

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Кафедра «Телекоммуникационные системы»

Специальность 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

к.т.н., Шагиахметов Д.Р.

(ученая степень, звание, ФИО) (подпись)

«_____» _____ 2014 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ
пояснительная записка**

на тему: «Позиционирование мобильных объектов в беспроводных
сенсорных сетях»

Магистрант Дарибаева Ж.М. _____ группа МТСП-12-1
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель PhD, профессор _____ Чайко Е.В.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент к.т.н. _____ Дараев А.М.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ к.х.н., ст. преп. _____ Данько Е.Т.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтроль к.х.н., ст. преп. _____ Кудинова В.С.
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы, 2014

**Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»**

Факультет «Радиотехники, электроники и связи»
Специальность 6М071900 «Радиотехники, электроники и телекоммуникации»
Кафедра «Телекоммуникационных систем»

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Дарибаевой Жанне Маратовне.
(фамилия, имя, отчество)

Тема диссертации «Позиционирование мобильных объектов в беспроводных сенсорных сетях»

утверждена Ученым советом университета №142 от «31» октября 2013 г.

Срок сдачи законченной диссертации «25» декабря 2013 г.

Цель исследования состоит в исследовании точности позиционирования в беспроводных сенсорных сетях.

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов или краткое содержание магистерской диссертации:

1. Обзор существующих методов позиционирования в беспроводных сенсорных сетях;
2. Исследование точности определения координат в сетях с разной конфигурацией;
3. Определение затухания сигнала при распространении между передатчиком и приемником.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. График значений ошибок измерений в системе позиционирования по 8 и 14 опорным точкам;
2. График зависимости затухания сигнала от расстояния между приемником и передатчиком;
3. График мощности сигнала в приемнике;
4. График числа битовых ошибок при позиционировании внутри помещения и за пределами помещения.

Рекомендуемая основная литература

1. Л.С. Восков, Р.О. Курпатов. Энергоэффективный комбинированный метод локализации в беспроводных сенсорных сетях // Журнал «Датчики и системы», №4, 2011. – М. : ООО «СенСиДат-Контрол», 2011, 133 с.
2. Иванов Е.В., Козлов В.Н., Курикша В.А. "Экспериментальное определение координат в сетях стандарта IEEE 802.15.4" // Труды 63-й научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, 2008, 256 с.
3. Кривченко Т., Кривченко И., Долгушин С., Артеев В., Федоров В., Ламберт Е., Курилин А. Беспроводная связь в системах мониторинга и управления // Электронные компоненты. 2005, 461 с.

ГРАФИК

подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки предоставления научному руководителю	Примечание
1. Обзор исследований по теме позиционирования объектов	04.10.2012	
2. Исследование методов позиционирования мобильных объектов	09.03.2013	
3. Экспериментальное исследование точности локализации	04.09.2013	
4. Исследование затухания сигнала в системе позиционирования внутри помещения и вне помещения	17.10.2013	
5. Определение точности позиционирования в зависимости от частоты выборки	09.12.2013	

Дата выдачи задания сентябрь 2012 г.

Заведующий кафедрой _____ (Коньшин С.В.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Руководитель диссертации _____ (Чайко Е.В.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению магистрант _____ (Дарибаева Ж.М.)
(подпись) (Ф.И.О.)

Содержание

Введение	7
1 Обзор современных беспроводных технологий	9
1.1 Особенности беспроводных сенсорных сетей	10
1.2 Архитектура сенсора	12
1.3 Сенсорные сети и общество	14
2 Определение координат в беспроводных сенсорных сетях	15
2.1 Современные исследования в сфере позиционирования внутри помещения	15
2.2 Существующие методы и алгоритмы позиционирования	17
2.2.1 Триангуляция	18
2.2.2 Метод RSSI (Received Strength Signal Indication)	20
2.2.3 TOA (Time of Arrival)	21
2.2.4 RTT (Round Trip Time или Return Time of Arrival)	22
2.2.5 TDOA (Time Difference of Arrival)	22
2.2.6 AOA (Angle of Arrival)	23
2.2.7 SDSTWR (Symmetric Double Sided Two Way Ranging)	23
2.3 Программно-аппаратный комплекс для стандарта Zigbee	24
3 Экспериментальная часть	34
3.1 Исследование точности позиционирования при разном количестве опорных узлов	34
3.2 Исследование затухания сигнала при распространении между передатчиком и приемником	39
3.3 Исследование точности позиционирования в зависимости от частоты выборки	43
Заключение	45
Перечень сокращений	46
Список литературы	47
Приложение А Моделирование триангуляции для системы позиционирования	48
Приложение Б Исследование точности позиционирования в зависимости от частоты выборки	49

Аңдатпа

Осы диссертациялық жұмыста қазіргі заманға сәйкес мобильді объектілерді позициялау әдістері қарастырылады. Олар жайылтпаушылықтың нақтылығын әр түрлі тіреу түйіндер саны және әр түрлі сұрыптау жиілігінде зерттеледі. Сонымен қатар, жайылтпаушылық жүйесінде сигнал күшінің әлсіреуі анықталады.

Аннотация

В работе рассматриваются современные методы позиционирования мобильных объектов, исследуется точность локализации при разном количестве опорных узлов, различной частоте выборки, а также определяется ослабление сигнала в системе позиционирования.

