмерных изображений в пространственной системе координат и символических знаков распознаваемых объектов. В роботизированной системе контроля MITRA [22] геометрическая модель окружающей среды представлена в мировой системе координат и отдельные символические модели, основаны на поиске геометрической модели для нахождения вероятных объектов.

Используя рассмотренную структуру построения систем, можно выделить набор принципов для интеграции воспринимаемой информации. Эти принципы являются прямым следствием природы циклического процесса динамического моделирования.

### **1.3 Принципы агрегирования воспринимаемой информации**

Опыты, полученные при построении систем динамического моделирования, послужили основой к установлению набора принципов для интеграции воспринимаемой информации [1]. Эти принципы являются следствием из природы цикла «прогнозирование – согласование – улучшение», представленного на рисунке 1.

**Принцип 1:** Первоначально модель внешней среды должна быть выражена набором свойств.

Первоначальная модель выражает объединение свойств, которые описывают определенное состояние некоторой части внешней среды. Это объединение, как правило, основано на пространственном расположении. Например, смежность поверхности с определенным нормальным вектором, желтым цветом и определенной температурой. Для численных величин,

каждое свойство может быть включено в список как точно полученная оценка. Для символьных величин, место для свойств может быть заполнено списком вероятных значений из конечного списка. Такое объединение свойств в теории оценивания известно как «вектор состояния».

**Принцип 2:** Наблюдения и модель должны быть выражены в одной системе координат.

Для того, чтобы согласовать наблюдение с моделью, наблюдение должно быть «внесено в реестр» модели. Это касается преобразования обратного процессу считывания, таким образом, подразумевается надежность модели конфигурации и геометрии сенсора.

Когда нет предшествующего преобразования, то иногда возможно сделать вывод преобразованием (через согласование) структуры наблюдения во внутреннюю модель. При отсутствии априорной информации, такой процесс согласования будет требовать больших дорогостоящих вычислений. К счастью, во многих случаях приблизительный результат может быть получен при условии, что состояние внешней окружающей среды между наблюдениями менялось незначительно.

Система координат может быть как относительно объекта, так и относительно наблюдателя. Выбор системы координат должен быть сделан с учетом всей сложности преобразований в каждом цикле процесса «прогнозирование – согласование – улучшение». Например, в отношении неподвижного наблюдателя, базовая система координат сенсора может минимизировать затраты на преобразование. А для подвижного наблюдателя с моделью, которая включает в себя небольшое количество наблюдений, будет дешевле преобразовывать эту модель в текущую систему координат сенсора в течение каждого цикла моделирования. С другой стороны, если модель включает в себя большое количество наблюдений, использование внешней системы координат может дать результат при меньшем количестве вычислений.

Преобразования между системами координат, как правило, требуют использования точной модели всего процесса восприятия в целом. Такое описание, обычно называют «моделью сенсора», которая является неотъемлемой частью преобразования этапа прогнозирования в систему координат наблюдения, или преобразования наблюдения в систему координат модели. Определение и сохранение параметров для такой «модели сенсора» является важной проблемой.

**Принцип 3: Наблюдение и модель должны иметь общую терминологию.**

Под моделью восприятия может подразумеваться база данных. Каждый элемент в этой базе – это набор связанных свойств. Для того чтобы провести согласование или добавить информацию в модель, наблюдения нуждаются в некотором преобразовании для того, чтобы затем сработать как ключ. При этом необходимо рассчитать необходимость такой информации. Однако, начиная с информации, которая используется при согласовании и улучшении, появляется смысл в сохранении информации между этапами. Таким образом, как правило, предлагается использовать в качестве модели наблюдений подмножество свойств.

Эффективным путем интеграции информации от различных сенсоров является определение стандартного «первоначального» элемента, который включает в себя различные свойства, которые могут быть получены путем наблюдений или получены от различных сенсоров. Любой отдельный сенсор может представлять наблюдения только для одного подмножества этих свойств. Преобразование наблюдений в общую систему терминов позволяет осуществлять процесс интеграции от независимых источников наблюдений.

**Принцип 4: Свойства должны включать неопределенность в явной форме.**

Динамическое моделирование включает в себя два типа неопределенностей: степень точности и степень достоверности. Под степенью точности подразумевается пространственная форма неопределенности. При

детальном описании степени точности наблюдаемых свойств, система может определять пространство, в котором наблюдение доставляет в модель новую информацию. Неопознанные свойства могут быть обработаны как очень неточные наблюдения. Модель процесса восприятия позволяет непосредственно оценивать неопределенности, исходя из ситуации.

**Принцип 5:** Первоначальному значению должен соответствовать показатель достоверности

Первоначальные модели всегда неточные, они должны рассматриваться как гипотезы. Для наилучшего использования этих гипотез, каждое первоначальное значение должно включать оценку значения доверительной вероятности. При этом значение доверительной вероятности может принимать значения от минус 1 до 1 (также как в MYCIN [23]), или иметь символическое значение.

Доверительная вероятность обеспечивает моделирование в мировых координатах простым механизмом немонотонных выводов. Наблюдения, которые не соответствуют ожидаемым, могут с самого начала рассматриваться в качестве неопределенности. Если в дальнейшем происходит подтверждение, то их уровень доверия увеличивается. Если подтверждения не происходит, то они могут быть исключены из модели.

#### **1.4 Методы агрегирования цифровых данных**

Современные достижения в области интеграции данных сенсоров, особенно в сфере обработки изображений, повлекли за собой повторное открытие и использование теории оценивания. Впоследствии методы теории оценивания получили своё развитие в робототехнике и военной промышленности.

Например, в 1980 году Герман и Канаде сгруппировали пассивный стерео ряд, полученный с авиационного датчика [2]. Эта ранняя работа охарактеризовала проблему интеграции данных, как одну из дифференциальных комбинаций геометрической информации.

Схожий метод был разработан автором для дифференциальной конструкции модели подвижного (мобильного) робота, использующей вращающийся ультразвуковой датчик [3]. С помощью обобщения этой работы, интеграцию представили как циклический процесс получения информации через сенсоры (датчики). Также благодаря необходимости восприятия информации для мобильных роботов, Брукс [4] и Чатила [5] опубликовали узкоспециализированные методы для обработки неопределенности.

С 1985 года все чаще приводились доводы в пользу применения теории оценивания в сфере обработки изображений и робототехнике. Оптимальная комбинация функций была получена и представлена как эквивалентная простейшей форме фильтра Калмана. В тот же период, Дюрант-Вайт завершил свою диссертацию [6] об обработке неопределенности в робототехнике и сфере получения информации от сенсоров. В этой работе он описал основы методов для обработки и интегрирования информации сенсоров, которые являются следствием из теории оценивания. Опытные в теории оценивания Фаджераса и Аейча [7], способствовали внедрению этой теории в стереосистемы и системы калибровки.

С 1987 года произошла быстрая смена парадигмы в сфере обработки изображений, методы, выведенные из теории оценивания, начали активно внедряться.

В то время как большинство исследователей применявших теорию оценивания, ссылались на Смита, Чизмена, Дюрант-Вайта, Фаджераса и Аейча, реальные методы были хорошо известны некоторым другим научным сообществам, в особенности сообществу теории управления. Исходными для теории оценивания являются идеи, сформулированные Колмогоровым [8] и Винером [9]. Калман [10] опубликовал рекурсивный алгоритм в виде дифференциальных уравнений для оптимального рекурсивного оценивания линейных систем. Он показал, что этот оптимальный метод оценивания очень схож с методом оценивания Байеса, методом максимального правдоподобия и

методом наименьших квадратов. Эти взаимосвязи изложены в учебниках Джозефа, Бьюси [11] и Язвински [12], а особенно у Мелза и Сежа [13]. Эти взаимосвязи также изложены в последней статье Брауна [14] и в книге Брамера и Сифлинга [15].

Методы, полученные с помощью теории оценивания, обеспечивают теоретическое основание для процессов, которые представляют собой вычислительную основу для интеграции цифровых данных. Альтернативный метод основан на критериях минимальной энергии и минимальной энтропии.

Примером такого расчета может служить сеть Хопфилда [16]. Идея состоит в том, чтобы минимизировать функцию энергии, количественно выражающую, сколько каждое имеющееся измерение и зафиксированное ограничение нарушено. Эту идею Терзополос [17] связал с регуляризацией методов для поверхностной реконструкции. Использование массовых параллельных нейронных сетей для реализации алгоритмов рассматривалось в статьях Мероквина [18], Пажо [19], Блейка и Зайсермана [20].

#### **1.4.1 Фильтр Калмана**

Применение вышеописанных принципов приводит к появлению группы методов для процесса динамического моделирования. В данном разделе рассматриваются методы для данных, выраженных в цифровом виде.

Кроме того, в разделе рассматриваются уравнение прогноза фильтра Калмана, которое обеспечивает прогнозирование состояния модели; расстояние Махалонибиса, которое является простой мерой для согласования; и уравнения улучшения фильтра Калмана, обеспечивающие механизм улучшения свойств оценок модели [1].

Динамическая модель  $M(t)$  формирует список элементов, которые описывают состояние внешней среды в момент времени  $t$ :

$$M(t) \equiv \{ P_1(t), P_2(t), \dots, P_m(t) \}, \quad (1)$$

где  $P_1(t), P_2(t), \dots, P_m(t)$  – элементы динамической модели  $M(t)$ .

Модель может, как правило, включать группу элементов, которые отражают зависимость между различными уровнями элементов. Эти группы образуют абстракцию, которая изображается как символьные свойства.

Каждый элемент модели  $P_i(t)$  описывает часть внешнего мира в виде объединения внутренних свойств  $\hat{X}(t)$  плюс соответствующий ID и доверительная вероятность:

$$P(t) \equiv \{ID, \hat{X}(t), CF(t)\}, \quad (2)$$

где  $ID$  – значение (метка), по которому элемент может быть идентифицирован;

$CF(t)$  – доверительная вероятность, которая позволяет контролировать содержание модели.

Новые значения элементов модели, полученные с помощью наблюдений, фиксируются в модели с низким уровнем доверительной вероятности.

Последующие наблюдения позволяют повысить уровень доверительной вероятности, при этом если значение элемента не наблюдается при последующих циклах, то это значение расценивается как шум и удаляется из модели. Система остается стабильной, уровень доверительной вероятности позволяет элементу существовать в некоторых циклах, даже если этот элемент удален из наблюдений. Значение доверительной вероятности зависит от применения системы.

Элементы системы представляют оценку отдельного состояния части внешней окружающей среды в виде набора  $N$  свойств, представленных вектором  $\hat{X}(t)$ :

$$\hat{X}(t) \equiv \{\hat{x}_1(t), \hat{x}_2(t), \dots, \hat{x}_n(t)\}. \quad (3)$$

Фактическое состояние внешней среды  $X(t)$  оценивается через процесс наблюдения  ${}^Y\mathbf{H}_X$ , который проецируется в вектор наблюдения  $Y(t)$ . Также в процессе наблюдения присутствует шум  $N(t)$ :

$$Y(t) = {}^Y\mathbf{H}_X X(t) + N(t). \quad (4)$$

Состояние внешней среды  $X(t)$  не может быть точно измерено, следовательно, используется его оценка  $\hat{X}(t)$ . При каждом цикле моделирования оценка  $\hat{X}(t)$  определяется через объединение прогнозируемых наблюдений  $Y^*(t)$  и фактических наблюдений  $Y(t)$ . Разница между векторами  $Y^*(t)$  и  $Y(t)$  обеспечивает основу для коррекции оценки  $\hat{X}(t)$

В процессе моделирования  $\hat{X}(t)$  и  $Y(t)$  должны сопровождаться оценкой их неопределенности. Неопределенность показывает отклонение между вектором  $\hat{X}(t)$  и реальным вектором  $X(t)$ . Такое отклонение можно аппроксимировать в виде ковариационной матрицы  $\hat{C}(t)$ , которая представляет собой квадрат разницы между оценкой и действительным значением состояния внешней окружающей среды:

$$\hat{C}(t) \equiv E\{[X(t) - \hat{X}(t)][X(t) - \hat{X}(t)]^T\}. \quad (5)$$

Оценка неопределенности основана на модели ошибок, которые искажают процессы прогнозирования и наблюдений. Оценивать эти ошибки одновременно сложно и необходимо для функционирования таких систем.

Оценка неопределенностей играет две роли:

- обеспечивает допустимое ограничение процесса согласования;
- обеспечивает относительную стабильность процесса прогнозирования и наблюдения, когда происходит вычисление новых оценок.

Так как  $\hat{C}(t)$  определяет допустимое ограничение для согласования, выполнение системы будет ухудшаться при превышении значения  $\hat{C}(t)$ . С другой стороны, слишком большое значение  $\hat{C}(t)$  может увеличить время нахождения согласования.

На этапе прогнозирования в процессе моделирования происходит сдвиг во времени вектора  $\hat{X}(t)$ , т. е. определяется  $X^*(t+\Delta T)$ . А также происходит сдвиг во времени  $\hat{C}(t)$  и определяется  $C^*(t+\Delta T)$ . Такое определение оценок представляет собой процесс нахождения производных между векторами.

Увеличение порядка прогнозирования влечет за собой увеличение порядка производных. Далее рассмотрен пример метода для двух элементов, которые являются отдельными свойствами внешней среды ( $x_1(t)$  и  $x_2(t)$ ), вектора  $\hat{X}(t)$ . При этом принято, что процесс прогнозирования и оценивания происходит за отрезок времени  $\Delta T$ , значение которого непостоянно.

Производные  $x_1(t)$  и  $x_2(t)$  по времени, т.е.  $\dot{x}_1(t)$  и  $\dot{x}_2(t)$  являются также компонентами вектора  $\hat{X}(t)$ . Таким образом, если система состоит из  $N$  свойств, то вектор  $\hat{X}(t)$  будет состоять из  $2N$  элементов:  $N$  свойств и  $N$  их первых производных по времени. При этом производные элементов вектора наблюдений  $Y(t)$  находить необязательно. Фильтр Калмана позволяет нам находить производные, используя только оценки наблюдений. К тому же, оценки находятся с помощью интегрирования, поэтому они более устойчивы к шуму, чем производные мгновенных значений.

Предположим, что элементы  $\hat{x}(t)$  вектора  $\hat{X}(t)$  имеют дисперсию  $\hat{\sigma}_x^2$ . Для прогнозирования первого порядка переменной  $x^*(t+\Delta T)$  необходимо найти первую производную по времени  $\dot{\hat{x}}(t)$ :

$$\dot{\hat{x}}(t) \equiv \frac{\partial \hat{x}(t)}{\partial t} \quad (6)$$

Изменение вектора  $X(t)$  можно представить в виде ряда Тейлора. Используя прогнозирование первого порядка, все элементы высокого порядка можно объединить в случайный вектор  $V(t)$ , аппроксимированный через оценку вектора  $\hat{V}(t)$ , которая включает в себя одновременно и производные высоких порядков и другие преобразования. Вектор  $V(t)$  имеет свою дисперсию  $Q(t)$ :

$$Q(t) = E\{V(t) V(t)^T\}. \quad (7)$$

При неизвестном значении  $V(t)$  дисперсия имеет нулевое значение, следовательно, вектор  $\hat{V}(t)$  тоже равен нулю.

Таким образом, каждый элемент прогнозируется в соответствии с выражением:

$$x^*(t + \Delta T) = \hat{x}(t) + (\partial \hat{x}(t) / \partial t) \cdot \Delta T + \hat{v}(t). \quad (8)$$

При этом вектор  $\hat{X}(t)$  представляет собой:

$$\hat{X}(t) \equiv \begin{bmatrix} \hat{x}_1(t) \\ \hat{x}_1'(t) \\ \hat{x}_2(t) \\ \hat{x}_2'(t) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

В матричной форме прогнозирование может быть записано следующим образом:

$$X^*(t + \Delta T) := \varphi \hat{X}(t) + \hat{V}(t). \quad (10)$$

Где изменение  $\Delta T$  представлено в виде матрицы  $\varphi$ :

$$\varphi \equiv \begin{bmatrix} 1 & \Delta T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Чтобы найти неопределенность  $X^*(t + \Delta T)$  нужно определить оценку ковариации между оценкой каждого элемента (свойства)  $\hat{x}(t)$  и его производной.

Оценка этой неопределенности,  $\hat{Q}_x(t)$  позволяет определить критерии устойчивости моделирования. Получаем следующее уравнение:

$$C_x^*(t + \Delta T) := \varphi \hat{C}_x(t) \varphi^T + \hat{Q}_x(t). \quad (12)$$

Процесс «прогнозирование – согласование – улучшение» упрощает проблему согласования через применение ограничения временной непрерывности [1]. Разница, оцениваемая в течение периода  $\Delta T$  между наблюдениями, между прогнозируемым и действительным значением оцениваемого элемента достаточно небольшая, чтобы провести согласование «ближайшего соседа».

Определим матрицу  ${}^Y\mathbf{H}_X$ , которая преобразует систему координат вектора  $X(t)$  в систему координат, связанную с пространством наблюдений:

$$Y(t) = {}^Y\mathbf{H}_X X(t) + W(t), \quad (13)$$

где  $W(t)$  – специальные эффекты.

Матрица  ${}^Y\mathbf{H}_X$  составляет модель процесса считывания, который прогнозирует наблюдение  $Y(t)$ , основанное на определенных свойствах (вектор  $X(t)$ ). Оценивание  ${}^Y\mathbf{H}_X$  является ключевым аспектом в моделировании. Модель процесса наблюдения  ${}^Y\mathbf{H}_X$  не может быть оценена идеально. Процесс наблюдения, например, в системе «машинного зрения» запускается с помощью фото – оптических, оптических и электрических эффектов ( $W(t)$  в формуле 13). В большинстве случаев  $W(t)$  неизвестно, следовательно, оценка  $\hat{W}(t)$  будет равна:

$$\hat{W}(t) \equiv E\{W(t)\} = 0 \quad (14)$$

и

$$\hat{C}_y(t) \equiv E\{W(t)W(t)^T\}. \quad (15)$$

Для иллюстрации этого процесса, предположим, что мы можем наблюдать текущее значение двух элементов (свойств), но не их производных. В этом случае  ${}^Y\mathbf{H}_X$  может использоваться для вывода вектора перемещения производных из прогнозируемых элементов (свойств). Тогда, используя вектор первого порядка из предыдущего примера, получаем:

$$\begin{bmatrix} y_1^*(t) \\ y_2^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1^*(t) \\ x_1^{**}(t) \\ x_2^*(t) \\ x_2^{**}(t) \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Матрица  ${}^Y\mathbf{H}_X$  может быть представлена любым линейным преобразованием. В случае, когда оценка состояния и наблюдение связаны нелинейным преобразованием  $F(X)$ , то  ${}^Y\mathbf{H}_X$  аппроксимируется через первую производную или якобиан преобразования  ${}^Y\mathbf{J}_X$ :

$${}^Y \mathbf{J}_X = \frac{\partial F(X)}{\partial X}. \quad (17)$$

Оценим модель прогнозирования  $M(t)$ , состоящую из списка элементов  $P_n^*(t)$ , каждый из которых содержит вектор параметров  $X(t)$  и модель наблюдения  $O(t)$ , состоящую из списка элементов  $P_m(t)$ , каждый из которых включает в себя параметры вектора  $Y(t)$ . На этапе согласования определяется наилучшие оценки параметров наблюдения и прогнозирования, исходя из близости (расстояния) между прогнозируемыми и наблюдаемыми свойствами. Расстояние есть квадрат расстояния Махаланобиса.