Abstract

In this dissertation we are considering methods of up-to-date mobile objects positioning, using localization accuracy with different quantity of basic nodes and different selection frequency analysis, and also identifying weakening of signal in the positioning system.

Введение

На протяжении истории развития науки и техники задачи связанные с определением месторасположения встречались и встречаются в самых различных областях: морской навигации, радиолокации, робототехнике и др. При этом та последовательность действий, из которых состоит сам процесс определения координат объекта обычно заключается в измерении каким-либо образом взаимного месторасположения относительно ориентиров, координаты которых априори известны и последующего расчета координат на основе полученной информации. В качестве примера можно привести практиковавшуюся довольно продолжительное время процедуру определения месторасположения вручную с помощью компаса, сектанта и звезд. Сейчас определение координат объектов в пространстве уже обычно определяется автоматически с помощью специальной аппаратуры на основе использования радиоволн; при этом в качестве ориентиров используются искусственно созданные буи, маяки, спутники и т.п. Тем не менее сама последовательность действий, результатом которой является определение координат объекта осталась той же.

Термин "сенсорная сеть", появившись сравнительно недавно, на нынешний день является уже достаточно устоявшимся понятием (Sensor Network), получившим широкое распространение, и обозначающим самофункционирующуюся, устойчивую к отказу отдельных элементов сеть, которая состоит из большого числа небольших, компактных и дешевых полупроводниковых устройств, связанные друг с другом беспроводной связью, элементы сети не обслуживаются и не требуют специальной установки. Каждый узел сети может содержать встроенные датчики физических параметров окружающей среды, например, движение, уровень влажности воздуха, свет, температура, давление и тому подобное, а также микросхемы для первичной обработки информации и хранения полученных данных. Количество узлов в беспроводной сети на самом деле определяется лишь областью применения и финансовым ограничением, и благодаря невысокой цене отдельных устройств (от нескольких долларов и выше) может быть весьма велико (несколько тысяч и выше).

Беспроводные сенсорные сети сбора и передачи данных могут быть легко адаптированы к решению многих задач практически в любых сферах деятельности. Самая очевидная область применения подобных сетей - это организация различных систем контроля и мониторинга, создание систем быстрого реагирования в чрезвычайных ситуациях. В качестве наиболее очевидных можно отметить следующие задачи: противопожарные системы; организация систем безопасности - контроль периметров, определение вторжения, удаленное наблюдение; контроль окружающей среды вблизи мест хранения радиоактивных материалов, химических или биологических веществ.

Возможность адаптации сетей подобного рода к решению широкого спектра задач, а также использование последних научных и технологических достижений делает сенсорные сети актуальной и передовой сетевой технологией, которая может привести к формированию весьма обширного рынка беспроводных сенсорных сетей. Однако на пути к этому существует ряд проблем технологического и эксплуатационного характера, которые требуют пристального рассмотрения; одной из этих проблем является определение месторасположения отдельных объектов сенсорной сети.

Данная работа посвящена исследованию беспроводных сенсорных сетей, методам позиционирования мобильных объектов, а также исследованиям повышения точности позиционирования в различных условиях. Основываясь на довольно богатом библиографическом материале данная работа имеет главную задачу рассмотреть, проанализировать и систематизировать уже известные подходы к позиционированию объектов в беспроводных сенсорных сетях.

1 Обзор современных беспроводных технологий

На сегодняшний день беспроводные сети являются неотъемлемой частью современных телекоммуникаций. Беспроводная связь обладает большим количеством преимуществ: мобильность, легкость создания и реструктуризации, высокая скорость доступа в интернет, возможность подключения к сети другого типа и другое, - благодаря этим преимуществам ряды пользователей беспроводных технологий пополняются день ото дня. Рынок телекоммуникаций предлагает широкий ассортимент беспроводных технологий, сотни компаний предлагают свои решения. Примерами беспроводной передачи данных могут служить такие технологии как Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, EDGE, ZigBee. Выбор той или иной технологии зависит прежде всего от требований, которые предъявляются к конкретной сети. Критериями могут служить пропускная способность, частотный диапазон, максимальное количество узлов в сети и т.д. Сравнительные характеристики некоторых беспроводных технологий приведены в таблице 1.

Таблица 1 - Сравнительные характеристики технологий BlueTooth, Wi-Fi и ZigBee

Технология беспроводной связи (стандарт)	ZigBee (IEEE 802.15.4)	Wi-Fi (IEEE 802.11b)	Bluetooth (IEEE 802.15.1)
Частотный диапазон	2,4-2,483 ГГц	2,4-2,483 ГГц	2,4-2,483 ГГц
Пропускная способность, кбит/с	250	11000	723,1
Размер стека протокола, кбайт	32-64	Более 1000	Более 250
Время непрерывной автономной работы от батареи, дни	100-1000	0,5-5	1-10
Максимальное количество узлов в сети	65536	10	7
Диапазон действия, м	10-100	20-300	10-100
Области применения	Удаленный мониторинг и управление	Передача мультимедийной информации	Замещение проводного соединения

Из таблицы 1 видно, что максимальное количество узлов, а также самую длительную автономную работу от батареи в сети дает технология ZigBee, основанная на стандарте IEEE 802.15.4. Данная технология известна также как «Сенсорные сети» (англ. WSN — Wireless Sensor Network)

1.1 Особенности беспроводных сенсорных сетей

Термин «сенсорная сеть» обозначает распределенную, самоорганизующуюся, устойчивую к отказу отдельных элементов сеть, состоящую из большого числа малогабаритных и дешевых полупроводниковых устройств, обменивающихся информацией по беспроводной связи, не обслуживаемых и не требующих специальной установки. Одним из первых прототипов сенсорной сети можно считать систему СОСУС (Sound Surveillance System, Звуковая Система Наблюдения), предназначенную для обнаружения и идентификации подводных лодок. Позже эта система была перекалибрована под гражданский сектор и до сих пор применяется океанографической и атмосферной администрацией для мониторинга, к примеру, сейсмоактивности. Во время холодной войны в оборонном комплексе был разработан противовоздушный комплекс защиты континентальной части США и Канады. Особенностью этого комплекса, как сенсорной сети, являлось использование аэростатов в качестве точек осуществления контроля и сбора информации. Позднее эта система была дополнена самолетами воздушного предупреждения и управления AWACS (Airborne Warning and Control System). Эти две военные системы являются хорошим примером построения сенсорных сетей на очень ранней стадии их развития, когда речь идет о повышении эффективности, оптимизации, автономности и снижении стоимости еще не шла, а человек непосредственно участвовал в функционировании этих систем – именно на человека возлагалась ответственность за функционирование, надежность, анализ данных и тому подобное.

Технологии беспроводных сенсорных сетей стали активно развиваться в середине 1990-х годов, в начале 2000-х годов развитие микроэлектроники позволило производить для таких устройств достаточно дешёвую элементную базу. Сегодня технология беспроводных сенсорных сетей, является единственной беспроводной технологией, с помощью которой можно решить задачи мониторинга и контроля, которые критичны к времени работы датчиков. Объединенные в беспроводную сенсорную сеть датчики (сенсоры) образуют территориально-распределенную самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации. Сенсорная сеть обладает способностью к ретрансляции сообщений по цепочке от одного к другому, что позволяет в случае выхода из строя одного из узлов организовать передачу информации через соседние узлы без потери качества. Сама сеть определяет оптимальный маршрут движения информационных потоков.

Главным отличием беспроводных сенсорных сетей от традиционных компьютерных и телефонных сетей является отсутствие постоянной инфраструктуры, которая принадлежит определенному оператору или провайдеру. Каждый пользовательский терминал в сенсорной сети имеет возможность функционировать не только как оконечное устройство, но, так же как и транзитный узел, как показано на рисунке 1.1.

Передача данных осуществляется путем перенаправления информации ближайшему узлу, а не на базовую станцию или точку доступа как в традиционных сетях с фиксированной инфраструктурой. Такие сети называются многошаговыми (multihop).

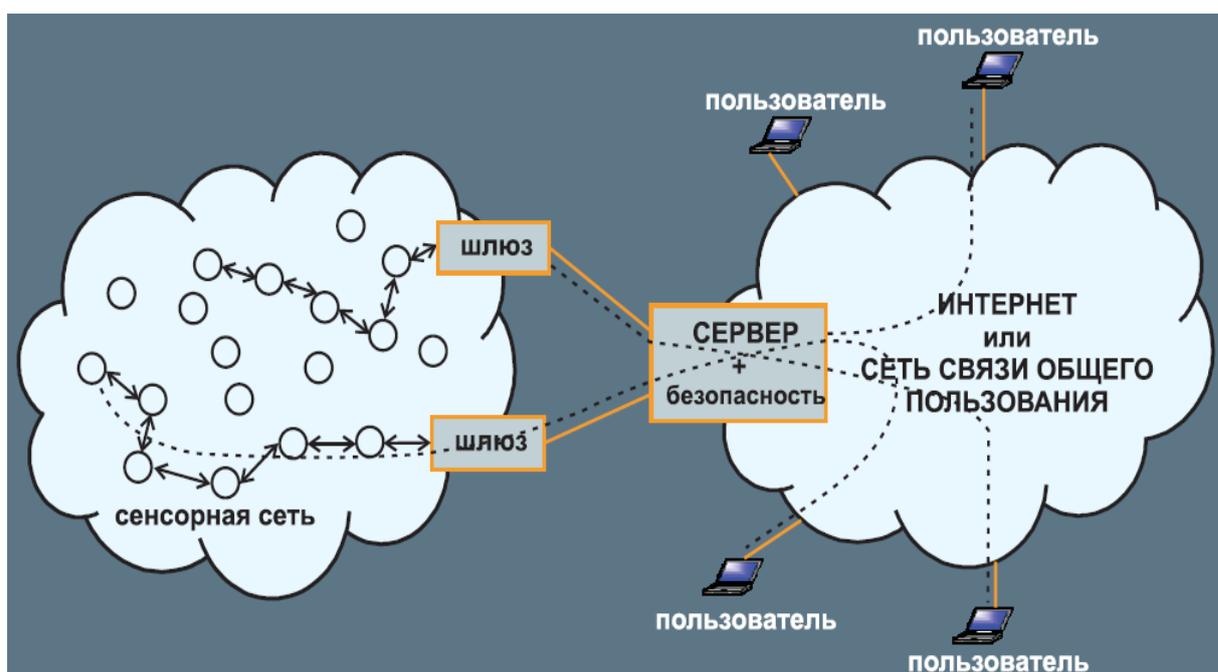


Рисунок 1.1 – Пример подсоединения сенсоров сети

Построение эффективных и надежных сенсорных является нелегкой задачей, которая должна учитывать определенные аспекты.