Вектор прогнозируемых параметров определяется формулой:

$$Y_n^* = {}^Y \mathbf{H}_X X_n^*, \quad (18)$$

с ковариацией

$$C_{yn}^* = {}^Y \mathbf{H}_X \cdot C_{xn}^* \cdot {}^Y \mathbf{H}_X^T. \quad (20)$$

Вектор наблюдаемых параметров  $Y_m$  определяется аналогично, с ковариацией  $C_{ym}$ . Тогда получаем квадрат расстояния Махаланобиса между прогнозируемыми и наблюдаемыми свойствами:

$$D_{nm}^2 = \frac{1}{2} \{ (Y_n^* - Y_m)^T (C_{yn}^* + C_{ym})^{-1} (Y_n^* - Y_m) \}. \quad (21)$$

В случае единственного скалярного свойства формулу 21 можно представить в виде следующего выражения:

$$D_{nm}^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(y_n^* - y_m)^2}{(\sigma_{yn}^{*2} + \sigma_{ym}^2)}. \quad (22)$$

Таким образом, этап согласования влечет за собой минимизацию нормированного расстояния между прогнозируемыми и наблюдаемыми свойствами.

После того, как сделан вывод, что наблюдения соответствуют прогнозу, свойства модели могут быть улучшены. Уравнения фильтра Калмана позволяют оценивать вектор свойств и их производные  $\hat{X}_n(t)$ , исходя

из объединения вектора прогнозируемых свойств  $Y_n^*(t)$  с вектором наблюдаемых свойств  $Y_m(t)$ . При этом находятся точные оценки, как рассматриваемых свойств модели, так и их производных. Найденные с помощью уравнений оценки равноценны оценкам, полученным методом наименьших квадратов.

Ключевым элементом фильтра Калмана является матрица весов  $K(t)$ , которая может быть определена с помощью неопределенности прогнозирования  $C_y^*(t)$ :

$$K(t) := C_x^*(t) \cdot {}^y H_x^T [C_y^*(t) + C_y(t)]^{-1} \quad (23)$$

Матрица  $K(t)$  позволяет улучшать свойства рассматриваемой модели и их производные с помощью разницы между прогнозируемыми и наблюдаемыми свойствами:

$$\hat{X}(t) := X^*(t) + K(t)[Y(t) - Y^*(t)] \quad (24)$$

Точность оценки определяется с помощью выражения:

$$\hat{C}(t) := C^*(t) - K(t) \cdot {}^y H_x \cdot C^*(t) \quad (25)$$

Уравнения 10, 12, 23, 24 и 25 являются пятью уравнениями фильтра Калмана. Таким образом, фильтр Калмана является рекурсивным фильтром, оценивающим вектор состояния динамической системы позволяющий осуществлять улучшение свойств модели этой системы.

### 1.4.2 Сеть Байеса

Байесовская сеть представляет собой направленный ациклический граф, каждой вершине которого может соответствовать показание мультисенсора или суждение, а дуги графа кодируют отношения правдоподобия между вершинами [24]. Отношение правдоподобия соответствует вероятности  $P_i(c_{ij})$  события  $V$  на  $i$ -ом узле при некотором значении измеряемой величины  $c_{ij}$ ;  $i = 1, \dots, m$ ;  $j = 1, \dots, n$ . В данном подходе

измеренное значение величины переводится в отношение правдоподобия с помощью некоторой функции преобразования  $f_i(c_{ij})$ , задаваемой для каждой из  $m$  измеряемых величин [25]. Если измеряемые переменные являются независимыми случайными величинами, то вероятность события  $P_i(V)$  на узле  $i$  вычисляется по формуле полной вероятности  $P_i(V) = \prod_{j=1}^n P_i(c_{ij})$ . Если измеряемые переменные являются зависимыми, вероятность  $P_i(V)$  вычисляется с использованием условных вероятностей. Тогда для каждого мультисенсора с помощью байесовской сети может быть вычислена вероятность некоторого события в системе мониторинга (например, пожара для системы пожарной безопасности) [26], на основе которых может быть выработано общее суждение.

### 1.4.3 Теория Демпстера-Шефера

Подход Демпстера-Шефера [27, 28] представляет собой математическую теорию свидетельств, основанную на двух функциях преобразования измеряемых величин – доверия  $f_i(c_{ij})$  и правдоподобия  $\bar{f}_i(c_{ij})$  – использующихся для вычисления возможности события. Для каждой измеряемой переменной назначаются три меры: мера того, что событие произошло  $m(V)$ ; что событие не произошло  $m(\bar{V})$  и мера неопределенности  $m(V \cup \bar{V})$ . Вероятность  $P_i(c_{ij})$  того, что событие произошло, лежит в интервале  $m(V) < P_i(V) < 1 - m(\bar{V})$ . Таким образом, в отличие от байесовской сети, в подходе Демпстера-Шефера каждый параметр описывается не одной, а тремя мерами. Преимуществом этого подхода является получение диапазона вероятности события  $P_i(V)$  и учет неопределенности каждого сенсора.

#### 1.5.4. Теория голосования

В проблеме голосования существует множество  $A$  из  $n$  кандидатов, которые ранжируются группой из  $m$  избирателей (экспертов, судей и т.д.) Нахождение свертки нескольких ранжирований в единственное отношение предпочтения, называемое отношением консенсуса, является предметом теории общественного выбора.

В случае измерительных данных существует возможность построить ранжирование каждого из  $m$  свойств  $n$  мультисенсоров на основе некоторого простого закона, например, по возрастанию величины.

Затем методами теории голосования на основании построенных ранжирований можно найти единственное отношение консенсуса, являющееся приведением разнородных данных мультисенсоров к единой порядковой шкале.

Применительно к проблеме агрегирования измерительных данных мультисенсоров в беспроводных сенсорных сетях следует отметить, что корректность результатов традиционно применяемых подходов, включая байесовские сети, теорию Демпстера-Шефера, фильтра Калмана, нечеткую логику [29], нейронные сети [30] и др., зависит от выбора той или иной функции преобразования измеряемых величин в суждения. Поскольку данная функция, как правило, выбирается из субъективных предположений или на основе весьма приближенных вычислений, указанные подходы уступают в корректности методам теории голосования, в которых ранжирования формируются на основе непосредственных показаний мультисенсоров, а суждения выносятся без использования каких-либо функций преобразования показаний.

Таким образом, для назначения приоритетов узлам сенсорной сети был выбран подход к агрегированию данных мультисенсоров на основе теории голосования.

## 1.5 Применение метода динамического моделирования

В настоящее время метод динамического моделирования широко применяется для интеграции воспринимаемой информации от различных источников главным образом в таких системах как мобильный робот и машинное зрение.

Первоначально метод динамического моделирования был разработан именно для создания систем мобильных роботов. Первая такая система была основана на использовании вращающегося ультразвукового датчика расстояния [31]. Затем система была усовершенствована для создания трехмерных моделей поверхностей, используя методы теории оценивания, и может включать в себя, например, 24 ультразвуковых датчика расстояния и осуществлять интеграцию показаний датчика, одометрии и априорной информации [1]. Структура описанной системы представлена на рисунке 2.

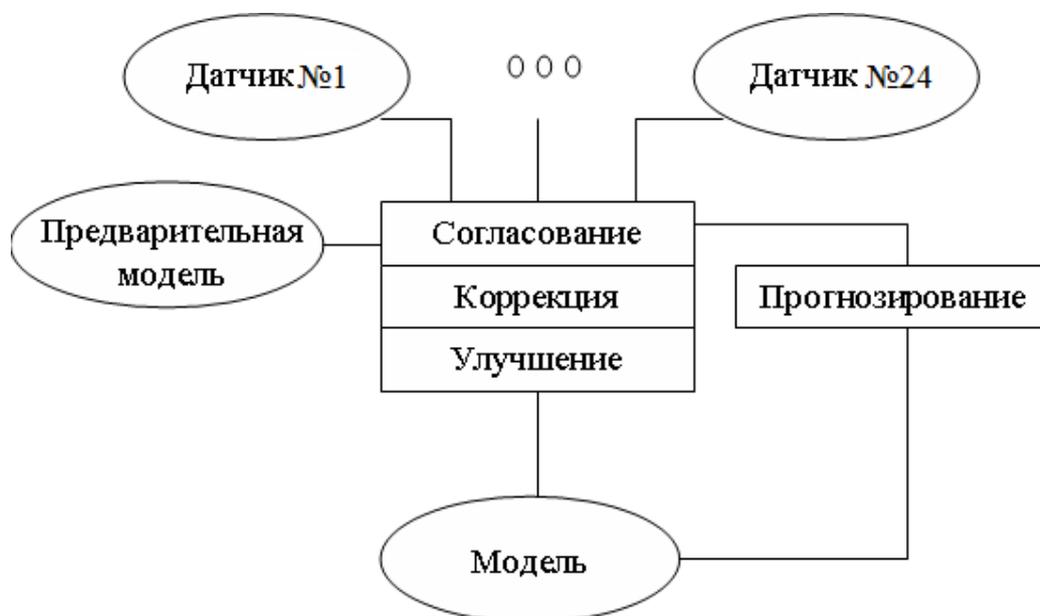


Рисунок 2. Структура динамического моделирования системы мобильного робота

Модель спроектирована для мобильного робота прямоугольной формы. Датчики расположены в виде кольца таким образом, что на каждую из четырех поверхностей и каждый угол, приходится по три датчика.

При создании систем машинного зрения реального времени метод динамического моделирования используется для решения задач отслеживания границ сегментов изображений [1]. Примером такой системы является система слежения «token tracke» [1], которая создает трехмерное изображение, по шагам соединяя воспринимаемые сегменты.

На основе системы «token tracke», применяя метод динамическое моделирование, создана система стереоскопического (технического, машинного) зрения. Структура системы представлена на рисунке 3.

Первый модуль системы определяет границы изображения объекта исследования. С помощью второго модуля полученные границы отфильтровываются, и на вход следующего модуля поступает модель наблюдаемого изображения, которая далее, проходя все этапы динамического моделирования, преобразовывается в трехмерное изображение объекта.

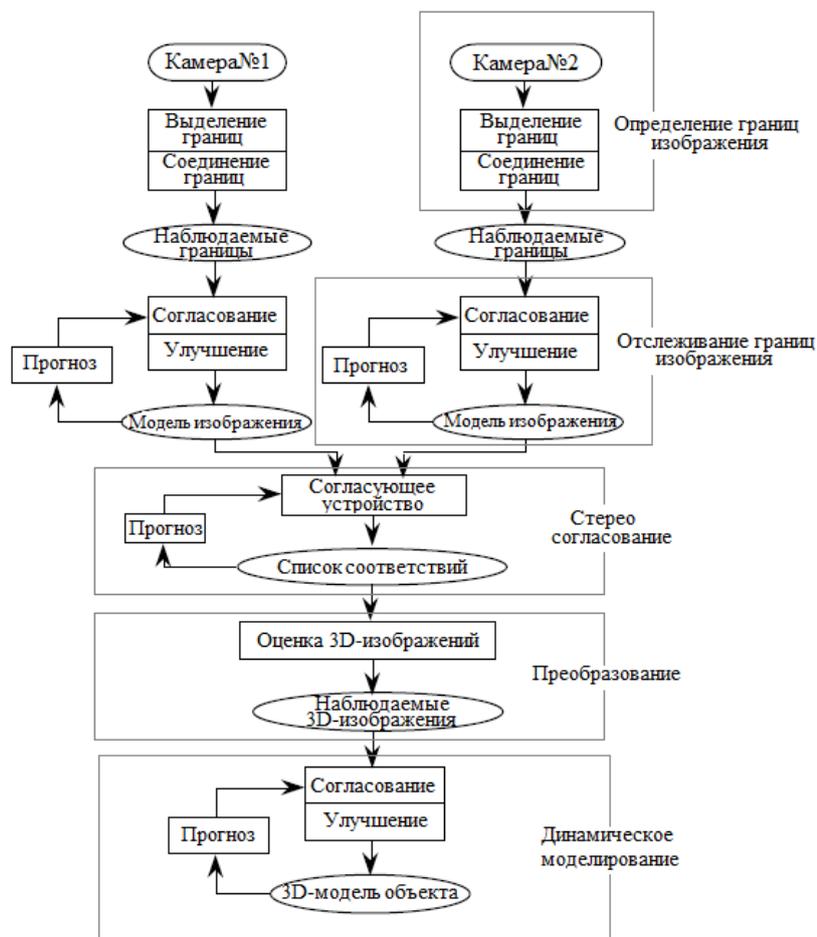


Рисунок 3. Структурная схема системы технического зрения

На рисунке 4 представлена система получения трехмерного изображения. Данная система формирует комплексное трехмерное изображение объекта исследования, основанное на данных, полученных с помощью ультразвуковых датчиков и стереоскопического зрения.

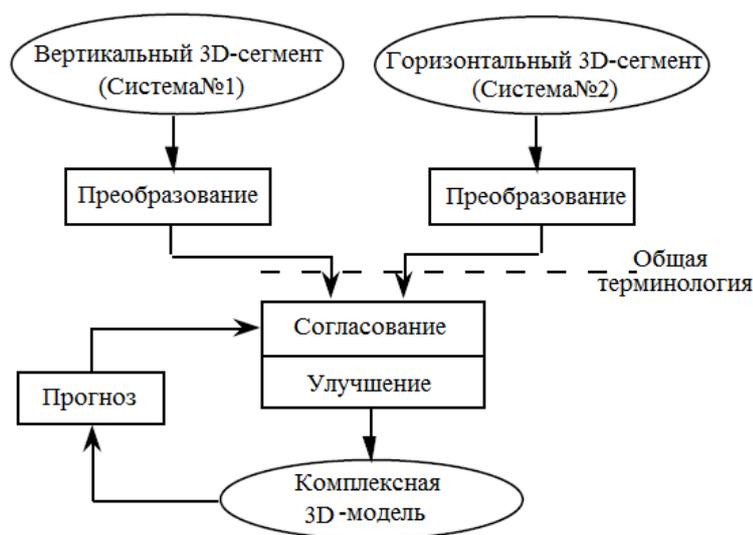


Рисунок 4. Система №1 – система, основанная на использовании набора ультразвуковых датчиков; система №2 – система машинного зрения

## 1.6 Выводы к главе 1.

1. Проведенный обзор состояния проблемы агрегирования измерительных данных мультисенсоров в беспроводных сенсорных сетях показывает, что корректность результатов традиционно применяемых подходов, включая байесовские сети, теорию Демпстера-Шефера, фильтра Калмана и др., зависит от выбора той или иной функции преобразования измеряемых величин в суждения. Поскольку функция преобразования измеряемых величин в суждения, как правило, выбирается из субъективных предположений или на основе весьма приближенных вычислений, указанные подходы уступают в корректности методам теории голосования, в которых ранжирования формируются на основе непосредственных показаний мультисенсоров, а суждения выносятся без использования каких-либо функций преобразования показаний.
2. Наиболее корректным способом агрегирования данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети является подход на основании теории голосования.

## ГЛАВА 2

### АГРЕГИРОВАНИЕ ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ ОТНОШЕНИЯ КОНСЕНСУСА

В этой главе рассматриваются методы построения отношения консенсуса на основе измерительной информации и обсуждается использование медианы Кемени для построения отношения консенсуса.

#### 2.1 Определение отношения консенсуса

Принятие решения методом консенсуса — метод принятия такого решения, которое одобряют все участники процесса, стремящиеся прийти к наиболее приемлемому решению. Слово консенсус происходит от латинских слов *sum* — «с» или «совместно» и *sentire* — «мыслить» или «чувствовать». Таким образом, «консенсус» означает «мыслить (чувствовать) совместно». Термин «консенсус» обычно используется как для обозначения процесса принятия решения, так и для самого решения. Таким образом, решение-консенсус неотрывно связано с самим процессом. Метод консенсуса, не похожий на другие методы принятия решений (например, голосование, основанное на мнении большинства), широко используется в настоящее время.

Пусть имеется  $m$  ранжирований (свойств объектов) на множестве  $n$  объектов  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ , то есть имеем множество отношений предпочтения  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ , где каждое из  $m$  ранжирований  $\lambda = \{a_1 \succ a_2 \succ \dots \sim a_s \sim \dots \sim a_n\}$  может включать  $\succ$ , строгое отношение предпочтения  $\pi$ , и  $\sim$ , отношение эквивалентности (или безразличия)  $\nu$ , такие что  $\lambda = \pi \cup \nu$ . Множество отношений  $\Lambda$  называется профилем предпочтения для данных  $m$  ранжирований (свойств).

Пусть пространство  $\Pi$  является множеством всех  $n!$  линейных (строгих) отношений порядка  $\succ$  на  $A$ . Каждый линейный порядок

соответствует одной из перестановок первых  $n$  натуральных чисел  $N_n = \{1, 2, \dots, n\}$ . Будем считать, что перестановка  $\beta \in \Pi$  элементов  $a_1, \dots, a_n$  представляет профиль предпочтения  $\Lambda$ , тогда  $\beta$  есть отношение консенсуса. Отношение консенсуса  $\beta$  является ближайшим к ранжированиям  $\lambda_1, \dots, \lambda_m$ .

Другими словами, единственное отношение строгого предпочтения  $\beta$ , которое является наилучшим представителем профиля предпочтения  $\Lambda$  в смысле заданной на нем меры близости, называется отношением консенсуса.

Ранжирование  $\lambda$  можно представить  $(n \times n)$  матрицей отношения  $R = [r_{ij}]$ , строки и столбцы которой соответствуют объектам  $a$ :

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } a_i \succ a_j \\ 0 & \text{if } a_i \sim a_j \\ -1 & \text{if } a_i \prec a_j \end{cases} . \quad (26)$$

Функция расстояния (расстояние Кемени) между двумя ранжированиями  $\lambda_k$  и  $\lambda_l$  определяется формулой:

$$d(\lambda_k, \lambda_l) = \sum_{i < j} |r_{ij}^k - r_{ij}^l| \quad (27)$$

и может рассматриваться как число различий между двумя ранжированиями. В формуле (27) суммируются только элементы верхней треугольной подматрицы  $r_{ij}$ ,  $i < j$ , матрицы  $R$ .