Во-первых, устойчивость при неисправности. Сенсорная сеть должна продолжать полноценно функционировать и предоставлять необходимые данные даже если сенсор или группа сенсоров, принадлежащих сети выйдет из строя. Протоколы маршрутизации и алгоритмы управления сетью должны обеспечивать быструю адаптацию сети к новой физической топологии.

Во-вторых, масштабируемость. Количество узлов в сети может меняться в зависимости от развития самой сети, на сегодняшний день размер сенсорных сетей может ограничиваться как несколькими сотнями, так и несколькими тысячами. Существенное увеличение количества сенсоров может привести к перегрузке маршрутных таблиц, блокировке сенсоров, и, как следствие, к выходу сенсорной сети из строя.

В-третьих, топология. Изменение топологии беспроводной сенсорной сети может быть вызвано введением новых сенсоров в действующую сеть,

выход из строя сенсоров, принадлежащих сенсорной сети, а также в случае, если сенсоры являются мобильными.

Также следует отметить ограничения аппаратного обеспечения и беспроводной интерфейс. Компактный размер сенсоров является одним из главных требований для широкого коммерческого пользования, снижение размера и веса аппаратной части сенсора поможет увеличить количество потенциальных приложений сенсорных сетей. Сенсоры для передачи информации в сети могут использовать различные беспроводные технологии со специфическими характеристиками.

И, наконец, потребление энергии. Сенсор из-за своего размера может быть оборудован только сравнительно ограниченным источником питания, и увеличение срока действия источника питания является одной из приоритетных задач, которая решается не только путем увеличения времени жизни источника питания, но и путем его эффективного использования [1].

1.2 Архитектура сенсора

Сенсорный датчик состоит из аппаратной и программной части, как и любой другой телекоммуникационный узел. В общем случае сенсор состоит из следующих подсистем: восприятия, обработки данных, мониторинга, коммуникационной и источника питания (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Общая архитектура сенсора

Подсистема восприятия состоит, как правило, из аналогового устройства, снимающего определенную статистику и аналого-цифрового преобразователя. Подсистема обработки данных содержит в себе центральный процессор и память, позволяющие хранить не только генерируемые сенсором данные, но и служебную информацию, которая необходима для корректного и полноценного функционирования коммуникационной подсистемы. Подсистема мониторинга позволяет сенсору собирать данные об окружающей среде, такие как влажность, температура, давление, магнитное поле, химический анализ воздуха и т.д. Также сенсор может быть дополнен гироскопом, акселерометром, что даёт возможность для построения системы позиционирования.

Прогресс в области беспроводной связи и миниатюризация микросхем открывают новые горизонты в информационно-компьютерных технологиях. Помимо многошаговых сетей существуют более сложные протоколы маршрутизации, когда следующий узел выбирается на основе анализа его характеристик, например, уровень энергии, надежность и тому подобное. Ситуация усложняется в случае, когда узлы беспроводной сенсорной сети передвигаются – топология сети становится динамичной.

Для реализации сенсора как телекоммуникационного устройства малого размера (не более одного кубического сантиметра) необходимо учитывать многие технические аспекты. Частота центрального процессора должна быть не менее 20 МГц, объем оперативной памяти не менее 4 КБ, скорость передачи не менее 20 Кбит/с. Оптимизация аппаратной части позволит снизить размеры сенсора, но повлечет за собой увеличение его цены. Операционную систему (ОС) необходимо оптимизировать с учетом архитектуры применяемого центрального процессора. Ограниченные ресурсы и малый размер памяти стимулируют размещение ОС в ПЗУ. В настоящее время широко распространена ОС с открытым кодом Tiny OS, позволяющая достаточно гибко управлять сенсорами разных производителей [2]. В области сетевого взаимодействия, ограниченный источник питания в сенсорах накладывает существенные ограничения на использование радиотехнологий, которые могут быть применены в сенсорных сетях. Также следует отметить, что ограниченная производительность центрального процессора не позволяет применение стандартных протоколов маршрутизации IP-сетей – высокая сложность расчета алгоритма оптимального пути перегрузит центральный процессор. На сегодняшний день разработано большое количество специальных протоколов маршрутизации для сенсорных сетей.

Разработка технологии передачи данных в сенсорных сетях является одной из самых важных задач при построении сенсорной сети, так как её специфические архитектурные и системные характеристики накладывают целое множество жестких ограничений, среди которых следует подчеркнуть следующие:

- ограниченные запасы энергии, из-за чего радиус действия ограничен;
- ограниченная производительность процессора;

- одновременное функционирование большого количества узлов на ограниченном пространстве;
- равнозначность узлов, архитектура «клиент-сервер» не применима в связи с характерной для неё задержками;
- функционирование в нелицензируемом спектре частот;
- низкая стоимость.