Расстояние между произвольным ранжированием  $\lambda$  и профилем  $\Lambda$  можно теперь определить следующим образом:

$$D(\lambda, \Lambda) = \sum_{k=1}^m d(\lambda, \lambda_k) = \sum_{i < j} \sum_{k=1}^m |r_{ij}^k - r_{ij}| \quad (28)$$

Если обозначить  $|r_{ij}^k - r_{ij}|$  через  $d_{ij}^k$ , получаем:

$$D(\lambda, \Lambda) = \sum_{i < j} \sum_{k=1}^m d_{ij}^k , \quad (29)$$

где

$$d_{ij}^k = \begin{cases} 0, & \text{if } a_i^k \succ a_j^k \\ 1, & \text{if } a_i^k \sim a_j^k. \\ 2, & \text{if } a_i^k \prec a_j^k \end{cases} \quad (30)$$

Теперь можно определить  $(n \times n)$  матрицу профиля  $P = [p_{ij}]$ :

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^m d_{ij}^k \quad (31)$$

и число свойств  $m$  профиля  $\Lambda$  представлено в каждом из элементов матрицы как  $\frac{1}{2}(p_{ij} + p_{ji}) = m$ ,  $i, j = 1, \dots, m$ . Таким образом, значение  $\frac{1}{2} p_{ij}$  можно понимать, как число предпочтений  $a_j$  относительно  $a_i$ .

## 2.2 Принципы голосования

Нахождение отношения консенсуса является задачей голосования, в которой множество  $A$  – это множество кандидатов, а  $\Lambda$  – множество избирателей. Существует несколько принципов голосования для выбора отношения консенсуса.

Принцип простого большинства состоит в следующем: подсчитывается число избирателей, отдавших предпочтение каждому из предложенных кандидатов. Наилучшим по данному принципу признается кандидат, которого назвали таковым большинство избирателей.

Рассмотрим данный принцип на примере: 6 избирателям предложено выбрать лучшего из 7 кандидатов. Получены следующие результаты:

$$\lambda_1: a_2 \succ a_1 \succ a_3 \succ a_4 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_7$$

$$\lambda_2: a_2 \succ a_3 \succ a_1 \succ a_4 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_7$$

$$\lambda_3: a_1 \succ a_3 \succ a_4 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_7 \succ a_2$$

$$\lambda_4: a_3 \succ a_1 \succ a_4 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_7 \succ a_2$$

$$\lambda_5: a_4 \succ a_1 \succ a_3 \succ a_5 \succ a_6 \succ a_7 \succ a_2$$

$$\lambda_6: a_5 \succ a_1 \succ a_3 \succ a_4 \succ a_6 \succ a_7 \succ a_2$$

Применяя принцип простого большинства, можно сделать вывод, что победил избиратель  $a_2$ , так как он набрал наибольшее количество голосов (2 голоса из шести), в то время как кандидаты  $a_1$ ,  $a_3$ ,  $a_4$  и  $a_5$  получили по одному голосу, а кандидаты  $a_6$  и  $a_7$  не получили ни одного голоса.

Отношение консенсуса для данного примера, полученное с помощью принципа простого большинства будет иметь вид:

$$\beta = a_2 \succ a_1 \sim a_3 \sim a_4 \sim a_5 \succ a_6 \sim a_7. \quad (32)$$

Однако, на данном примере можно увидеть серьезный недостаток рассматриваемого принципа – победившего кандидата  $a_2$  лучшим назвали два избирателя, а худшим четыре из шести [32].

Для улучшения принципа большинства существуют следующие возможности для улучшения:

- победителем объявляется кандидат, набравший не менее половины голосов избирателей (экспертов);
- победитель не должен занимать последнего места ни в одном из ранжирований.

Рассмотрим следующий принцип голосования – принцип Борда [33]. Суть данного принципа состоит в следующем: кандидатам (альтернативам) в каждом ранжировании присваиваются ранги (числа), кандидату, занимающему последнее место в ранжировании, присваивается ранг равный нулю, предпоследнее место – равный 1 и так далее до ранга равного  $n - 1$  (при общем числе кандидатов равном  $n$ ). Если обозначить через  $S_i$  общую сумму рангов, приписываемую каждой альтернативе  $a_i$ , то наилучшей признается альтернатива  $a_{ik}$ , для которой  $S_{ik} \geq S_{i1} \geq S_{i2} \geq \dots S_{in}$ .

Если применить принцип Борда к предыдущему примеру, то получаем суммарные ранги, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Кандидат, $a_i$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
Суммарный ранг, $S_i$	31	12	27	23	19	10	4

Как видно из таблицы 2.1, победителем по принципу Борда стал кандидат  $a_1$ .

Отношение консенсуса для данного примера, полученное с помощью принципа Борда будет иметь вид:

$$\beta = a_1 \succ a_3 \succ a_4 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_7. \quad (33)$$

Данный принцип считается лучшим по сравнению с принципом простого большинства, однако он также имеет существенный недостаток – полученное решение может не совпадать с решением, найденным с помощью более точных приемов, например, при парном сравнении альтернатив в рамках принципа Кондорсе [34].

Суть принципа Кондорсе состоит в следующем: для каждой пары кандидатов  $a_i$  и  $a_j$  подсчитывается число избирателей  $S_{ij}$ , считающих, что  $a_i$  лучше  $a_j$  ( $a_i \succ a_j$ ). Если  $S_{ij} > S_{ji}$ , то для данного профиля предпочтения  $a_i$  считается лучшей, по сравнению с  $a_j$ . Кандидат  $a_i$  объявляется победителем для данного профиля предпочтения если  $S_{ij} \geq S_{ji}$  для любого  $j \neq i$ . Такая альтернатива называется альтернативой Кондорсе.

Применяя для нашего примера принцип Кондорсе, получаем следующую матрицу парных сравнений, представленную в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Матрица парных сравнений

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	$a_5$	$a_6$	$a_7$
$a_1$	×	4	5	5	5	6	6
$a_2$	2	×	2	2	2	2	2
$a_3$	0	4	×	5	5	6	6
$a_4$	1	4	1	×	5	6	6
$a_5$	1	4	1	1	×	6	6
$a_6$	0	4	0	1	0	×	6
$a_7$	0	4	0	0	0	0	×

Как мы видим из таблицы 2, победителем по принципу Кондорсе, как и по принципу Борда стал кандидат  $a_1$ , но так бывает не всегда.

Общепризнано, что решение, полученное на основе принципа Кондорсе, является самым близким к наилучшему [35, 36]. Однако, этот принцип также имеет недостаток, который называется парадоксом Кондорсе [37]. Рассмотрим это на простом примере. Пусть имеются следующие ранжирования:

$$\lambda_1: a_1 \succ a_2 \succ a_3$$

$$\lambda_2: a_3 \succ a_2 \succ a_1$$

$$\lambda_3: a_2 \succ a_3 \succ a_1$$

Тогда матрица парных сравнений имеет вид, представленный на таблице 2.3:

Таблица 2.3

	$a_1$	$a_2$	$a_3$
$a_1$	×	2	1
$a_2$	1	×	2
$a_3$	2	1	×

В результате получаем, что  $S_{12} > S_{21}$ ,  $S_{23} > S_{32}$  и  $S_{31} > S_{13}$ . Таким образом, победителя назвать нельзя.

Парадокс может возникать вследствие несогласованности исходных ранжирований между собой. В таких случаях альтернативы Кондорсе не существует.

Условия согласованности предпочтений (ранжирований):

– единодушие: если альтернатива  $a_i$  лучше  $a_j$  во всех ранжированиях множества  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}$ , то  $a_i$  должна быть лучшей и в отношении консенсуса  $\beta$ ;

– отсутствие диктатора: не существует избирателя  $\lambda_k$ , чьи предпочтения всегда превалируют;

– независимость от посторонних альтернатив: для двух профилей предпочтения  $\Lambda$  и  $\Lambda'$  таких, что для всех  $k$  – ых избирателей альтернативы  $a_i$  и  $a_j$  имеют одинаковый порядок, то данные альтернативы имеют одинаковый порядок и в  $\beta$ .

Существует парадокс Эрроу, который звучит следующим образом: ни один из принципов голосования не может обеспечить одновременное выполнение всех вышеперечисленных условий. Таким образом, теорема Эрроу служит объяснением парадокса Кондорсе, который означает, что профиль предпочтения не обязательно является транзитивным, даже если каждое  $k$ -ое ранжирование является линейным порядком.

### 2.3 Определение ранжирования Кемени

Аналогично формуле 28 можно определить расстояние от  $\beta$  до профиля предпочтения  $\Lambda$  и затем представить отношение консенсуса в виде:

$$\beta = \arg \min_{\lambda \in \Pi} D(\lambda, \Lambda), \quad (34)$$

где

$$D(\lambda, \Lambda) = \sum_{k=1}^m d(\lambda, \lambda_k). \quad (35)$$

Отношение консенсуса, определяемое по формуле 34, называется ранжированием Кемени [38, 39]. Это такое отношение консенсуса, которому соответствует минимальное значение суммы элементов верхней треугольной подматрицы матрицы профиля.

Расстояние между произвольным ранжированием  $\lambda$  и профилем  $\Lambda$  можно теперь определить следующим образом:

$$D(\lambda, \Lambda) = \sum_{k=1}^m d(\lambda, \lambda_k) = \sum_{i < j} \sum_{k=1}^m |r_{ij}^k - r_{ij}| = \sum_{i < j} \sum_{k=1}^m d_{ij}^k. \quad (36)$$

Из (36), с учетом  $r_{ij} = 1$  для всех  $i < j$ , что соответствует естественному линейному порядку  $a_1 \succ a_2 \succ \dots \succ a_n$ , следует, что для любого  $k = 1, \dots, m$  имеем:  $d_{ij}^k = |1 - 1| = 0$  если  $a_i^k \succ a_j^k$ ;  $d_{ij}^k = |0 - 1| = 1$  если  $a_i^k \sim a_j^k$  и  $d_{ij}^k = |-1 - 1| = 2$  если  $a_i^k \prec a_j^k$ .

Тогда можно определить матрицу профиля  $P = [p_{ij}]$ , где

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^m d_{ij}^k, \quad i, j = 1, \dots, n, \quad (37)$$

и отношение консенсуса  $\beta$  определяется как такое ранжирование узлов из  $A$ , что расстояние  $D(\beta, \Lambda)$  от  $\beta$  до профиля  $\Lambda$  минимально, то есть

$$\beta = \arg \min_{\lambda \in \Pi} D(\lambda, \Lambda) = \arg \min_{\lambda \in \Pi} \sum_{i < j} p_{ij}, \quad (38)$$

где  $\Pi$  – множество всех  $n!$  строгих предпочтений  $\succ$  на  $A$ . Каждая перестановка объектов из  $A$  соответствует перестановке соответствующих строк и столбцов матрицы. Поэтому задача (34) заключается в нахождении такой перестановки строк и столбцов матрицы профиля, что сумма элементов ее верхней треугольной подматрицы минимальна. Полученное таким образом ранжирование  $\beta$  называется ранжированием Кемени и является единственным корректным способом преодоления парадокса Кондорсе [40].

## 2.4 Методы решения задачи о ранжировании Кемени

Задача вычисления ранжирования Кемени в общем случае является NP-полной и решается методом полного перебора [41]. Классический пример NP-полной задачи это «задача коммивояжера». Она заключается в отыскании самого выгодного маршрута, проходящего через указанные города хотя бы по одному разу с последующим возвратом в исходный город. В условиях задачи указываются критерий выгодности маршрута (кратчайший, самый дешёвый, совокупный критерий и т. п.) и соответствующие матрицы расстояний, стоимости и т. п. Как правило, указывается, что маршрут должен проходить через каждый город только один раз.

Все эффективные (сокращающие полный перебор) методы решения задачи коммивояжера — методы эвристические. Основными методами решения NP-полных являются генетические алгоритмы, метод муравьиной колонии и метод ветвей и границ [42]. Последний наиболее эффективен, поскольку, в отличие от других методов, дает не приближенное а наиболее эффективное решение.

Впервые этот метод был предложен Лендом и Дойгом в 1960 году [43] для решения задач целочисленного линейного программирования.

Метод ветвей и границ — общий алгоритмический метод для нахождения оптимальных решений различных задач оптимизации, особенно

дискретной и комбинаторной оптимизации. По существу, метод является комбинаторным (алгоритм перебора) с отсевом подмножеств множества допустимых решений, не содержащих оптимальных решений.

Общая идея метода может быть описана на примере поиска минимума и максимума функции  $f(x)$  на множестве допустимых значений  $x$ . Функция  $f$  и  $x$  могут быть произвольной природы. Для метода ветвей и границ необходимы две процедуры: ветвление и нахождение оценок (границ).

Процедура ветвления состоит в разбиении области допустимых решений на подобласти меньших размеров. Процедуру можно рекурсивно применять к подобластям. Полученные подобласти образуют дерево, называемое деревом поиска или деревом ветвей и границ. Узлами этого дерева являются построенные подобласти.

Процедура нахождения оценок заключается в поиске верхних и нижних границ для оптимального значения на подобласти допустимых решений.

В основе метода ветвей и границ лежит следующая идея (для задачи минимизации): можно проверять на оптимальность не полные, а частичные решения. Для этого вычисляют оценку расстояния  $D$  и если для некоторого частичного решения  $T=\{T_1, T_2, \dots, T_{k-1}\}$  его расширение  $T=\{T_1, T_2, \dots, T_{k-1}, T_k\}$  имеет расстояние большее или равное величине его собственного расстояния, т.е.  $D_{k-1}(T_1, T_2, \dots, T_{k-1}) \leq D_k(T_1, T_2, \dots, T_{k-1}, T_k)$ , то мы можем отбросить это расширение, а следовательно и последующие. Таким образом, пространство решений имеет древовидную форму.

Каждой вершине дерева соответствует множество  $T=\{T_1, T_2, \dots, T_{k-1}, T_k\}$ , которое рассматривается как представитель (лидер) всех решений, содержащих его в качестве начальной части. Корень дерева является лидером абсолютно всех возможных решений и для него  $T=\emptyset$ , на следующем уровне дерева находится  $n$  лидеров с числом элементов равным единице, каждый из этих лидеров имеет  $n - 1$  последователей мощности равной 2.

Таким образом, каждый из лидеров  $k$ -того уровня имеет  $n - k$  последователей мощности  $|T| = k + 1$ ,  $k = 0, 1, \dots, n - 1$ . Если  $|T| < n - 1$ , то соответствующее решение называется текущим частичным решением. При  $|T| = n - 1$ , то такое решение называется полным, так как в этом случае оно будет определять порядок всех элементов множества  $A$ .

Каждому лидеру соответствует значение оценки  $D_{low}$  (нижняя граница) функции расстояния от профиля  $\lambda$  до оптимального линейного порядка  $\beta$ . Верхней границей  $D_u$  называется наименьшее значение функции расстояния для полученных к данному моменту полных решений.

Если нижняя граница для узла дерева совпадает с верхней границей, то это значение является минимумом функции и достигается на соответствующей подобласти.

С помощью оценок верхней и нижней границ проверяется лидер на перспективность. Если  $D_{low} \geq D_u$ , то ясно, что все решения с данным лидером являются бесперспективными, т.е. не могут быть оптимальными.

Более подробно алгоритм метода ветвей и границ описан в статье Бартелемью [44]. Применительно к медиане Кемени, метод ветвей и границ состоит из следующих частей:

- порождение случайных отношений строгого порядка и эквивалентности;
- построение матрицы профиля на основе заданных отношений предпочтения и эквивалентности;
- нахождение всех решений задачи о медиане Кемени;
- нахождение единственного решения для множества всех оптимальных решений задачи о медиане Кемени.

Входными данными для алгоритма являются количество свойств (альтернатив)  $n$  и количество сенсоров (ранжирований)  $m$ .

Алголоподобное описание алгоритма нахождения медианы Кемени методом ветвей и границ:

$$D_{least} = \sum_{\substack{i=1,\dots,n \\ j=i+1,\dots,n}} \min(p_{ij}, p_{ji});$$

$D_u := \infty; T := 0; V := N_n; \_ [инициализация]$   
 $LEADER(1,0);$   
*procedure*  $LEADER(k, D) : \_ [определение \_ процедуры]$   
*for*  $\_l = 1 \_ to \_n - 1 + k \_ do \_i + \_ D_u \neq D_{least}$   
*then*

$$\left\{ \begin{array}{l} T_k := v_l; V := V - \{v_l\} \_ [ветвление] \\ D_l := D + \sum_{i=1,\dots,n-k} P_{Sk,vi} \_ [измерение \_ расстояния \_ благодаря \_ расширению \_ лидера] \\ D_{low} := D_l + \sum_{\substack{i=1,\dots,n-k \\ j=i+1,\dots,n-k}} \min(p_{vivj}, p_{vjvi}) \_ [модификация \_ нижней \_ границы] \\ \text{if } \_ D_{low} < D_u \_ \text{ then } \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \_ k < n - 1 \_ \text{ then } \_ LEADER(k + 1, D_l) \\ \beta := T \_ [сохраняем \_ полное \_ решение] \\ D_u := D_{low} \_ [сохраняем \_ расстояние \_ до \_ полного \_ решения] \\ V := V \cup \{T_k\}; T_i := T - \{T_k\} \_ [отсечение] \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Данный алгоритм позволяет найти одну медиану Кемени. Поскольку известно, что медиана Кемени не всегда является единственной, то потребовалось расширение алгоритма для поиска всех медиан Кемени некоторого профиля предпочтений.

## 2.5 Неоднозначность задачи поиска медианы Кемени

Для поиска всех медиан Кемени для заданного профиля предпочтений проведена модификация метода ветвей и границ путем накопления найденных медиан с текущей нижней границей. Таким образом, для каждой найденной нижней границы формируется массив соответствующих медиан Кемени, обнуляющийся при обнаружении новой нижней границы.

Алголоподобное описание алгоритма нахождения всех медиан Кемени методом ветвей и границ:

$$D_{least} = \sum_{\substack{i=1,\dots,n \\ j=i+1,\dots,n}} \min(p_{ij}, p_{ji});$$

$D_u := \infty; T := 0; V := N_n; \_ [инициализация]$   
 $LEADER(1,0);$   
*procedure*  $LEADER(k, D) : \_ [определение \_ процедуры]$   
*for*  $l = 1 \_ to \_ n - 1 + k \_ do \_ i + \_ D_u \neq D_{least}$   
*then*

$$\left\{ \begin{array}{l} T_k := v_l; V := V - \{v_l\} \_ [ветвление] \\ D_l := D + \sum_{i=1,\dots,n-k} P_{Sk,vi} \_ [измерение \_ расстояния \_ благодаря \_ расширению \_ лидера] \\ D_{low} := D_l + \sum_{\substack{i=1,\dots,n-k \\ j=i+1,\dots,n-k}} \min(p_{vivj}, p_{vjvi}) \_ [модификация \_ нижней \_ границы] \\ \text{if } \_ D_{low} < D_u \_ \text{then} \left\{ \begin{array}{l} \text{if } \_ k < n - 1 \_ \text{then } \_ LEADER(k + 1, D_l) \\ \beta := T \_ [сохраняем \_ полное \_ решение] \\ D_u := D_{low} \_ [сохраняем \_ расстояние \_ до \_ полного \_ решения] \\ V := V \cup \{T_k\}; T_i := T - \{T_k\} \_ [отсечение] \end{array} \right. \end{array} \right.$$

Для иллюстрации работы алгоритма, рассмотрим пример, описанный в статье [45]. В таблице 4 представлены данные, полученные от шести различных датчиков ( $m=6$ ) при количестве объектов равном четырем ( $n=4$ ):

Таблица 2.4. Данные с узлов системы пожарной сигнализации.

Узел	Результаты измерений					
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$
	Температура, °C	Скорость изменения температуры, °C/c	Задымленность, дБ/м	Уровень CO, мг/м <sup>3</sup>	Срабатывание датчика пламени	Наличие людей
$a_1$	42	8	0,03	0,31	–	–
$a_2$	270	15	0,08	0,86	+	–
$a_3$	80	35	0,13	0,83	+	+
$a_4$	50	12	0,03	0,58	+	–
$a_5$	300	38	0,10	0,90	–	–
$a_6$	62	10	0,11	0,70	+	+
$a_7$	62	7	0,04	0,18	–	–

На основе данных таблицы 2.4 получены следующие ранжирования:

$$\begin{aligned}
\lambda_1 : a_5 \succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \sim a_7 \succ a_4 \succ a_1 \\
\lambda_2 : a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_4 \succ a_6 \succ a_1 \succ a_7 \\
\lambda_3 : a_3 \succ a_6 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_7 \succ a_4 \succ a_1 \\
\lambda_4 : a_5 \succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7 \\
\lambda_5 : a_2 \sim a_3 \sim a_4 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_5 \sim a_7 \\
\lambda_6 : a_3 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_2 \sim a_4 \sim a_5 \sim a_7
\end{aligned} \tag{39}$$

Применяя разработанный в рамках данной работы алгоритм, были получены следующие результаты:

$$\begin{aligned}
\beta_1 &= \{a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_7 \succ a_1\} \\
\beta_2 &= \{a_3 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_7 \succ a_1\} \\
\beta_3 &= \{a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\} \\
\beta_4 &= \{a_3 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\}
\end{aligned}$$

Таким образом, медиана Кемени действительно не всегда является однозначным решением.

Представленные медианы Кемени можно свести в одну, если пренебречь строгим порядком и положить  $a_5 \sim a_3$  и  $a_7 \sim a_1$ :

## 2.6 Решение задачи об отношении консенсуса по правилу Борда.

Для построения отношения консенсуса в беспроводных сенсорных сетях предпочтительнее использовать правило Борда [33, 46], которое представляет собой приближенное решение задачи Кемени и в большом количестве практических случаев может служить хорошей заменой ранжирования Кемени. По правилу Борда каждой альтернативе присваивается количество баллов в зависимости от ее места в ранжировании: 0 баллов за последнее место, 1 балл за предпоследнее место и т.д. до  $n - 1$  баллов за первое место. Баллы каждой альтернативы суммируются по всем ранжированиям, и ее место в отношении консенсуса определяется полученной суммой.

Для подсчета баллов Борда удобно пользоваться  $(n \times n)$  электоральной матрицей (или турнирной таблицей)  $S = [s_{ij}]$ , где

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^m b_{ij}^k, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad (40)$$

$$b_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{если } a_i^k \succ a_j^k \\ 1/2 & \text{если } a_i^k \sim a_j^k \\ 0 & \text{если } a_i^k \prec a_j^k \end{cases}. \quad (41)$$

Матрица  $S$  обладает очевидным свойством:  $s_{ij} + s_{ji} = m$ . Сумма баллов, полученных альтернативой в каждом ранжировании по принципу Борда, равна сумме элементов соответствующей строки электоральной матрицы.

Для профиля (39) итоговое отношение консенсуса имеет следующий вид:

$$\beta = \{a_3 \succ a_2 \succ a_5 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\}. \quad (42)$$

Оно позволяет выстроить  $n$  узлов в порядке важности измеряемых ими физических величин.

Полученный порядок используется для назначения приоритетов узлам сети, так как ранжирования исходного профиля формируются исходя из актуальных данных измерений, характеризующих обстановку в окружении каждого конкретного сенсорного узла. Высший приоритет получает узел  $a_3$ , а низший –  $a_7$ .

## 2.7 Выводы к главе 2.

1. Наилучшим методом решения задачи об отношении консенсуса является нахождение ранжирования Кемени. К сожалению, задача о ранжировании Кемени является NP-полной, то есть время нахождения ее точного решения экспоненциально зависит от  $n$ .
2. Для практического применения предпочтительнее всего использовать правило Борда, которое представляет собой приближенное решение задачи Кемени.

3. Полученный методом поиска отношения консенсуса линейный порядок можно использовать для назначения приоритетов узлам сенсорной сети, так как ранжирования исходного профиля формируются исходя из актуальных данных измерений, характеризующих обстановку в окружении каждого конкретного сенсорного узла.

## **ГЛАВА 3**

### **РАЗРАБОТКА ПРОТОКОЛА ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРОВ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ.**

В этой главе рассматриваются особенности передачи данных в беспроводных сенсорных сетях и описывается применение отношения консенсуса для формирования очереди передачи сенсорного узла и распределения пропускной способности сети. Также приводится статистическое обоснование предложенной схемы организации передачи данных в сенсорной сети.

Беспроводные сенсорные сети все чаще используются для организации различных видов мониторинга: параметров окружающей среды [47], состояния конструкций, зданий и сооружений [48], в системах безопасности (пожарной, сейсмической, экологической и др.) [49], для отслеживания целей в процессе ведения боевых действий [50, 51] и т.п. В таких системах разнородные данные собираются мультисенсорами, входящими в состав узлов, расположенных в подлежащих мониторингу точках определенной географической области, и передаются по беспроводной сети в центральный узел для обработки и принятия решений. Поиск методов агрегирования данных мультисенсоров является актуальной задачей [52–55].

### **3.1 Устройство беспроводных сенсорных сетей**

#### **3.1.1 Узлы беспроводной сенсорной сети**

Узел беспроводной сенсорной сети содержит вычислительный модуль, датчики (сенсоры), модуль беспроводной связи и модуль электропитания [56].

Основными характеристиками микропроцессоров вычислительного модуля узла БСС являются низкое энергопотребление в рабочем и энергосберегающем режимах, гибкое управление потреблением; низкая стоимость микроконтроллера и внешних компонентов и малые габариты, для чего микроконтроллеры выпускаются в миниатюрных корпусах [57].

Датчики сенсорных узлов отличаются малыми размерами и очень малым энергопотреблением порядка  $1 \text{ А} \cdot \text{ч}$ .

Модуль беспроводной связи служит для организации беспроводной связи между узлами сети. В качестве модуля беспроводной связи используют высокоинтегрированные приёмники, передатчики и приёмопередатчики, работающие в нелицензируемых (ISM – Industrial, Scientific, Medical) диапазонах частот. В настоящее время в Российской Федерации на основании постановлений правительства РФ для этих целей выделены частоты  $433,92 \pm 0,2\%$  МГц, 868–868,2 МГц, 2.45 ГГц. Эти частоты могут использоваться без оформления соответствующего разрешения ГКРЧ (Государственная комиссия по радиочастотам).

Модуль электропитания обеспечивает длительное (до нескольких лет) функционирование узлов сети. На данный момент для энергообеспечения узлов сети используются гальванические элементы, т.к. они способны отдавать достаточно большую мощность и имеют низкую стоимость.

В качестве операционной системы для узлов сенсорной сети используется TinyOS [58], компонентная операционная система с открытым исходным кодом, написанная на языке `nesC`. Библиотека компонентов TinyOS включает сетевые протоколы, драйверы сенсоров и утилиты получения и сбора информации, которые могут быть усовершенствованы в клиентских приложениях. Реализованная в TinyOS событийная модель дает возможность управлять питанием на низком уровне, что позволяет экономить энергопотребление.

При разработке TinyOS основное внимание было уделено обеспечению малого энергопотребления и возможности использования для программирования языка с довольно высоким уровнем абстракции. В результате была создана ОС с простой, но весьма развитой компонентной архитектурой. Специфика этой архитектуры заключается в обеспечении развитых и надежных механизмов параллельного выполнения задач в

условиях крайне ограниченных ресурсов, в первую очередь памяти и электропитания.

nesC (network embedded system C) — это компонентно-ориентированный язык программирования, построенный на базе C. Основной структурной единицей программы на NesC является компонент, который через интерфейсы взаимодействует с другими компонентами. Интерфейсы в nesC двунаправленны, они определяют способы взаимодействия между двумя типами компонентов: пользователями и провайдерами. Интерфейсы могут содержать объявления команд и событий. Реализации команд должны быть описаны в компоненте-провайдере, а реализации обработчиков объявленных в интерфейсе событий — в компоненте-пользователе.

### **3.1.2 Стек протоколов беспроводной сенсорной сети**

Стек протоколов в беспроводной сенсорной сети построен на базе модели OSI [59] и состоит из передатчика (соответствующему физическому уровню OSI), контроля ошибок и MAC-протокола (соответствуют канальному уровню OSI), протокола маршрутизации (соответствующему сетевому уровню OSI), транспортного протокола и уровня приложений (аналогично модели OSI).

Задача транспортного уровня – обеспечение надежности передачи данных и устойчивости к перегрузкам сети. Протоколы данного уровня используют различные механизмы обнаружения и восстановления потерь данных. Основными механизмами обнаружения потерь данных являются подтверждение получения и подсчет номеров в последовательности. Восстановление потерь данных может вестись как между соседними узлами сети, так и между источником и приемником данных [60, 61].

Обеспечение гарантии передачи данных между соседними узлами является более энергоэффективным, чем обеспечение гарантии передачи между источником и приемником. Это одна из причин, по которым протокол TCP не подходит для беспроводных сенсорных сетей.

Протоколы транспортного уровня можно разделить на две части:

- передачи пакетов, в которых все отправленные пакеты должны быть получены центральным узлом;
- обнаружения событий, в которых задачей является обнаружение события, то есть достаточно одного пакета с информацией о событии, полученного центральным узлом [59, 62].

Задачей протоколов сетевого уровня в беспроводных сенсорных сетях является обеспечение маршрутизации пакетов. Задача осложняется изменением топологии сети, ограниченными объемами памяти, необходимостью самоорганизации узлов и энергосбережения. В результате протоколы сетевого уровня для беспроводных сенсорных сетей сильно отличаются от существующей системы использования IP-адресов [57].

В основе протоколов сетевого уровня лежит формирование надежного маршрута и, по возможности, резервных маршрутов на основе некоторой метрики, отличающейся в зависимости от протокола. Наиболее популярным из таких протоколов является LEACH [61, 63], решающий одновременно задачи маршрутизации и снижения энергопотребления. Данный протокол разделяет сеть на кластеры и выбирает в каждом кластере вершину, после чего строит маршрут от вершин кластера к центральному узлу.

Задачи MAC-протокола – обеспечение связи между узлами сети и гарантия доставки кадров между соседними узлами, управление доступом к радиоканалу, коррекция ошибок радиоканала. Основными целями разработчиков MAC-протоколов являются снижение энергопотребление и повышение пропускной способности радиоканала [64-68].

В качестве физического уровня передачи данных для беспроводных сенсорных сетей принят стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee)

### **3.1.3 Технология ZigBee**

Стандарт IEEE 802.15.4 (ZigBee) [69-71] предусматривает работу в трех диапазонах: один канал от 868,0 до 868,6 МГц (для Европы), 10 каналов в

диапазоне от 902 до 928 МГц (шаг центральных частот 2 МГц, самая нижняя из них — 906 МГц) и 16 каналов в диапазоне от 2400 до 2483,5 МГц (шаг центральных частот 5 МГц, самая нижняя из них – 2405 МГц).

Сеть стандарта IEEE 802.15.4 содержит два типа устройств: полнофункциональные (FFD) и устройства с уменьшенной функциональностью (RFD). Они отличаются тем, что FFD могут устанавливать соединения с любыми устройствами, а RFD только с FFD.

В каждой пикосети (PAN) должно быть устройство — координатор PAN. Его функции может выполнять только FFD. Сеть, состоящая из одного FFD и нескольких RFD, образует топологию типа «звезда». Если в сети FFD несколько, топология может быть более сложной — типа одноранговой сети (сети равноправных устройств, peer-to-peer) «каждый с каждым», рисунок 15:

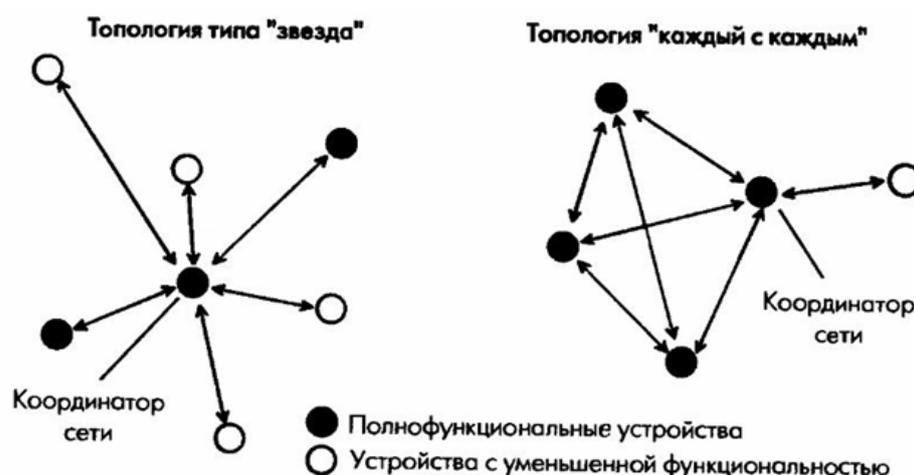


Рисунок 15. Топологии сетей ZigBee

Но в любом случае одно из FFD выполняет функцию координатора сети. Каждому устройству сети присваивается 64-разрядный адрес. Отметим, что стандарт предусматривает взаимодействие устройств не только в рамках одной PAN, но и между различными соседними PAN (для чего и нужна развитая система адресации). Для упрощения обмена внутри сети координатор PAN может присвоить устройствам более короткие 16-разрядные адреса. В этом случае для межсетевого взаимодействия используются 16-разрядные идентификаторы сетей, также назначаемые координатором.

Информационный обмен в пикосети происходит посредством последовательности суперфреймов. В общем случае суперфрейм включает управляющий интервал (beacon), за ним следует интервал конкурентного доступа (САР) в соответствии с механизмом CSMA/CA и период назначенного доступа. Последний содержит набор временных интервалов, назначенных определенным устройствам, чувствительным к задержкам, для передачи данных (гарантированные тайм-слоты, GTS), например, для связи беспроводного манипулятора «мышь» с компьютером. Управляющий интервал передает только координатор PAN. Отметим, что в суперфрейме может не быть ни управляющего интервала, ни GTS [72].

Каждое устройство передает информацию посредством фреймов (пакетов). Они могут быть четырех типов — управляющие (beacon frame), фреймы данных, фреймы подтверждения приема данных и фреймы команд MAC-уровня. Фреймы физического уровня содержат заголовок с синхропоследовательностью и информацией о размере фрейма (до 127 байт) и собственно поле данных — кадр MAC-уровня. Последний содержит заголовок со всей необходимой информацией о фрейме (тип, наличие криптозащиты, необходимость подтверждения приема и т. п.), адреса и идентификаторы устройства — отправителя и получателя, собственно поле данных и проверочную контрольную сумму.

### **3.1.4 Беспроводные модули MICAz**

Модули MICAz являются последним поколением разработок беспроводных модулей фирмы Crossbow [73]. Общий вид модуля представлен на рисунке 16.



Рисунок 16. Беспроводной модуль MICAz

Беспроводные модули MICAz работают в диапазоне частот от 2,4 до 2,48 ГГц, являются маломощными радиопередатчиками. MICAz основаны на использовании набора протоколов высокого сетевого уровня ZigBee (стандарта IEEE 802.15.4), описанного в предыдущем пункте 3.1.2.

Блок диаграмма беспроводного модуля представлена на рисунке 17.

Важной составляющей модуля является микроконтроллер. MICAz создан на основе микроконтроллера ATmega128L фирмы Atmel [74]. Данный микроконтроллер является 8-разрядным микроконтроллером с 128 Кб внутрисистемно программируемой Flash памятью, прогрессивной RISC архитектурой и энергонезависимой памятью программ и данных.

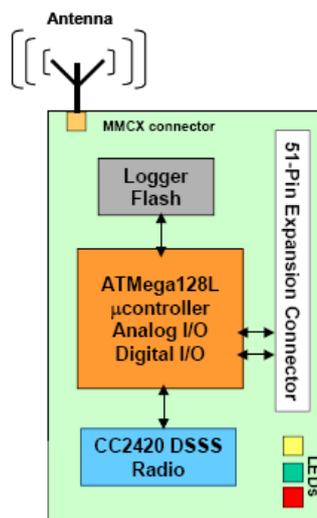


Рисунок 17. Блок-диаграмма модуля MICAz

Достоинством беспроводных модулей MICAz является большое время автономной работы от батарей, благодаря хорошей энергосберегаемости. Кроме того, для MICAz характерна высокая степень безопасности даже при малых скоростях передачи данных. Общий вид беспроводной сенсорной сети на базе модулей MICAz представлен на рисунке 18:

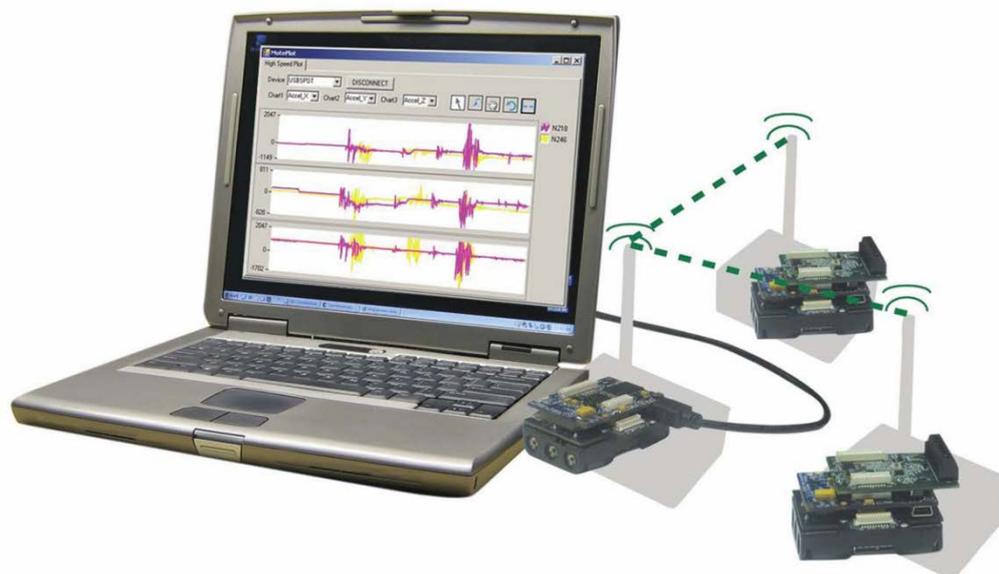


Рисунок 18. Общий вид БСС на базе MICAz

### 3.1.5 Архитектура беспроводной сенсорной сети

В каждой беспроводной сенсорной сети может быть только одно устройство-координатор. Основная задача координатора заключается в

установке параметров и создании сети, выборе основного радиочастотного канала, в задании уникального сетевого идентификатора. При этом координатор является наиболее сложным устройством, обладает наибольшим объемом памяти и повышенным энергопотреблением (питание от сети).