В настоящее время разработка сенсорных сетей строится на стандарте IEEE 802.15.4 Zigbee, о котором я упоминала выше. Дополнительно отмечу, что альянсом Zigbee предполагается, что радиодоступ стандарта ZigBee будет применяться в таких приложениях, как мониторинг, автоматизация производства, сенсоры, безопасность, контроль, бытовая техника и многое другое. Таким образом, приложения сенсорных сетей можно разделить на несколько основных категорий:

- безопасность, чрезвычайные ситуации и военные операции;
- медицина и здоровье;
- погода, окружающая среда и сельское хозяйство;
- фабрики, заводы, дома, здания;
- транспортные системы и автомобили.

Рассмотрю случаи конкретного применения сенсорных сетей в вышеперечисленных категориях. Сенсорные сети могут, как минимум, использоваться в следующих сценариях.

Удаленный мониторинг состояния больного, например, пульс, давление, ЭКГ, уровень сахара в крови и так далее. При этом необходимая статистика снимается при помощи специализированного нательного или имплантированного сенсора и передается в централизованную базу данных, к которой имеет доступ больничная персонал. Следует отметить, что для полноценного функционирования такой системы, необходимо чтобы вся территория больницы была покрыта беспроводной сенсорной сетью. Подобные сценарии очень важны с социальной точки зрения, так как предполагается, что клиентами в основном будут являться пожилые люди и люди с ограниченными возможностями.

Следует также отметить разделение сенсорных сетей на коммерческие и некоммерческие. Такая классификация важна, так как при построении сенсорной сети необходимо изначально определить, будет ли статистика, собранная сетью, доступна рядовым пользователям бесплатно, на коммерческой основе или она носит корпоративный характер.

Возможность адаптации беспроводных сенсорных сетей к решению чрезвычайно широкого спектра задач, а также использование последних научных и технологических достижений делает сенсорные сети актуальной и передовой сетевой технологией, которая может привести к формированию весьма обширного рынка беспроводных сенсорных сетей.

Достоинства систем на основе сенсорных сетей:

- возможность расположения в труднодоступных местах, куда сложно и дорого тянуть обыкновенные проводные решения;
- оперативность и удобство развертывания и обслуживания системы;
- надежность сети в целом — в случае выхода из строя одного из них, информация передается через соседние элементы;
- возможность добавления или исключения любого количества устройств из сети;
- высокий уровень проникновения сквозь препятствия (стены, потолки) и стойкость к электромагнитным помехам (благодаря высокой частоте работы системы - 2,4 ГГц);
- длительное время работы без замены элементов питания.

Таким образом, беспроводные сенсорные сети, обладая массой преимуществ нашли свое применение в современном мире телекоммуникаций, а именно: системы автоматизации зданий, системы управления в промышленности, системы позиционирования.

1.3 Сенсорные сети и общество

На сегодняшний день можно оценить влияние сенсорных сетей в жизни человека, в различных отраслях производства, областях природы.

Большое количество приложений, построенных на беспроводных сенсорных сетях, приведут к улучшениям качества жизни и комфорта. Мониторинг окружающей среды позволит человеку обладать достаточно полной информацией о ней, это позволит повысить надежность прогнозов, оптимизировать взаимодействие человека с природой, что не только повысит безопасность и комфорт жизни человека, но и уменьшит отрицательное влияние жизнедеятельности человека на природу.

Важно отметить, что реализация эффективного мониторинга процессов производства позволит снизить расходы и оптимизировать процесс управления.

В области национальной безопасности сенсорные сети являются источником качественно новой информации, которая может являться стратегической, тогда её получение противником может привести к снижению общего уровня безопасности государства.

В сфере экономики широкое внедрение сенсорных сетей приведет к достаточно высокой капитализации сектора сенсорных сетей, на сегодняшний день количество проданных сенсоров уже достигло нескольких десятков миллионов.

2 Определение координат в беспроводных сенсорных сетях

Одной из насущных проблем является определение месторасположения отдельных объектов сети. Непременным условием при эксплуатации любых систем мониторинга и контроля является привязка данных, собранных всей системой к географическим координатам для отображения собранной информации на карте и последующего анализа. Кроме того, такая сеть, в отличие от традиционных радиосетей, при наличии встроенной подсистемы позиционирования отдельных объектов может быть развернута практически где угодно с минимальными затратами.

Помимо привязки полученных сетью в процессе работы данных к карте местности, информация о координатах объектов будет востребована в процессе функционирования самой сети: построение эффективных с точки зрения энергопотребления алгоритмов маршрутизации, сбор собранных данных.

В связи с этим разработка алгоритмов определения координат объектов в сенсорной сети становится весьма актуальной задачей. Основываясь на весьма богатом библиографическом материале, представляемая работа имеет цель проанализировать и систематизировать уже известные подходы к определению координат в сенсорных сетях, а также рассмотреть точность позиционирования мобильных объектов в разных условиях, при разной частоте выборки.