Маршрутизаторы используются для расширения радиуса действия сети, поскольку способны выполнять функции ретрансляторов между устройствами, расположенными далеко друг от друга.

Существуют следующие топологии беспроводных сенсорных сетей [75]:

1. Точка–точка (связь между двумя узлами сети);
2. Звезда (связь узлов сети с одним «главным» узлом);
3. Кластерное дерево;
4. Одноранговая многоячейковая сеть.

Соединения типа точка – точка и звезда подходят для самых простых приложений, обладают минимальной стоимостью, максимально низким энергопотреблением и позволяют использовать стратегию стандартного множественного доступа. В каждой сети с топологией звезда имеется один координатор сети.

Топология кластерное дерево (рисунок 19) обеспечивает масштабируемость сети и расширение зоны покрытия, не требуя дополнительных затрат на инфраструктуру. Сеть типа кластерное дерево может включать в себя несколько подсетей с топологией звезда.

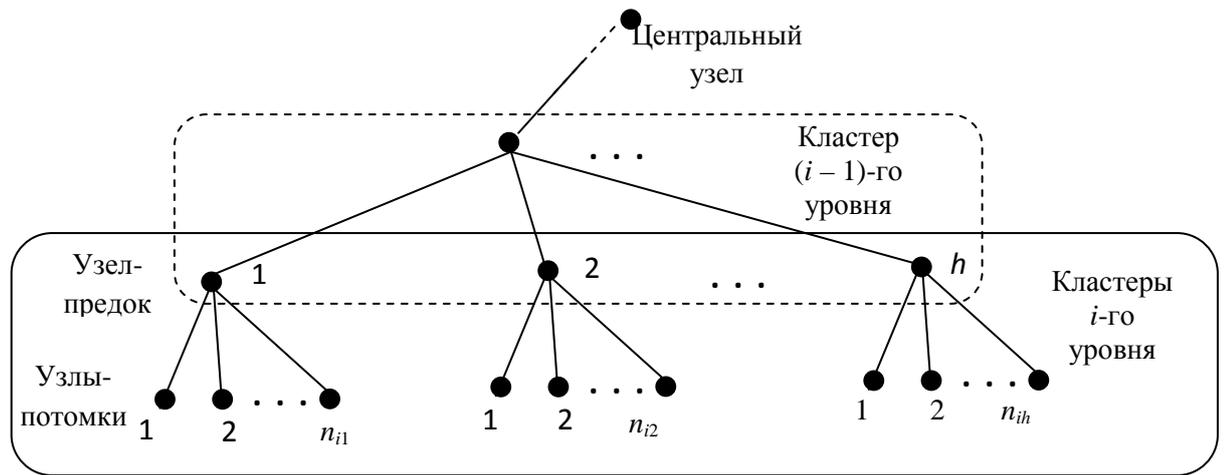


Рисунок 19. Топология древовидной сети

При многоячейковой топологии нет выделенных маршрутизаторов и любой сетевой узел может выполнять функции маршрутизатора для других устройств в сети. Однако в многоячейковой сети срок службы узлов уменьшается за счет увеличенной вычислительной нагрузки и увеличения частоты использования приёмопередатчика.

### 3.1.6 Особенности передачи данных в беспроводной сенсорной сети

При передаче данных в беспроводных сенсорных сетях возникают существенные проблемы, связанные с ограниченной полосой пропускания используемых в качестве линий связи радиоканалов. В частности, в ситуациях, когда много узлов-источников одновременно инициируют передачу данных, может возникать перегрузка или даже коллапс сети, в результате чего ее пропускная способность, выражаемая в количестве проходящих от источника к центральному узлу пакетов данных в единицу времени, падает практически до нуля [76].

Одним из возможных подходов к решению проблемы является назначение приоритетов передаваемым по сети пакетам и организация первоочередной доставки пакетов с более высоким приоритетом [77]. Этот подход согласуется концепцией качества обслуживания (Quality of Service, QoS), являющейся общепринятой для сенсорных сетей, основанных на

обнаружении событий. Основными показателями QoS являются малая задержка передачи данных от источника к центральному узлу и низкие потери данных о событиях [78].

### 3.2 Протокол передачи пакетов данных мультисенсоров.

Разработанный способ назначения приоритетов узлам беспроводной сенсорной сети использован при создании протокола передачи пакетов данных в беспроводных сенсорных сетях. Разработанный протокол относится к протоколам передачи пакетов транспортного уровня беспроводной сенсорной сети.

В древовидной сети на каждой вершине кластера выполняется алгоритм управления сетью, представленный на рисунке 20.

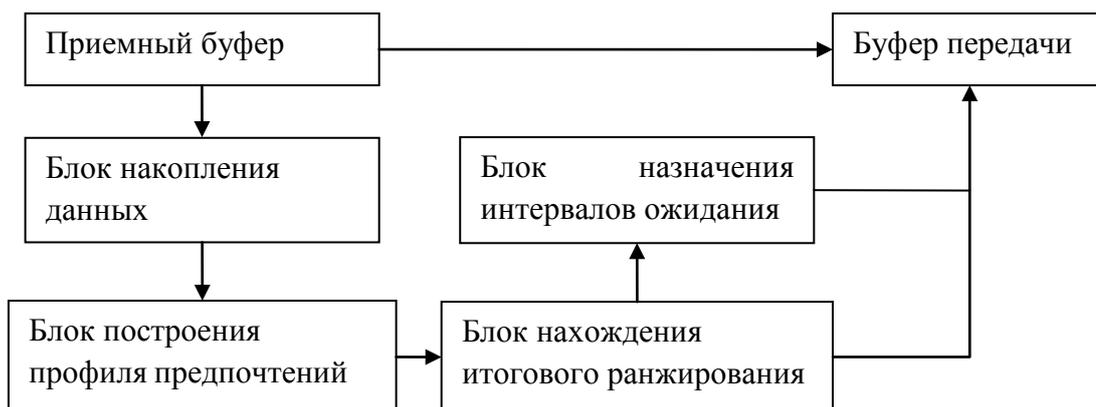


Рисунок 20. Блок-схема протокола передачи данных мультисенсоров на основе назначения

Передаваемые с узлов-потомков пакеты данных поступают в приемный буфер и передаются в блок накопления пакетов данных. В этом блоке из пакетов данных извлекается передаваемая измерительная информация. Пример данных с мультисенсоров сети пожарной сигнализации приведен в таблице 3.1

Таблица 3.1. Данные с узлов системы пожарной сигнализации.

Узел	Результаты измерений					
	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$\lambda_3$	$\lambda_4$	$\lambda_5$	$\lambda_6$
	Температура, °С	Скорость изменения	Задымленность, дБ/м	Уровень CO, мг/м <sup>3</sup>	Срабатывание датчика	Наличие людей

		температуры, °C/с			пламени	
$a_1$	42	8	0,03	0,31	–	–
$a_2$	270	15	0,08	0,86	+	–
$a_3$	80	35	0,13	0,83	+	+
$a_4$	50	12	0,03	0,58	+	–
$a_5$	300	38	0,10	0,90	–	–
$a_6$	62	10	0,11	0,70	+	+
$a_7$	62	7	0,04	0,18	–	–

При необходимости обновить приоритеты узлов сети накопленная измерительная информация передается в блок построения профиля предпочтений. Обновление приоритетов производится каждый раз при поступлении пакета данных. Затраты электроэнергии на обновление приоритетов малы по сравнению с затратами электроэнергии на передачу пакета данных, поэтому использование периодического обновления по времени не дает существенного снижения энергопотребления.

В блоке построения профиля предпочтений по накопленной измерительной информации строится профиль предпочтений. Для примера из таблицы 3.1 будет построен профиль предпочтений (43)

$$\begin{aligned}
\lambda_1 : a_5 \succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \sim a_7 \succ a_4 \succ a_1 \\
\lambda_2 : a_5 \succ a_3 \succ a_2 \succ a_4 \succ a_6 \succ a_1 \succ a_7 \\
\lambda_3 : a_3 \succ a_6 \succ a_5 \succ a_2 \succ a_7 \succ a_4 \succ a_1 \\
\lambda_4 : a_5 \succ a_2 \succ a_3 \succ a_6 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7 \\
\lambda_5 : a_2 \sim a_3 \sim a_4 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_5 \sim a_7 \\
\lambda_6 : a_3 \sim a_6 \succ a_1 \sim a_2 \sim a_4 \sim a_5 \sim a_7
\end{aligned} \tag{43}$$

Полученный профиль предпочтений передается в блок нахождения итогового ранжирования, где описанным в главе 2 методом по правилу Борда строится итоговый линейный порядок (44)

$$\beta = \{a_3 \succ a_2 \succ a_5 \succ a_4 \succ a_1 \succ a_7\} \tag{44}$$

На основании построенного линейного порядка назначаются приоритеты узлам. Так, в данном примере узел  $a_3$  получает наивысший

приоритет 6, узел  $a_7$  получается наименьший приоритет 0. Поскольку пакет данных содержит информацию о узле, на котором получены измерительные данные, то в дальнейшем для удобства под приоритетом пакета данных понимается приоритет узла-отправителя пакета.

Назначенные узлам сети приоритеты передаются в блок назначения интервалов ожидания для вычисления интервалов ожидания передачи пакетов данных с узлов сети и в буфер передачи для формирования очереди передачи пакетов данных с учетом приоритета пакетов.

### **3.2.1 Алгоритм назначения интервалов ожидания передачи пакетов данных.**

На основании построенного линейного порядка распределяется пропускная способность сети. Для этого узлам сенсорной сети назначаются интервалы ожидания передачи пакетов данных. Чем выше приоритет узла сети, тем меньше для него назначается интервал ожидания и тем чаще с него поступают данные к центральному узлу.

Поскольку сенсорная сеть организована по древовидной топологии, то интервалы ожидания могут назначаться только вершиной кластера для узлов-потомков. Затем, поскольку узел-потомок сам может являться вершиной некоторого кластера, он должен распределить назначенный ему интервал передачи между своими узлами-потомками.

Изначально все узлы сети имеют одинаковый интервал ожидания передачи, равный 100 мс. Затем формирование интервалов ожидания передачи пакетов данных производится по формуле:

$$T_N = T \frac{R'}{r_{\max} - r_i + 1}, \quad (45)$$

где  $T$  – интервал ожидания передачи пакетов данных, назначенный текущему узлу его узлом-предком,  $r_{\max}$  – максимальный приоритет узлов-потомков,  $r_i$  – приоритет узла-потомка,  $R'$  определяется по формуле

$$R' = n_i(r_{\max} + 1) - \sum_1^{n_i} r_i, \quad (46)$$

где  $n_i$  – число узлов-потомков. Периодически обновленные интервалы ожидания передачи пакетов данных рассылаются узлам-потомкам через пакеты обратной связи.

Суммируя по всем узлам-потомкам (45), получаем частоту передачи пакетов данных на вершине кластера

$$\frac{1}{T} = \sum_{i=1}^{n_i} \frac{r_{\max} - r_i + 1}{T \cdot R'} = \frac{n_i(r_{\max} + 1) - \sum_{i=1}^{n_i} r_i}{T \cdot R'} = \frac{n_i(r_{\max} + 1) - \sum_{i=1}^{n_i} r_i}{T \cdot \left( n_i(r_{\max} + 1) - \sum_{i=1}^{n_i} r_i \right)} = \frac{1}{T}$$

### 3.2.2 Формирование очереди передачи пакетов данных.

Каждый узел беспроводной сенсорной сети поддерживает некоторую очередь передачи пакетов данных. Поскольку на сенсорных узлах размещаются довольно небольшие объемы оперативной памяти, то в случае перегрузки быстро наступает переполнение очереди передачи пакетов.

Как правило, очередь передачи работает по принципу «первый пришел – первый ушел». Назначение приоритетов узлам сети позволяет упорядочить очередь передачи пакетов данных по убыванию приоритета и тем самым реализовать первоочередную отправку более приоритетных пакетов данных.

Для этого при добавлении нового пакета в очередь передачи проводится сравнение приоритета пакета с приоритетами пакетов, содержащихся в очереди. Затем пакет вставляется перед первым пакетом с более низким приоритетом. В случае переполнения очереди передачи пакеты с наименьшим приоритетом отбрасываются.

Например, в очереди передачи размером 3 пакета содержатся пакеты с узлов  $a_3$ ,  $a_5$  и  $a_1$ , а приоритеты узлов сети заданы на основе (44). Из входного буфера поступает пакет с узла  $a_4$ . Сначала приоритет поступившего пакета будет сравнен с приоритетом пакета с узла  $a_3$ :  $a_4 < a_3$ . Затем будут сравнены приоритеты пакетов с узлов  $a_4$  и  $a_5$ :  $a_4 < a_5$ . Наконец, будут сравнены приоритеты пакетов с узлов  $a_4$  и  $a_1$ :  $a_4 > a_1$ . Поскольку приоритет пакета с

узла  $a_4$  больше, чем приоритет пакета с узла  $a_1$ , то поступивший пакет будет размещен в очереди на месте пакета с узла  $a_1$ . Теперь в очереди находятся 4 пакета при максимальной емкости в 3 пакета данных. Следовательно, последний пакет в очереди, полученный с узла  $a_1$ , будет удален из очереди передачи пакетов данных.

### 3.3. Статистическое обоснование предложенной схемы.

Отбрасывание пакетов может привести к утере части измерительной информации. Таким образом, возникает проблема оценки потерь информации при использовании разработанного протокола передачи данных.

#### 3.3.1 Обоснование выбора количества кластеров и допустимого числа отбрасываемых пакетов данных.

Для решения проблемы воспользуемся основанным на статистических соображениях коэффициентом ранговой корреляции Кендалла  $\tau$  [79], который принимает значения в диапазоне от  $-1$  (абсолютно несовместимые ранжирования) до  $+1$  (полное совпадение ранжирований). Совместимость двух ранжирований  $\beta_1$  и  $\beta_2$  определяется по формуле:

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} r_{ij}^1 r_{ij}^2, \quad (48)$$

где  $r_{ij}^1$  и  $r_{ij}^2$  – элементы матрицы отношений для отношения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  соответственно.

Как коэффициент ранговой корреляции Кендалла (48), так и расстояние Кемени (34) являются мерами совместимости ранжирований. Как показано в [80], между ними существует связь:

$$\tau(\beta_1, \beta_2) = 1 - \frac{d(\beta_1, \beta_2)}{n(n-1)},$$

которая позволяет установить связь между параметрами  $n$  и  $k$ .

Действительно, рассмотрим два ранжирования  $\beta_1$  и  $\beta_2$  для  $n$  узлов некоторого кластера. Естественным требованием для них является то, что они должны быть согласованы между собой. Соответствующий уровень согласованности обозначим через  $\tau_1$ . Для  $n-k$  узлов, где  $k$  – число отброшенных пакетов, получатся два других отношения консенсуса  $\beta'_1$  и  $\beta'_2$ , с уровнем согласованности  $\tau_2$ . Стремясь сохранять согласованность при любом  $k$ , примем, что  $\tau_2 = \tau_1$ .

Обозначив  $d_1 = d(\beta_1, \beta_2)$  для случая  $n$  узлов и  $d_2 = d(\beta'_1, \beta'_2)$  для случая  $n-k$  узлов, получаем выражения для соответствующих коэффициентов ранговой корреляции:

$$\tau_1 = 1 - \frac{d_1}{n(n-1)} \text{ и } \tau_2 = 1 - \frac{d_2}{(n-k)(n-k-1)}.$$

Тогда  $\frac{d_1}{n(n-k)} = \frac{d_2}{(n-k)(n-k-1)}$ , откуда

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{(n-k)(n-k-1)}{n(n-k)} \quad (49)$$

Введем параметр  $\theta(n, k)$  как относительную несогласованность приоритетов при удалении  $k$  из  $n$  пакетов:

$$\theta(n, k) = \frac{d_1 - d_2}{d_1} = 1 - \frac{d_2}{d_1}.$$

Тогда, с учетом (49), получаем

$$\theta(n, k) = 1 - \frac{(n-k)(n-k-1)}{n(n-1)}. \quad (50)$$

Ясно, что  $0 \leq \theta(n, k) \leq 1$ . Задаваясь значением параметра  $\theta(n, k)$ , можно выбирать обоснованное количество  $k$  отбрасываемых пакетов для известных значений  $n$  кластера (рисунок 21). Например, при  $n = 30$  удаление четырех пакетов соответствует относительной несогласованности 0,25, а удаление восьми пакетов увеличивает несогласованность до 0,47.

Рассмотрим применение параметра  $\theta$  для обоснования выбора параметров  $n$  и  $k$ .

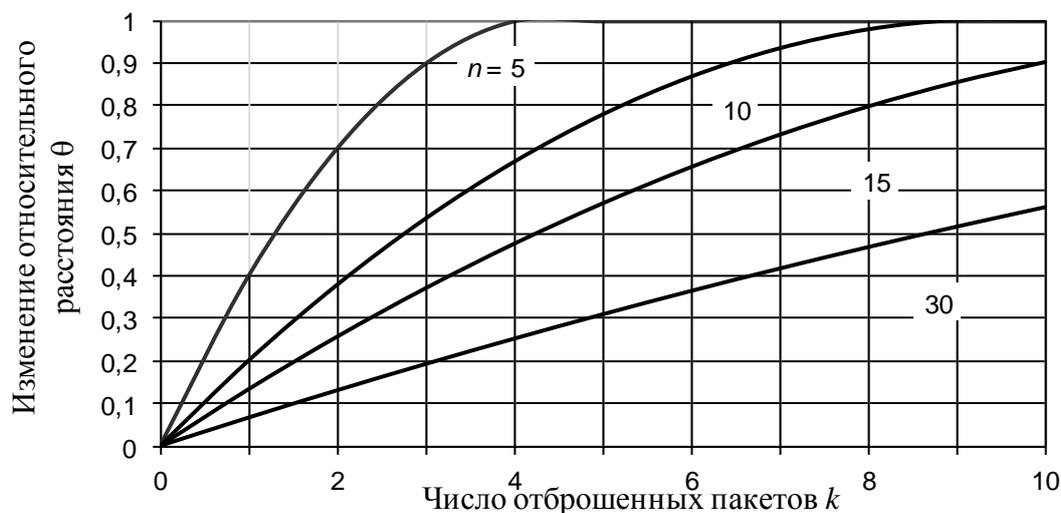


Рисунок 21. Зависимость параметра  $\theta$  от  $n$  и  $k$ .