Таким образом, сенсорная сеть представляет собой сравнительно большое количество беспроводных сенсоров, расположенный в некоторой области с достаточно высокой плотностью – в области покрытия радиосигнала каждого из сенсоров должен находиться как минимум еще один сенсор, в этом случае подобный сенсор будет называться соседним. Сенсоры представляют собой достаточно миниатюрные коммуникационные устройства, обладающие определенными функциями, как по мониторингу окружающей среды, так и передаче данных. Чем больше количество соседних сенсоров у каждого узла, тем более высокой точностью будет обладать сенсорная сеть. Очевидно, что каждый узел имеет ограниченную область восприятия, вычислительную мощность, память и питание. Технологии радиодоступа, применяемые в сенсорах, позволяют передавать данные на расстояния до нескольких десятков метров.

2.1 Современные исследования в сфере позиционирования внутри помещения

Тема позиционирования мобильных объектов внутри помещений привлекает много внимания, и на сегодняшний день уже проведено немало исследований.

Примером существующих систем определения координат является система RADAR, изобретенная учеными Бахл и Падманаб. Это первая

система позиционирования, основанная на использовании сети WLAN. Система RADAR использовала алгоритм ближайшего соседа и выдавала среднюю ошибку измерения координат 2,94 метра [3]. Погрешность была уменьшена до 2,37 метра путем усовершенствования системы RADAR алгоритмом Viterbi [4].

Одна из самых лучших систем позиционирования на сегодняшний день является система EkaHau (EkaHau Positioning Engine – EPE). Система позиционирования EkaHau - это программное обеспечение реального времени, использующее для работы сеть стандарта IEEE 802.11. EPE предоставляет сведения о точном местоположении, статусе и присутствии для Wi-Fi меток, а также поддерживаемых Wi-Fi совместимых устройств.

Возможности EPE включает точное определение места – закрепление Wi-Fi меток EkaHau на людях и различных объектах позволяет EPE собирать данные о местоположении и статусе метки, создавать визуальную картину отслеживаемых предметов внутри предприятия. Определение местоположения обеспечивается инновационными алгоритмами, вычисляющими точное местоположение на основе измерения силы сигнала от нескольких базовых точек Wi-Fi. В дополнение к определению местоположения Wi-Fi меток, EPE отслеживает устройства, оснащенные Wi-Fi адаптерами, такие как ноутбуки, смартфоны, сканеры штрихкодов и т.д. Возможность узнать о местонахождении активов и людей позволяет разнообразным приложениям экономить ресурсы за счет оптимизации использования и контроля активов, а также повысить безопасность и автоматизировать технологический процесс.

Обслуживание и контроль – однажды установленные, все метки взаимодействуют через существующую беспроводную инфраструктуру. Оператор осуществляет полный контроль над системой и в любой момент может определить какое количество меток зарегистрировано в системе, текущий статус и местоположение любой метки. Метки могут сообщать о событиях, например, когда объект начал движение или остановился, передавать сигнал оператору в случае нажатия кнопок на метке, а также сигнал тревоги в случае срабатывания датчика нарушения целостности метки или ее подмены.

Беспроводные метки EkaHau могут быть связаны с идентификационной информацией об отслеживаемом объекте, такой как имя или серийный номер, отдел и т.д., а также со специфическими для конкретного применения параметрами. Эти ассоциации упрощают поиск выбранного объекта в определенной географической области [5]. Элементы системы позиционирования EkaHau представлены на рисунке 2.1.