Обоснование выбора количества кластеров в сенсорной сети

Предположим, на некотором уровне  $i$  сенсорной сети существует  $h$  узлов-предков, каждый из которых получает данные с  $n_i$  узлов-потомков (см. рис. 1). Полагая, что кластеры содержат одинаковое число узлов, определим среднее число  $n_i$  узлов-потомков в каждом кластере на этом уровне:

$$n_i = \frac{n}{h}, \quad (51)$$

где  $n$  – общее число узлов  $i$ -го уровня.

Аналогичным образом можно определить среднее число отбрасываемых пакетов  $k_i$  в каждом узле-предке на этом уровне:

$$k_i = \frac{k}{h}. \quad (52)$$

Подставляя (52) в выражение (50), получаем зависимость  $\theta$  от количества кластеров и количества отбрасываемых пакетов на  $i$ -ом уровне сети:

$$\theta(h, k_i) = 1 - \frac{(n - k_i h)(n - k_i h - 1)}{n(n - 1)}. \quad (53)$$

При организации некоторого уровня сенсорной сети можно для фиксированного количества узлов  $n$  выбирать количество кластеров (узлов-предков)  $h$  и количество отбрасываемых пакетов  $k_i$ . Например, на рис. 22 для  $n = 30$  приведен график зависимости  $\theta$  от  $h$  и  $k_i$ .

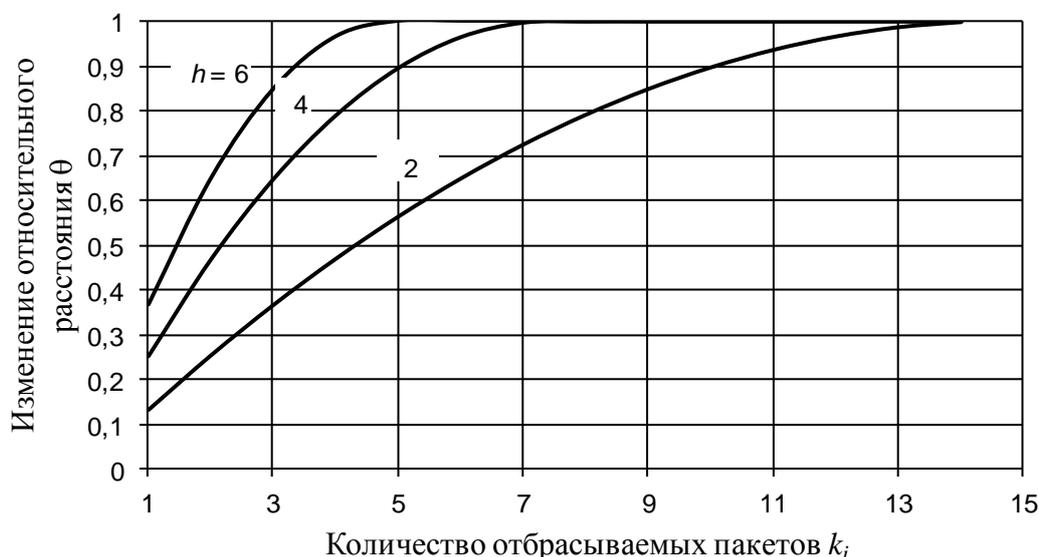


Рисунок 22. Изменение  $\theta$  в зависимости от  $h$  и  $k_i$  при  $n = 30$

Из графика видно, что для заданных  $n$  и  $\theta$  существует множество вариантов выбора  $h$  и  $k_i$ . Очевидно, что при выборе конкретной пары значений  $h$  и  $k_i$  следует стремиться к обеспечению максимальной пропускной способности сети.

Сформулируем условие обеспечения максимальной пропускной способности сети: среднее число пакетов  $n_i - 1$ , получаемых центральным узлом от  $h$  кластеров, должно быть равно среднему числу  $h(n_i - k_i)$  пакетов, переданных узлами-потомками, то есть

$$n_i - 1 = h(n_i - k_i).$$

С учетом (51), получаем:

$$\frac{n}{h} - 1 = n - k_i h. \quad (54)$$

Из выражения (54) следует, что число отбрасываемых на каждом уровне пакетов может быть выражено через общее число узлов  $n$  и число кластеров  $h$  рассматриваемого уровня сети:

$$k_i = \frac{nh + h - n}{h^2}. \quad (55)$$

Используя (51) и (55), можно переписать выражение (53) для параметра  $\theta$  как функцию от  $n$  и  $h$ :

$$\theta(n, h) = 1 - \frac{\left(n - \frac{nh + h - n}{h}\right) \left(n - \frac{nh + h - n}{h} - 1\right)}{n(n-1)} = 1 - \frac{(n-h)(n-2h)}{nh(n-1)}. \quad (56)$$

Зная число узлов сети и задавая параметр  $\theta(n, h)$ , можно, используя выражение (56), выбирать число кластеров  $h$ . Зная  $n$ ,  $h$  и пропускную способность сети  $V$ , можно вычислить  $n_i$ ,  $k_i$  и  $\theta(n, h)$ :

$$n_i = V + 1, \quad k_i = \frac{n - V}{h}, \quad \theta(n, h) = 1 - \frac{V(n - 2h)}{n(n-1)}.$$

Например, для сети из  $n = 30$  узлов, обладающей и пропускной способностью  $V = 9$  пакетов за такт, при заданном  $\theta = 0,8$  получаем  $n_i = 10$ ,  $h = 3$ ,  $k_i = 7$ .

### 3.3.2 Вероятность потери пакета в зависимости от приоритета узла.

Зная разбиение сенсорной сети на кластеры и количество отбрасываемых на вершинах кластеров пакетов, можно вычислить вероятность потери пакета данных в зависимости от его приоритета.

Пакет, отправленный узлом с приоритетом  $j$  в общем ранжировании  $\beta$ , не попадет в итоговое ранжирование  $\beta'$  в том случае, если в частном ранжировании на кластере  $\beta_i$  будет  $n_i - k_i$  пакетов с более высоким приоритетом.

Вероятность того, что первый пакет в частном ранжировании  $\beta_i$  будет иметь в ранжировании  $\beta$  приоритет выше, чем  $j$ , определяется следующим образом:

$$P'_j = \frac{j-1}{n-k_i-1},$$

Для всех пакетов с номерами от 1 до  $n_i - k_i$  в ранжировании  $\beta_i$  вероятность получить в ранжировании  $\beta$  приоритет выше чем  $j$  определяется как

$$P_j = \prod_{l=1}^{n_i-k_i} \frac{j-l}{n-k_i-l},$$

что и является вероятностью потери пакета. В факториальной форме она выглядит как

$$P_j = \frac{j!(n-n_i)!}{(j-n_i+k_i)!(n-k_i)!}.$$

Распределение вероятности потери пакета  $j$  при  $n = 30$ ,  $n_i = 15$ ,  $k_i = 8$  представлено на рисунке 23.

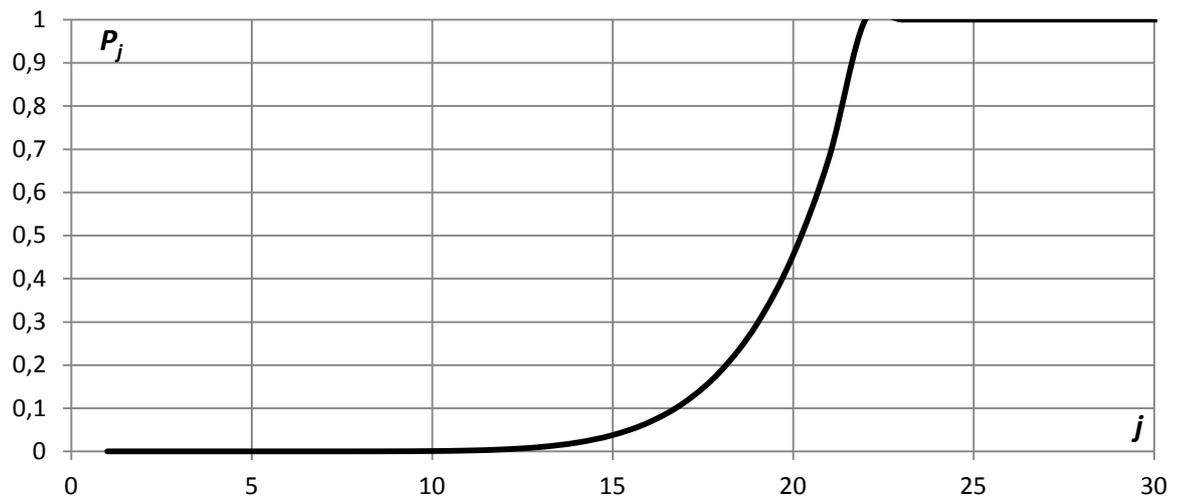


Рисунок 23. Вероятность потери пакета  $j$  при  $n = 30$ ,  $n_i = 15$ ,  $k_i = 8$ .

### 3.4 Выводы к главе 3.

1. Разработан протокол передачи пакетов данных мультисенсоров в беспроводной сенсорной сети, использующий предложенный в главе 2 способ назначения приоритетов пакетам данных и основанный на выделении более приоритетным узлам меньшего интервала ожидания передачи пакетов данных

2. Разработан алгоритм распределения пропускной способности сети, основанный на задании интервала ожидания передачи пакетов данных обратно пропорционально приоритету узлов сети.
3. Разработан алгоритм формирования очереди передачи пакетов данных с учетом приоритетов пакетов.
4. Предложен способ управления беспроводной сенсорной сетью для достижения максимальной пропускной способности сети, позволяющий для заданных значений числа узлов сети и относительной несогласованности приоритетов задавать разбиение сети на кластеры и допустимое количество отбрасываемых пакетов.

## ГЛАВА 4

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДА ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТОВ ДАННЫХ МУЛЬТИСЕНСОРОВ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

В этой главе приводится описание проведенного моделирования разработанного программного комплекса для передачи данных в беспроводной сенсорной сети.

### 4.1 Выбор среды эмуляции

Для тестирования программных продуктов для БСС необходимо развертывание достаточно большого количества узлов и создание соответствующих условий окружающей среды. Для сокращения расходов и ускорения тестирования используются эмуляторы работы БСС. В настоящее время основными являются два широко используемых эмулятора – NS-2 и TOSSIM. Так же следует упомянуть Prowler, разработанный для вероятностного моделирования БСС [81] и работающий на основе программного пакета Matlab.

NS-2 разработан в Калифорнийском университете (США) для моделирования работы сети на уровне передачи пакетов и основан на интерпретаторе объектно-ориентированного языка Otcl. Эмулятор состоит из планировщика событий, библиотек объектов сетевых компонентов библиотек параметров сети. Для запуска модели необходимо написать программу моделирования на Otcl, которая задает параметры сети и задает источникам трафика параметры генерации пакетов через планировщик событий [82].

TOSSIM также является разработкой Калифорнийского университета, но, в отличие от NS, TOSSIM работает за счет подмены компонентов TinyOS и, следовательно, позволяет проводить моделирование только сетей на базе TinyOS. Его плюсом является тесная интеграция с операционной системой, что позволяет моделировать не только передачу пакетов по сети, но и работу

аппаратной части узла БСС. Для описания моделирования используется широко распространенный язык Python [83].

Таким образом, для моделирования БСС на основе TinyOS наиболее эффективным является использование эмулятора TOSSIM. Это позволяет проверить функционирование программного продукта в максимально приближенных к реальным условиям [84, 85].

## **4.2 Описание среды эмуляции TOSSIM**

Как и в большинстве других ОС, в TinyOS основным управляющим механизмом является событие. Событие сигнализирует о получении показаний сенсора, о поступлении пакета данных по беспроводной связи, о срабатывании таймера или о завершении вычислений. Обработка аппаратного события лежит в основе всех операций в TinyOS. Таким образом, для моделирования работы узлов БСС необходимо уметь имитировать происходящие на них аппаратные события. Таким образом, основная задача TOSSIM — эмуляция событий для БСС, моты которой работают под управлением TinyOS. TOSSIM устанавливается на обычный ПК вместе с набором инструментальных средств, необходимых для создания, компиляции, установки и отладки приложений для БСС. Работа с этими инструментами осуществляется с помощью командного интерфейса, характерного для ОС UNIX.

Основными характеристиками эмулятора TOSSIM являются:

- масштабируемость — эмулятор может моделировать работу как отдельных мотов, так и огромных сетей, состоящих из нескольких тысяч узлов;
- полнота — эмулятор в состоянии моделировать различные схемы взаимодействия элементов БСС, причем не только алгоритмы и сетевые протоколы, но и изменяющуюся структуру сенсорной сети;
- точность — эмулятор может представлять поведение сети с необходимой точностью. Определение точного времени наступления событий важно как для анализа, так и для тестирования приложений для БСС;

- достоверность — эмулятор реализует адекватный переход от моделируемой к реальной среде выполнения приложения, предоставляя разработчику возможность тестировать код, который предназначен для реального оборудования.

В состав эмулятора TOSSIM входят следующие элементы:

- средство встраивания самого тестируемого приложения TinyOS в структуру эмулятора;
- очередь событий;
- набор программных компонентов, которые заменяют соответствующие аппаратные компоненты реальных мотов;
- механизмы описания моделей радиоканалов и аналого-цифровых преобразователей (ADC);
- средства связи, предоставляющие возможность внешним программам взаимодействовать с эмулятором.

Сценарий моделирования задается программой на языке Python, содержащей описание топологии сети и задание событий на узлах сети. Типичным примером события является генерация пакета данных и размещение его в буфере входящих сообщений.

Начальная топология сети задается в виде ориентированного графа, где узлы располагаются в вершинах графа, а дуги графа отвечают за качество связи между узлами. Значения, расположенные в дугах графа, соответствуют вероятности ошибки при передаче данных. Топология сети задается в виде текстового файла и считывается в специальную переменную `Tossim([]).radio`.

Для генерации пакетов данных сначала необходимо определить функцию, формирующую сообщение и обертывающее сообщение в пакет. Созданный таким образом пакет данных с помощью средств TOSSIM вставляется в приемный буфер узла сети.

Для получения информации о ходе моделирования при передаче пакета данных и пересчете приоритетов узлов сети в файл журналирования пишется строка с заданной информацией. Можно также воспользоваться приложением

TinyViz. Это приложение реализует написанный на языке программирования Java графический интерфейс, облегчающий работу с эмулятором. TinyViz представляет моделируемую сеть в графическом виде, а также позволяет управлять процессом моделирования при помощи меню. Например, можно задавать показания сенсоров на мотах и вероятность ошибок при передаче данных.

Для заявленных целей моделирования достаточно записывать в журнал информацию о отправке пакетов данных узлами БСС и информацию о получении пакетов данных центральным узлом. Тем самым можно проследить весь путь пакета и посчитать количество получаемых центральным узлом пакетов данных от каждого из источников данных.

Для оценки вероятности потери пакета в зависимости от приоритета узла-источника необходимо провести моделирование при статических показателях сенсоров и сохранить вычисленные приоритеты узлов-источников.

Полученный таким образом журнал может занимать большой объем (порядка 100 Мб), поэтому для первичной обработки используются средства Unix shell. Во второй файл выделяются данные о получении центральным узлом пакетов данных и данные о передаче пакетов с узлов-источников данных.

Полученный второй файл имеет меньший объем и обрабатывается программой на Python для подсчета полученных пакетов с каждого узла и процента потерь.

### **4.3 Обзор существующих протоколов передачи данных в беспроводных сенсорных сетях**

К настоящему времени разработано огромное количество различных протоколов передачи данных для самоорганизующихся беспроводных сетей.

Основными целями разработки протоколов передачи данных является сокращение энергопотребления модулем радиосвязи узла сети и предотвращение перегрузки сети.

Проблема сокращения энергопотребления модуля радиосвязи является частью задачи по увеличению времени функционирования сенсорной сети, поскольку передача данных является существенной частью энергозатрат на функционирование узла [86–88]. Для решения этой проблемы предложены различные подходы. Так, например, в алгоритме адаптивного управления топологией сети мощность радиопередачи зависит от состояния канала радиосвязи, расстояния между узлами и загруженности сети [89]. Другие подходы основаны на построении маршрутной сети для обеспечения наименьших мощностей радиопередачи [90–93]. Ярким примером такого подхода является протокол VPCR [94], основанный на введении полярных координат, назначении каждому узлу координат на основе его расположения в пространстве и разбиении на кластеры по принципу вложенных сфер.

Поскольку разработанный протокол не привязан к какой-либо конкретной топологии сети, то для решения проблемы сокращения энергопотребления модуля радиосвязи допустимо использование в качестве протокола канального уровня любого из существующих протоколов.

Проблема предотвращения перегрузки сети решается, как правило, протоколами транспортного уровня. Наиболее распространенным подходом к решению проблемы является управление интервалами ожидания передачи пакетов для снижения скорости передачи данных при угрозе перегрузки [95–101]. Управление интервалами ожидания передачи пакетов может производиться как на центральном узле путем задания интервала ожидания для всей сети, так и между двумя соседними узлами. Разработанный протокол передачи пакетов данных может быть при необходимости использован совместно с протоколами передачи, осуществляющими предотвращение перегрузки сети путем задания интервала ожидания на центральном узле. В

таком случае разработанный протокол будет опираться на меняющееся базовое значение интервала ожидания для вершин кластеров.

#### **4.4 Эмуляция передачи пакетов данных в системе пожарной сигнализации**

Программный комплекс передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети, управляющий интервалами передачи пакетов данных и очередью передачи пакетов данных на основании приоритетов узлов БСС реализован на аппаратной платформе MICAz, состоящей из микроконтроллера Atmel AVR и микросхемы радиосвязи Chipcon CC2420 [102]. В качестве операционной системы использована TinyOS 2.1 [103, 104]

Предполагалось, что экспериментальная беспроводная сенсорная сеть пожарной сигнализации состоит из 241 узла, организованного в 15 кластеров по 16 узлов в каждом. Каждый узел имеет в своем составе тот же набор сенсоров, что приведен в таблице 1. Радиомодуль CC2420 обеспечивает скорость передачи данных до 256 кБ/с и имеет буфер в 10 пакетов по 60 байт.