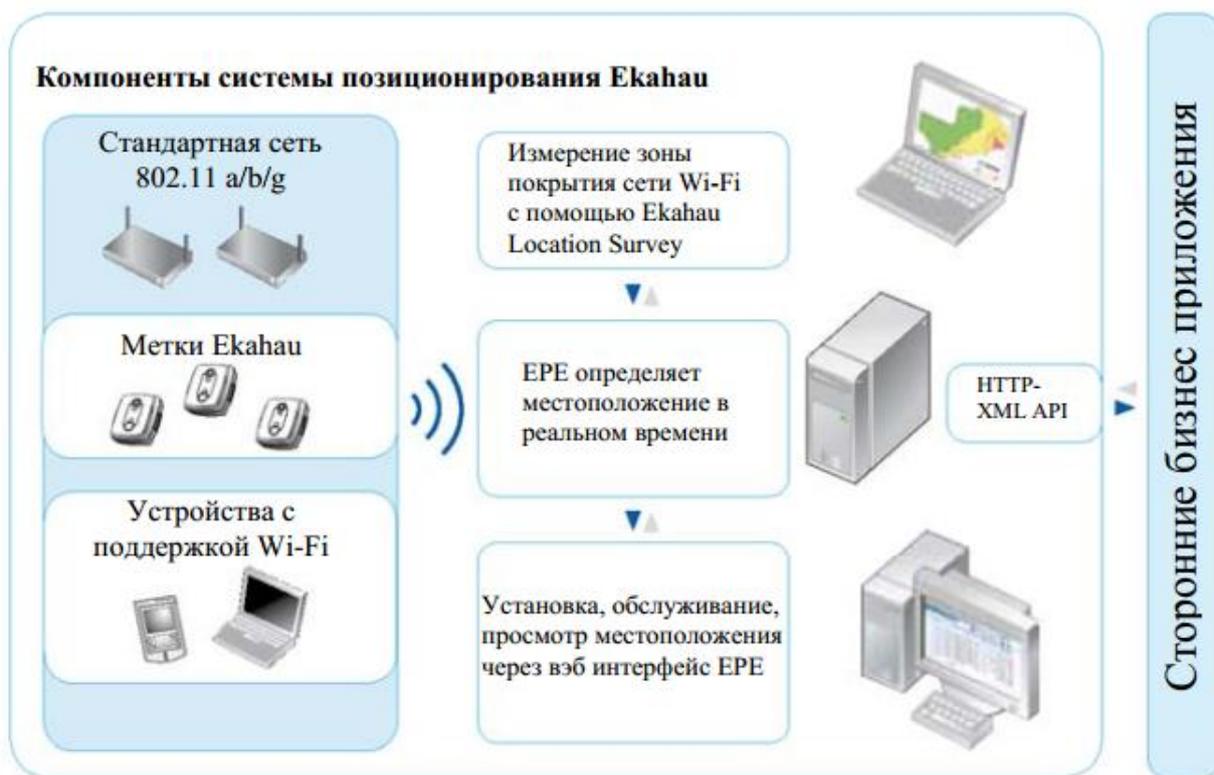


Рисунок 2.1 – Компоненты системы позиционирования EkaHau

Исследовательский центр Нокиа разработал алгоритм позиционирования в мобильных телефонах, основанный на технологии GPS. Данная система локализации была предложена Вельо Отсэйсон и соавторами и достигала точности 5 метров в многоэтажных зданиях [6].

Мюрер и соавторы, взяв за основы методы локализации вне помещений, предложили метод, построенный на принципе ковариационной матрицы, использующей импульсную характеристику канала в качестве подписи. Таким образом была достигнута точность в области подвижной радиосвязи, удовлетворяющая требованиям стандарта FCC E911 [7].

Тубер и его соавторы достигли точности в позиционировании до 4,47 метров используя Эвклидово расстояние. Также они увеличили точность локализации объектов до 3 метров путем совмещения Эвклидова метода и постобработки Fuzzy logic («Нечёткая логика») [8].

2.2 Существующие методы и алгоритмы позиционирования

В распределенной структуре, коей является сенсорная сеть основным источником информации о координатах будут являться данные о взаимном месторасположении отдельных объектов. Фактически это данные о расстояниях между объектами. Для прокладки оптимального маршрута передачи данных строится структура сети, где каждый участник сети передает данные о всех видимых им участниках сети. Вместе со списком участников

сети передается еще и расстояние до каждого участника сети. Сбор этих данных осуществляется объектами сети, а обработка может происходить либо на основе встроенных вычислительных возможностей объектов сети, либо на специальной базовой станции обладающей требуемыми вычислительными мощностями [9]. На таких станциях (или серверах) рассчитывается местоположение каждого участника сети, относительно других участников, методом триангуляции.

Существующие системы определения координат можно условно разделить на две группы системы радиолокации и системы радионавигации. Различие между терминами заключается в назначении этих систем: термин "радиолокация" используется при определении координат объекта системой, тогда как термин "радионавигация" используется в случае систем, предназначенных для помощи объекту в вопросе определения своих координат. В качестве примера использования радиолокации можно привести многочисленные радиолокационные системы военного назначения, в качестве примера использования радионавигации больше подходят системы гражданского назначения - системы навигации воздушных и морских судов, в частности наземные системы VOR (VHS Omnidirectional Ranging), спутниковые системы GPS (Global Positioning System), Galileo, ГЛОНАСС, Beidou (Compass).

Помимо приведенных выше в качестве примера специализированных систем, требующих дорогого оборудования и высокого энергопотребления следует отметить появляющуюся в настоящий момент возможность определения координат в различных сетях связи (GSM, CDMA, WiMAX, WiFi). Находясь в зоне действия сети возможно определение месторасположения абонента на основе информации от находящихся рядом базовых станций (координаты которых фиксированы и известны). Для этого надо оценить расстояния до близлежащих стационарных передатчиков; при наличии измерений до трех (или более) базовых станций месторасположение абонента определяется как точка пересечения окружностей с известными радиусами вокруг точек с известными координатами. Этот способ применяется при отслеживании месторасположения абонента в сетях сотовой связи, основным ограничением является зона действия сети.

В некоторых случаях успешное использование системы позиционирования может по требовать предварительной инсталляции весьма значительного числа опорных узлов сети. В то же время, технология ZigBee позволяет осуществлять беспроводное управление в домашних, офисных и промышленных помещениях. Соответственно, предполагается, что в ближайшем будущем во многих зданиях и сооружениях будет развернута сеть ZigBee как часть самой инфраструктуры здания.

Типичное офисное помещение может содержать ZigBee-совместимое оборудование для управления температурой и вентиляцией в каждой отдельной комнате. Кроме того, в этом помещении могут быть установлены

осветительные и другие приборы, использующие этот протокол связи. Все эти ZigBee-совместимые устройства вполне могут быть использованы для построения навигационной системы. Дополнительный объем программного кода, требуемый для использования узла сети в качестве опорного, не превышает одного килобайта.

Навигационный вычислитель может использовать данные от разного числа опорных узлов. В общем случае могут быть использованы от 3 до 16 опорных сигналов. Если их число более 16, то используются 16 наиболее мощных сигналов.