Были организованы два эксперимента: в первом эксперименте проверялись управление интервалом ожидания передачи пакетов и задержка доставки пакетов до центрального узла сети; во втором эксперименте определялась доля потерянных пакетов в общем количестве отправленных к центральному узлу пакетов.

В первом эксперименте узлы располагались вдоль прямой линии. Общая продолжительность эмуляции составила 1740 с, из которых первые 30 с отводились на подготовительный период для формирования кластеров и маршрутов передачи данных. В подготовительный период никаких пакетов данных не передавалось.

На 31 секунде на узле 24 возникал пожар, перемещающийся в сторону узла 234 со скоростью 1 узел/с с остановками на узлах 24, 129 и 234 на 500 с.

Узел, находящийся в центре пожара, и три узла с каждой стороны от него измеряют температуру 500 °С и срабатывание датчика пламени.

Температура на узлах с 4 по 7 с каждой стороны убывала по линейному закону от 500 °С до 25 °С. На остальных узлах сети температура оставалась равной 25 °С. Например, при пожаре на узле 129 на узлах с 126 по 132 температура была равна 500 °С, на узлах 125 и 133 – 400 °С, на узлах 124 и 134 – 310 °С, на узлах 123 и 135 – 210 °С, на узлах 122 и 136 – 120 °С, на узлах от 1 до 121 и от 137 до 241 – 25 °С.

Прочие параметры изменяются в зависимости от температуры узла и нескольких соседних узлов. Например, задымленность и содержание CO<sub>2</sub> быстро возрастали при появлении пожара на удалении от узла и после прохода пожара через узел медленно линейно убывали. Присутствие людей определялось некоторой вероятностной величиной, стремившейся к нулю при росте температуры.

При поступлении пакетов с узлов-потомков на вершине кластера вычислялось отношение консенсуса по правилу Борда и назначались приоритеты узлам кластера согласно передаваемой информации.

Для оценки задержки доставки пакетов данных на центральный узел записывалось время генерации пакета сенсорным узлом и время получения пакета центральным узлом. За счет формирования очереди передачи пакетов данных согласно приоритетам узлов, пакеты с более приоритетных узлов передавались в первую очередь и задержка доставки пакетов данных на центральный узел уменьшилась с 900 мс до 500 мс. При этом задержка при передаче данных для узлов, не получающих информации о пожаре (пакетов с низким приоритетом), выросла с 900 мс до 1800 мс.

Для оценки эффективной пропускной способности сети проводилось измерение количества пакетов данных, получаемых центральным узлом от узлов сети в секунду. Проведенное измерение показало, что при использовании разработанного программного комплекса передачи данных центральный узел получает в среднем 0,21 пакета данных с высоким приоритетом и 0,061 пакета данных с низким приоритетом в секунду. Без

использования разработанного программного комплекса центральный узел получает 0,068 пакета данных в секунду (рисунок 24).

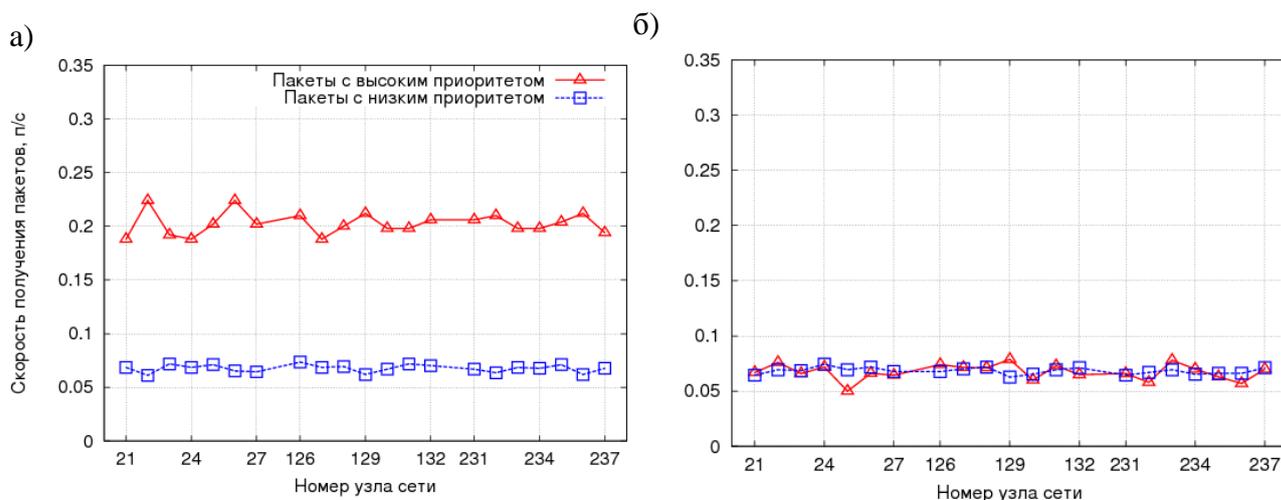


Рис 24. Скорость получения пакетов центральным узлом при использовании (а) и без использования (б) разработанного протокола передачи данных

Для оценки эффективности распределения пропускной способности сети между узлами с различными приоритетами проводилось измерение количества пакетов данных, передаваемых сенсорными узлами на вершину кластера.

За счет использования алгоритма управления интервалами ожидания передачи пакетов данных скорость отправки пакетов (количество отправленных к центральному узлу пакетов данных в секунду), например, с узла 129 при достижении пожаром района его расположения увеличивается с 0,26 пакетов/с до 0,86 пакетов/с (рисунок 25).

Проведенный эксперимент показал, что совместное использование очереди передачи пакетов с учетом приоритета и назначение интервала ожидания передачи пакетов данных позволяют в два раза снизить задержку доставки пакетов данных на центральный узел и в три раза повысить эффективную пропускную способность сети для пакетов с высокоприоритетных узлов. Таким образом, эксперимент доказал что

разработанный протокол передачи пакетов данных является эффективным протоколом для беспроводных сенсорных сетей обнаружения событий.

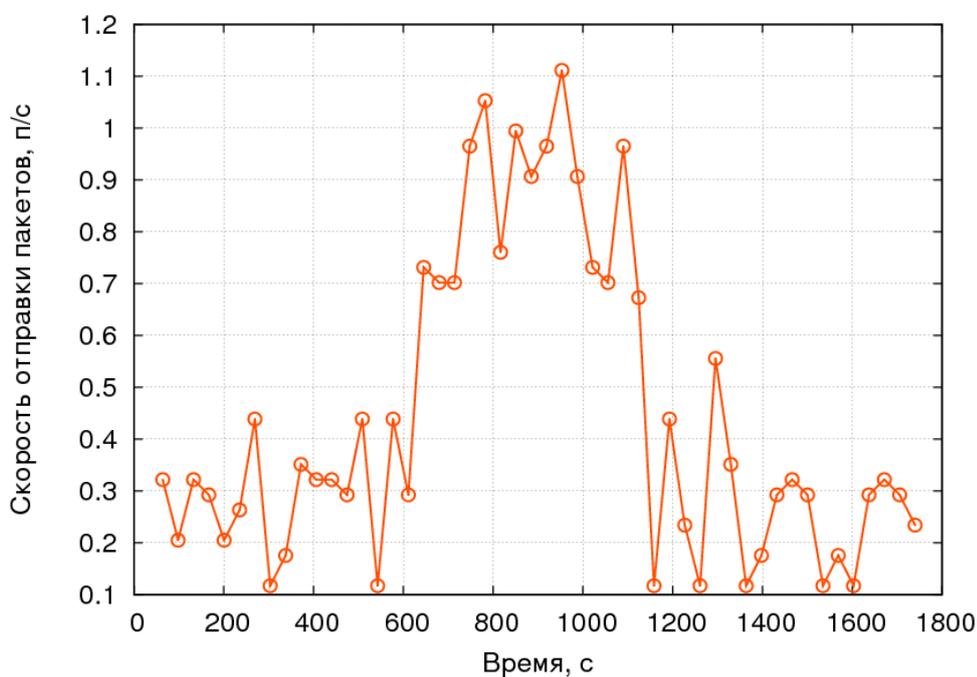


Рис. 25. Скорость отправки пакетов с узла 129

Во втором эксперименте задачей ставилось определить долю потерянных пакетов в общем количестве отправленных к центральному узлу пакетов. Для этого перед запуском эмуляции для каждого узла задавались случайные значения параметров, не меняющиеся в ходе эксперимента. Тем самым получались статичные значения приоритетов узлов, позволяющие сравнивать между собой потери пакетов с каждого узла.

Для получения статистики с каждого узла на центральный узел отправлялось 140 пакетов данных. По каждому узлу считалось количество отправленных пакетов и количество пакетов, полученных центральным узлом, по которым судили о доле потерь пакетов при передаче.

Результаты исследований показали, что зависимость доли потерянных пакетов и числа пакетов, полученных центральным узлом, от приоритета узла-источника данных имеет характер, предсказанный выражением (14), см. рисунок 26 и рисунок. 23. Для узлов с приоритетами от 1 до 7 потери

составили около 10% всех пакетов, а для узлов с приоритетами от 8 до 16 потери составили около 90% отправленных узлами пакетов.

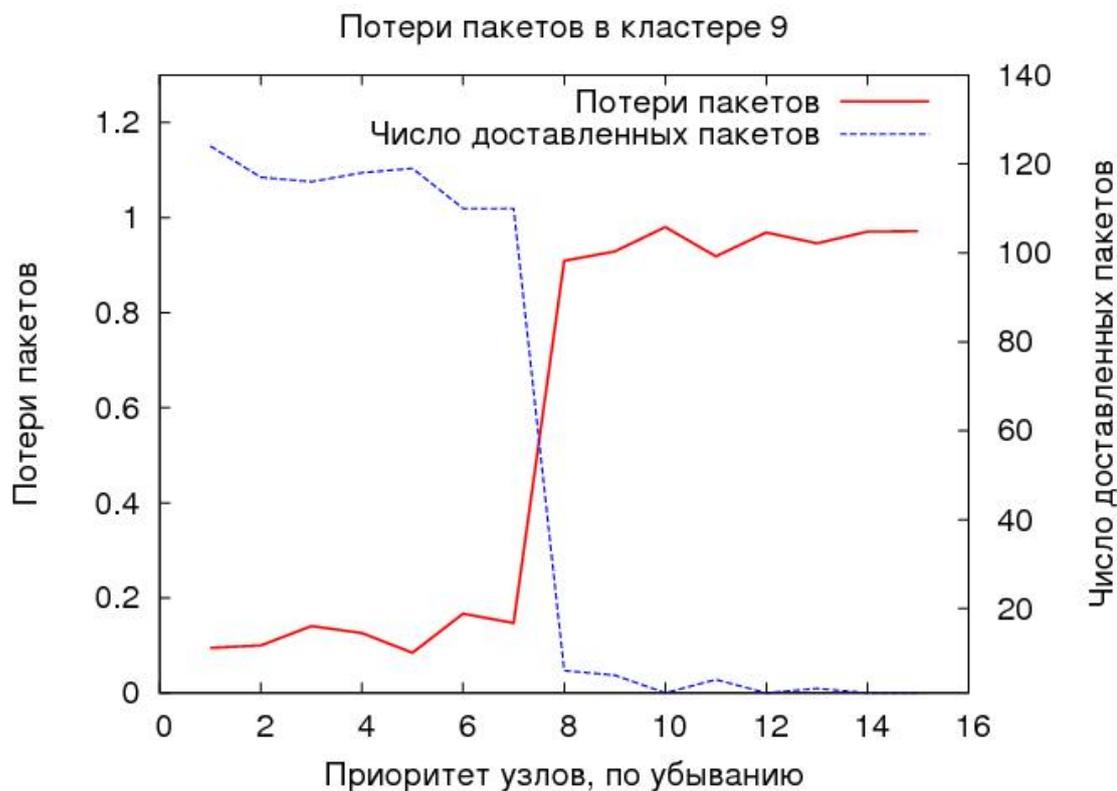


Рис. 26 Доля потерь пакетов в зависимости от приоритета узла сети

#### 4.5 Выводы к главе 4

1. Показано, что для моделирования беспроводных сенсорных сетей на платформе MICAz наилучшей средой моделирования является TOSSIM.
2. Экспериментально подтверждено, что разработанный программный комплекс передачи пакетов данных в беспроводной сенсорной сети, управляющий интервалами передачи пакетов данных и очередью передачи пакетов данных на основании приоритетов узлов БСС позволяет сократить задержку доставки приоритетных пакетов от узлов сенсорной сети к центральному узлу и повысить частоту передачи пакетов данных с приоритетных узлов сети.
3. Показано, что вычисленная вероятность потери пакета данных в зависимости от приоритета узла сенсорной сети хорошо совпадает с

полученной в результате эксперимента. Вероятность потери пакета и число полученных центральным узлом пакетов резко дифференцируются в зависимости от приоритета узла-источника данных.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработан метод назначения приоритетов узлам беспроводной сенсорной сети с использованием агрегирования разнородных данных на основе вычисления отношения консенсуса по правилу Борда.
2. Разработан способ организации передачи пакетов данных в беспроводных сенсорных сетях на основе назначения приоритетов узлам беспроводной сенсорной сети, формирования очереди передачи и назначения интервала передачи пакетов данных с учетом приоритетов узлов.
3. Разработан и экспериментально апробирован программный комплекс, обеспечивающий реализацию предложенного способа организации передачи пакетов данных в беспроводных сенсорных сетях, повышение надежности и снижение задержки доставки пакетов данных с более приоритетных узлов.
4. Результаты работы применены в построении программно-аппаратного измерительного комплекса для экологического мониторинга окружающей среды на территории ТЭЦ-9 и при выполнении проекта "In-network importance ranking in wireless sensor network data collection (Внутрисетевое ранжирование при организации сбора данных в сенсорной сети)", грант Национального университета Сингапура по программе EERSS, 2007-2009 гг.)

## ЛИТЕРАТУРА

1. Crowley J., Demazeau Y. Principles and Techniques for Sensor Data Fusion / J. Crowley, Y. Demazeau // *Livie*. – 2000. – № 54. – P. 10–64.
2. Herman M., Kanade T. Incremental reconstruction of 3D scenes from multiple complex images / M. Herman, T. Kanade // *Artificial Intelligence*. – 1986. – №30. – P. 289–301.
3. Crowley J. Navigation for an Intelligent Mobile Robot / J. Crowley // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. – 1985. – №1. – P. 153–168.
4. Brooks R. Visual Map Making for a Mobile Robot / R. Brooks // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. – 1985. – №1. – P. 95–117.
5. Chatila R., Laumond J. P. Position Referencing and Consistent World Modeling for Mobile Robots / R. Chatila, J. Laumond // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. – 1985. – №3. – P. 102–164.
6. Durrant-Whyte H. Consistent Integration and Propagation of Disparate Sensor Observations / H. Durrant-Whyte // *International Journal of Robotics Research*. – 1987. – №10. – P. 31–64.
7. Faugeras O., Ayache N. Building Visual Maps by Combining Noisy Stereo Measurements / O. Faugeras, N. Ayache // *IEEE Journal on Robotics and Automation*. – 1986. – №2. – P. 50–73.
8. Kolmogorov A. Interpolation and Extrapolation of Stationary Random Sequences / A. Kolmogorov // *Bulletin of the Academy of Sciences of the USSR Math*. – 1941. – №5. – P. 25–34.
9. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. / N. Wiener – New York: John Wiley and Sons, 1949.
10. Kalman R. A new approach to Linear Filtering and Prediction Problems / R. Kalman // *Transactions of the ASME*. – 1960. – №82. – P. 120–155.
11. Bucy R., Joseph P. Filtering for Stochastic Processes, with applications to Guidance / R. Bucy, P. Joseph // *Interscience New York*. – 1968. – №20. – P. 81–103.

12. Jazwinski J. Stochastic Processes and Filtering Theory. / J. Jazwinski – New York: Academic Press, 1970. – 324 p.
13. Melsa A., Sage J. Estimation theory, with applications to communications and control. / A. Melsa, J. Sage – New York: McGraw-Hill, 1971. – 457 p.
14. Brown C., Durrant Whyte H., Leonard J., Rao Y. S. Centralized and decentralized Kalman filter techniques for tracking, navigation and control / C. Brown, H. Durrant Whyte, J. Leonard, Y.S. Rao // DARPA. – 1989. – №4. – P. 78–89.
15. Brammer K., Siffling G. Kalman Bucy Filters. / K. Brammer, G. Siffling – Norwood MA: Artech House Inc., 1989. – 280 p.
16. Hopfield J. Neural Networks and physical systems with emergent collective computational abilities / J. Hopfield // Proc. Natl. Acad. Sci. – 1982. – №79. – P. 254–258.
17. Terzopoulos D. Regularization of inverse problems involving discontinuities / D. Terzopoulos // IEEE Trans PAMI. – 1986. – №8. – P. 129–139.
18. Koch C., Marroquin J., Yuille A. Analog neural networks in early vision / C. Koch, J. Marroquin, A. Yuille // AI Lab. Memo. – 1985. – №751. – P. 58–77.
19. Poggio T., Koch C. Ill-posed problems in early vision: from computational theory to analog networks / T. Poggio, C. Koch // Proc. R. Soc. London. – 1985. – №B-226. – P. 303–323.
20. Blake A., Zisserman A. Visual reconstruction. / A. Blake, A. Zisserman – Cambridge MA : MIT Press, 1987. – 380 p.
21. Crowley J. Towards continuously operating integrated vision systems for robotics applications / J. Crowley // Image Analysis. – 1991. – №7. – P. 123–128.
22. Crowley J. Coordination of action and perception in a surveillance robot / J. Crowley // IEEE Expert. – 1987. – №11. – P. 91–120.
23. Buchanan B., Shortliffe E. Rule based expert systems. / B. Buchanan, E.

- Shortliffe. – Addison Wesley: Reading Mass, 1984. – 376 p.
24. Pearl J. Causality: Models, Reasoning, and Inference. / J. Pearl. – Cambridge University Press, 2009. – 464 p.
  25. Darwiche A. Modeling and Reasoning with Bayesian Networks. / A. Darwiche. – Cambridge University Press, 2009. – 526 p.
  26. Castillo E., Gutiérrez J.M., Hadi A.S. Expert Systems and Probabilistic Network Models. / E. Castillo, J.M. Gutiérrez, A.S. Hadi. – New York: Springer-Verlag, 1997. – 348 p.
  27. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. / G. Shafer. – Princeton University Press, 1976. – 185 p.
  28. Dempster, A.P. A generalization of Bayesian inference / A.P. Dempster. // Journal of the Royal Statistical Society – 1968 – Series B, Vol. 30. – P. 205–247.
  29. Новак В., Перфильева И., Мочкрож И. Математические принципы нечёткой логики / В. Новак, И. Перфильева, И. Мочкрож. – Физматлит, 2006. – 352 с.
  30. Еремин Д.М., Гарцеев И.Б. Искусственные нейронные сети в интеллектуальных системах управления. / Д.М. Еремин, И.Б. Гарцеев. – М.: МИРЭА, 2004. – 75 с.
  31. Crowley J. Navigation for an Intelligent Mobile Robot / J. Crowley // IEEE Journal on Robotics and Automation. – 1985. – №16. – P. 121–128.
  32. Миркин Б.Г. Проблема группового выбора / Б.Г. Миркин. – М.: Наука, 1974. – 257 с.
  33. Дайер Дж. Многоцелевое программирование с использованием человеко-машинных процедур / Дж. Дайер // Вопросы анализа и процедуры принятия решений – М.: Мир – 1976. – С. 108–125
  34. Гюйбо Д.Т. Теории общего интереса и логическая проблема агрегирования / Д.Т. Гюйбо // Математические методы в социальных науках – М.: Прогресс – 1973. – С. 196-250.

35. Sen A. The possibility of social choice / A. Sen // *American Economic Review*. – 1999. – vol. 89, no. 3. – P. 349–378.
36. Young H.P. Optimal voting rules / H.P. Young // *Journal of Economic Perspectives*. – 1995. – vol. 9, no. 1. – P. 51–64.
37. Mishra U.N., Umesh D.E., Stem Jr. Attribute importance weights in conjoint analysis: bias and precision / U.N. Mishra, D.E. Umesh, Jr. Stem // *Advances in Consumer Research*. – 1989. – vol. 16. – P. 605–611.
38. Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование / Дж. Кемени, Дж. Снелл. – М.: Сов. радио, 1972. – 192 с.
39. Kemeny J. Mathematics without numbers / J. Kemeny. // *Daedalus* – 1959. – vol. 88 – P. 571–591
40. Young H.P., Levenglick A.A. A consistent extension of Condorcet's election principle / H.P. Young, A.A. Levenglick. // *SIAM Journal of Applied Mathematics*. – 1978. – vol. 35. – P. 285-300/
41. Карп Р.М. Сводимость комбинаторных проблем / Р.М. Карп // *Кибернетический сборник* – 1975. – вып. 12. – С. 16–38.
42. Фридман А.А., Вотяков А.А. Дискретные задачи и метод ветвей и границ / А.А. Фридман, А.А. Вотяков. // *Экономика и математические методы* – 1974. – том 10, вып. 3. – С. 611–621
43. Land A.H., Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems / A.H. Land, A.G. Doig. // *Econometrica* – 1960. – vol. 28. – P. 497–520.
44. Barthelemy J.P., Guenoche A., Hudry O. Median linear orders: heuristics and a branch and bound algorithm / J.P. Barthelemy, A. Guenoche, O. Hudry // *European Journal of Operational Research*. – 1989. – №42. – P. 313–325.
45. Muravyov S., Chan Mun Choon, Khomyakova M. Prioritizing sensed data transmission by consensus relation in wireless sensor network / S. Muravyov, Chan Mun Choon, M. Khomyakova // *12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement*. – Annecy. –

- 2008.
46. Литвак Б.Г. Экспертная информация: Методы получения и анализа. / Б.Г. Литвак // М.: Радио и связь, 1982. – С. 184.
  47. Hart J., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? / J. Hart, K. Martinez. // Earth-Science Reviews – 2006. – № 78. – P. 177–191.
  48. Ададунов С.Е., Шабельников В.А. Интеллектуальная система мониторинга искусственных сооружений / С.Е. Ададунов, В.А. Шабельников. // Мир транспорта. – 2009 – № 3 – С. 32–37
  49. Szewczyk R., Mainwaring A., Polastre J., Anderson J., Culler D. An analysis of a large scale habitat monitoring application / R. Szewczyk, A. Mainwaring, J. Polastre, J. Anderson, D. Culler. // Proceedings of the 2nd International conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Baltimore, MD, USA, 2004. – P. 214–226.
  50. Parker J.R. Multiple sensors, voting methods and target value analysis / J.R. Parker. // Proceedings of VI SPIE Conference on Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition. – Orlando, Florida, USA, 1999. – P. 305–335.
  51. Cremer F., Schutte K., Schavemaker J.C.M., den Breejen E. A comparison of decision-level sensor-fusion methods for anti-personnel landmine detection / F. Cremer, K. Schutte, J.C.M. Schavemaker, E. den Breejen. // Information Fusion – 2001. – vol. 2. – P. 187-208
  52. Tian-lu Chen, Pei-wen Que. A new fusion strategy of defect level assessment system / Chen Tian-lu, Que Pei-wen. // Measurement – 2005. – vol 38, is. 3. – P. 188-193
  53. Hall D.L., Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion / D.L. Hall – Norwood: Artech House, Inc – 1992. – P. 320
  54. Klein L.A. Sensor and Data Fusion: A Tool for Information Assessment and Decision Making / L.A. Klein. – The International Society for Opti-

- cal Engineering. – 2004. – P.342
55. Cullen J.D., Athi N., Al-Jader M., Johnson P., Al-Shamma A.I., Shaw A., El-Rasheed A.M.A. Multisensor fusion for on line monitoring of the quality of spot welding in automotive industry / J.D. Cullen, N. Athi, M. Al-Jader, P. Johnson, A.I. Al-Shamma, A. Shaw, A.M.A. El-Rasheed // *Measurement*. – 2008. – vol. 41, Issue 4. – P.412-423
  56. Дядюнов А.Н., Кузнецов К.Н. Моделирование беспроводных сенсорных сетей / А.Н. Дядюнов, К.Н. Кузнецов // *Научный вестник МГТУ ГА* – 2009. – №139 – С. 63-69
  57. Akyldiz I.F., Su W., Sankarasubramaniam Y., Cayirci E. Wireless sensor network: a survey / I.F. Akyldiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci. // *Computer Networks* – 2002. – vol. 38. – P. 393-422.
  58. TinyOS [Электронный ресурс] // URL: <http://tinyos.net> (дата обращения 01.11.2012)
  59. Abed A., Alkhatib A., Singh Baicher G. Wireless Sensor Network Architecture / A. Abed, A. Alkhatib, G. Singh Baicher. // *Proceedings of 2012 International Conference on Computer Networks and Communication Systems*. – Singapore, 2012 – P. 11–15.
  60. Pereira P., Grielo A., Rocha F., Nunes M., Casaca C., Almsrtrom P., Johansson M. End-To-End Reliability in Wireless Sensor Networks: Survey and Research Challenges / P. Pereira, , A. Grielo, , F. Rocha, M. Nunes, C. Casaca, P. Almsrtrom, M. Johansson // *Proceedings of EuroFGI Workshop on IP QoS and Traffic Control*. – Lisbon, Portugal, 2007. – P. 12–18.
  61. Koubaa A., Alves M., Tovar E. Lower Protocol Layers for Wireless Sensor Networks: A Survey / A. Koubaa, M. Alves, E. Tovar // *IPPHURRAY Technical Report*. – Porto, Portugal, 2005. – P. 14
  62. Hull B., Jamieson K., Balakrishnan H. Mitigating Congestions in Wireless Sensor Networks / B. Hull, K. Jamieson, H. Balakrishnan // *Proceedings of the 2nd International conference on Embedded Networked Sensor*

- Systems. – Baltimore, MD, USA, 2004. – P. 134–147
63. Halawani S., Khan A. Sensors lifetime enhancement techniques in Wireless Sensor Networks - A Survey / S. Halawani, A. Khan // Journal of Computing. – 2010. – vol. 2, Issue 5. – P. 34–47.
  64. Alkhatib A., Baicher G. MAC Layer Overview for Wireless Sensor Networks / A. Alkhatib, G. Baicher // Proceedings of 2012 International Conference on Computer Networks and Communication Systems. – Singapore, 2012. – P. 16–19.
  65. Tse D., Hanly S. Multi-Access Fading Channels: Part I: Polymatroid Structure, Optimal Resource Allocation and Throughput Capacities / D. Tse, S. Hanly // IEEE Transactions on Information Theory. – 1998. – vol. 44, No. 7. – P. 2796–2815.
  66. Hanly S., Tse D. Multi-Access Fading Channels: Part II: Delay-Limited Capacities / S. Hanly, D. Tse // IEEE Transactions on Information Theory. – 1998. – vol. 44, No. 7. – P. 2816–2831.
  67. Tse D. Optimal power allocation over parallel gaussian broadcast channels / D. Tse // Proceedings of IEEE International Symposium on Information Theory. – Ulm, Germany, 1997. – P. 51–71.
  68. Luo H., Lu S., Bharghavan V. A new model for packet scheduling in multi-hop wireless networks / H. Luo, S. Lu, V. Bharghavan // Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking. – Boston, Massachusetts, USA, 2000. – P.76–86.
  69. IEEE 802.15.4d-2009 Standard [Электронный ресурс] // URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf> (дата обращения 01.11.2012)
  70. ZigBee Alliance [Электронный ресурс] // URL: <http://www.zigbee.org> (дата обращения 01.11.2012)
  71. Legg G. ZigBee: Wireless Technology for Low-Power Sensor Networks / G. Legg. // EETimes – 2004. – URL: <http://eetimes.com/design/communications-design/4017853/ZigBee->

- Wireless-Technology-for-Low-Power-Sensor-Networks (дата обращения 01.11.2012)
72. Гаранин М.В. Системы и сети передачи информации./ М.В. Гаранин – М.: Радио и связь, 2001. – 336 с.
  73. MICAZ Datasheet [Электронный ресурс] // Crossbow Technology – 2012. – URL:  
[http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product\\_pdf\\_files/Wireless\\_pdf/MICAZ\\_Datasheet.pdf](http://bullseye.xbow.com:81/Products/Product_pdf_files/Wireless_pdf/MICAZ_Datasheet.pdf) (дата обращения 01.11.2012)
  74. ATMEL: ATMEL ATМega 128L datasheet [Электронный ресурс] // URL: [www.atmel.com/Images/doc2467.pdf](http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf) (дата обращения 01.11.2012)
  75. Callaway E.H. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols / E.H. Callaway.– CRC Press, 2004. – P. 350
  76. Hull B., Jamieson K., Balakrishnan H. Mitigating Congestions in Wireless Sensor Networks / B. Hull, K. Jamieson, H. Balakrishnan. // Proceedings of the 2nd International conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Baltimore, MD, USA, 2004. – P. 134–147
  77. Paek J., Govindan R. RCRT: Rate-controlled reliable transport for wireless sensor network / J. Paek, R. Govindan. // Proceedings of the ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Sydney, Australia, 2007. – P. 305–319.
  78. Chen D., Varshney P.K. QoS Support in Wireless Sensor Networks: A Survey / D. Chen, P.K. Varshney. // Proceedings of the International Conference on Wireless Sensor Networks. – Las Vegas, Nevada, USA, 2004 – P. 227–233.
  79. Кендэл М. Ранговые корреляции. / М. Кендэл. – М.: Статистика, 1975. – С. 216
  80. Кузьмин В.Б., Овчинников С.В. Об измерениях в порядковых шкалах / В.Б. Кузьмин, С.В. Овчинников // Автоматика и телемеханика. – 1974. – № 11. – С. 106–112.

81. Simon G. Probabilistic wireless network simulator [Электронный ресурс] // URL: <http://www.isis.vanderbilt.edu/projects/nest/prowler> (дата обращения 01.11.2012)
82. The network simulator. [Электронный ресурс] // URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/> (дата обращения 01.11.2012)
83. Levis P., Lee N. TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications / P. Levis, N. Lee. // Proceedings of the First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems . – Los Angeles, CA, USA, 2003. – P. 126–137.
84. Karl M. A Comparison of the architecture of network simulators NS-2 and TOSSIM / M. Karl. // Proceedings of Performance Simulation of Algorithms and Protocols Seminar. – 2005. – P. 26-41.
85. Orfanus D., Lessmann J., Janacik P., Lachev L. Performance of wireless network simulators: a case study / D. Orfanus, J. Lessmann, P. Janacik, L. Lachev. // Proceedings of the 3rd ACM workshop on Performance monitoring and measurement of heterogeneous wireless and wired networks – 2008. – P. 59–66.
86. Kramer M., Gerald A. Energy Measurements for MicaZ Node / M. Kramer, A. Gerald // Proceedings of the GI/ITG KuVS Dahtlose Sensornetze. – Stuttgart, Germany, 2006. – P. 61–68.
87. Power Modes and Energy Consumption for the iMote2 Sensor Node [Электронный ресурс] // URL: [http://enaweb.eng.yale.edu/drupal/system/files/imote2\\_power.pdf](http://enaweb.eng.yale.edu/drupal/system/files/imote2_power.pdf) (дата обращения 01.11.2012)
88. Landsiedel O., Wehrle K., Gotz S. Accurate Prediction of Power Consumption in Sensor Networks / O. Landsiedel, K. Wehrle, S. Gotz // Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors. – Sydney, Australia, 2005. – P. 37–44.
89. Hackmann G., Chipara O., Lu C. Robust topology control for indoor

- wireless sensor networks / G. Hackmann, O. Chipara, C. Lu // Proceedings of the 6th International conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Raleigh, NC, USA, 2008. – P. 57–70.
- 90.** Ye W., Heidemann J., Estrin D. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks / W. Ye, J. Heidemann, D. Estrin // Proceedings of the 21st Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. – NewYork, USA, 2002. – vol. 3 – P. 1567–1576.
- 91.** Akayya K., Younis M. An Energy-Aware QoS Routing Protocol for Wireless Sensor Networks / K. Akayya, M. Younis // Proceedings of IEEE Workshop on Mobile and Wireless Networks. – Providence, RI, USA, 2003. – P. 710–715.
- 92.** Caccamo M., Zhang L.Y., Sha L., Buttazzo G. An Implicit Prioritized Access Protocol for Wireless Sensor Network / M. Caccamo, L.Y. Zhang, L. Sha, G. Buttazzo // Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium. – Austin, Texas, USA, 2002. – P. 39–48.
- 93.** Lu C. RAP: A Real-Time Communication Architecture for Large-Scale Wireless Sensor Networks / C. Lu // Proceedings of the IEEE Real-Time and Embedded Technology and Application Symposium. – SanJose, CA, USA, 2002. – P. 55–66.
- 94.** Newsome J., Song D. GEM: Graph embedding for routing and data-centric storage in sensor networks without geographic information / J. Newsome, D. Song // Proceedings of the 1st International conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Los Angeles, CA, USA, 2003. – P. 76–88.
- 95.** Woo A., Culler D. A transmission control scheme for media access in sensor networks / A. Woo, D. Culler // Proceedings of the 7th annual international conference on Mobile computing and networking. – Rome, Italy, 2001. – P. 221–235.
- 96.** Paek J., Govindan R. RCRT: Rate-controlled reliable transport for wireless sensor networks / J. Paek, R. Govindan // Proceedings of the 5th In-

- ternational conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Sydney, Australia, 2007. – P. 305–319.
- 97.** Kim S., Fonseca R., Dutta P., Culler A.T.D., Levis P., Shenker S., Stoica I. Flush: A reliable bulk transport protocol for multihop wireless networks / S. Kim, R. Fonseca, P. Dutta, A.T.D. Culler, P. Levis, S. Shenker, I. Stoica // Proceedings of the 5th International conference on Embedded Networked Sensor Systems. – Sydney, Australia, 2007. – P. 351–365.
- 98.** Zhang H., Arora A., Choi Y., Gouda M. Reliable bursty converge cast in wireless sensor networks / H. Zhang, A. Arora, Y. Choi, M. Gouda // Proceedings of the 6th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing. – Urbana-Champaign, IL, USA, 2005. – P. 266–276.
- 99.** Weigle, M. Transport Protocol in WSN [Электронный ресурс] / M. Weigle // URL: <http://www.cs.odu.edu/~mweigle/talks/vtclems05.pdf> (дата обращения 01.11.2012)
- 100.** Wan C.Y., Campbell A.T., Krishnamurthy L. PSFQ: a reliable transport protocol for wireless sensor network / C.Y. Wan, A.T. Campbell, L. Krishnamurthy // Proceedings of the 1st ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. – Atlanta, Georgia, USA, 2002. – P. 1–11.
- 101.** Iyer Y. Gandham S., Venkatensan S. STCP: A Generic Transport Layer for Wireless Sensor Networks / Y. Iyer, S. Gandham, S. Venkatensan, // Proceeding of 14th International Conference on Computer Communications and Networks. – San Diego, CA, USA, 2005. – P. 449–454.
- 102.** Chipcon: Chipcon CC2420 datasheet [Электронный ресурс] // <http://inst.eecs.berkeley.edu/~cs150/Documents/CC2420.pdf> (дата обращения 01.11.2012)
- 103.** Levis P., Madden S., Gay D., Polastre J., Szewczyk R., Woo A., Brewer E., Culler D. The emergence of networking abstractions and techniques

in TinyOS / P. Levis, S. Madden, D. Gay, J. Polastre, R. Szewczyk, A. Woo, E. Brewer, D. Culler // Proceeding of 1st Symposium on Networked Systems Design and Implementation. – San Francisco, CA, USA, 2004. – P. 1–14.

- 104.** Bachir A., Dohler M., Watteyne T., Leung K. MAC Essentials for Wireless Sensor Networks / A. Bachir, M. Dohler, T. Watteyne, K. Leung // IEEE Communications Surveys and Tutorials. – 2010. – vol.12, issue 2. – P. 222–248.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

Акты внедрения результатов диссертационной работы



**ИРКУТСКЭНЕРГО**

ЭНЕРГОУГОЛЬНАЯ КОМПАНИЯ

ИРКУТСКОЕ ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ (ОАО "ИРКУТСКЭНЕРГО")

Ф И Л И А Л

**Ново-Иркутская ТЭЦ**

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор Н-И ТЭЦ  
ОАО «Иркутскэнерго»

А.Н.Похоруков

2012

**АКТ**

**о внедрении результатов**

**кандидатской диссертации Тараканова Е.В.**

**«Агрегирование данных мультисенсоров**

**в беспроводных сенсорных сетях»**

Комиссия в составе: заместителя начальника отдела АСУ Миллера В.Г., инженера по охране окружающей среды Мышляева В.Н. составила настоящий акт в том, что результат диссертационной работы Тараканова Е.В.:

- программный комплекс, обеспечивающий передачу данных в беспроводной сенсорной сети на основе приоритета передаваемых данных

используется в информационно-измерительной системе экологического мониторинга окружающей среды на территории Ново-Иркутской ТЭЦ.

Разработанный программный комплекс позволил снизить время обнаружения, повысить частоту получения информации с датчиков оксидов серы, углерода и азота в зоне выброса вредных веществ, обеспечил возможность реализации автоматизированного управления технологическими процессами ТЭЦ в зависимости от измеренных параметров экологического мониторинга.

Зам. начальника отдела АСУ

В.Г. Миллер

Инженер по охране окружающей среды

В.Н. Мышляев