2.2.1 Триангуляция

Триангуляцией называется процесс разбиения полигональной области со сложной конфигурацией в набор треугольников. При анализе или синтезе сложных поверхностей их аппроксимируют сеткой треугольников, и в последствии оперируют с простейшими полигональными областями, т.е. с каждым из треугольников. Использование триангуляции объясняется следующими причинами:

- треугольник является простейшим полигоном, вершины которого однозначно задают грань;
- любую область можно гарантировано разбить на треугольники;
- для треугольника легко определить три его ближайших соседа, имеющих с ним общие грани;
- вычислительная сложность алгоритмов разбиения на треугольники существенно меньше, чем при использовании других полигонов.

Для наглядного представления триангуляции была смоделирована математическая модель при помощи функции Делоне (приложение А). Для моделирования используется программный продукт MathLAB версии R2010a.

Изображенная на графике сложная полигональная область при помощи триангуляции Делоне была разбита в набор треугольников, этот прием обладает некоторыми преимуществами, например, для треугольника легко определить три его ближайших соседа, имеющих с ним общие грани, и вычислительная сложность алгоритмов разбиения на треугольники существенно меньше, чем при использовании других полигонов.

Существует множество алгоритмов позиционирования, в основном их подходы различаются методами триангуляции, которые в свою очередь зависят от используемого оборудования.

2.2.2 Метод RSSI (Received Strength Signal Indication)

Одним из более распространенных методов позиционирования объектов является индикация уровня принятого сигнала (Received Strength Signal Indication). Любой беспроводной канал по стандарту IEEE 802.15.4 имеет протокольную функцию оценки качества связи (Link Quality Indicator),

которая и определяет мощности принятого сигнала. Результат этого измерения можно вывести, откалибровать по известному расстоянию и оценить дальность до источника. Измерение расстояния производится по следующему сценарию. Приемник с логарифмической амплитудной характеристикой принимает сигналы, по которым встроенный индикатор RSSI формирует 8-разрядный код RSSIVAL. Данный код получается в результате усреднения по восьми периодам (128 мкс) принятого сигнала и снабжается битом состояния, указывающим, когда RSSIVAL является валидным, то есть приемник имел возможность принять по крайней мере восемь периодов. Мощность принятого сигнала P (дБм) вычисляется по формуле

$$P = \text{RSSI}_{\text{VAL}} + \text{RSSI}_{\text{OFFSET}}, \quad (1)$$

где $\text{RSSI}_{\text{OFFSET}}$ - эмпирически подбираемая постоянная (-45 дБм).

Так как в идеальных условиях мощность является обратно пропорциональным значением квадрату расстояния, то логарифм мощности будет пропорционален расстоянию с некоторым коэффициентом, который устанавливается также эмпирически. Данный подход реализован в микроконтроллерах ZigBee фирмы TI серии CC2431, о котором речь пойдет в следующих главах [12].

2.2.3 TOA (Time of Arrival)

Данный алгоритм подразумевает передачу временных меток между объектом и датчиком. Для позиционирования объекта необходимо минимум 3 датчика. Расстояние от датчика до объекта вычисляется пропорционально разности присланной временной метки и времени приема сигнала датчиком. Минусом этого подхода является необходимость точной синхронизации часов на объекте и датчиках.

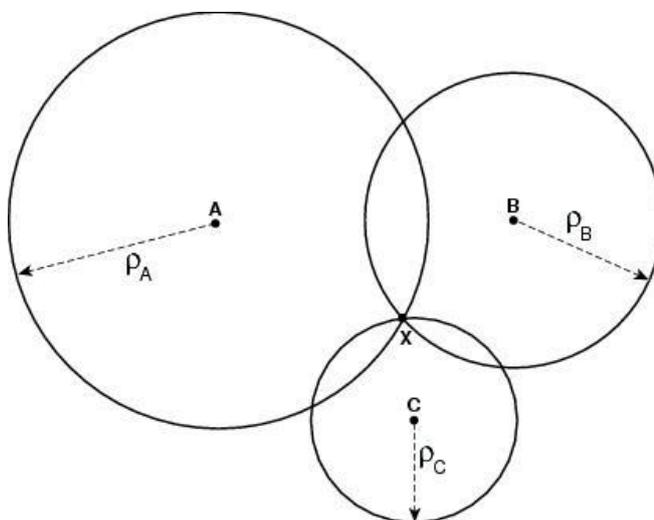


Рисунок 2.2 - Алгоритм позиционирования TOA

На основе этого алгоритма построен также алгоритм вычисления положения по ближайшему соседу. Данный метод требует больше датчиков, но менее мощных.

2.2.4 RTT (Round Trip Time или Return Time of Arrival)

Алгоритм RTT является модификацией TOA, повышающая точность результатов, но требует от датчиков также умения посылать сигнал на объект и наоборот, объект принимать сигнал. Рассчитывает расстояние до объекта на основе времени прохода сигнала до объекта и обратно. Метод RTT не требует синхронизации часов на объекте и датчиках.

2.2.5 TDOA (Time Difference of Arrival)

Положение вычисляется на основе разности нескольких TOA. Каждый TDOA датчик выдает гиперboloид в пространстве, на котором может находиться объект. Двух TDOA датчиков достаточно для определения положения объекта. Данный алгоритм дает более точные результаты в вычислениях.

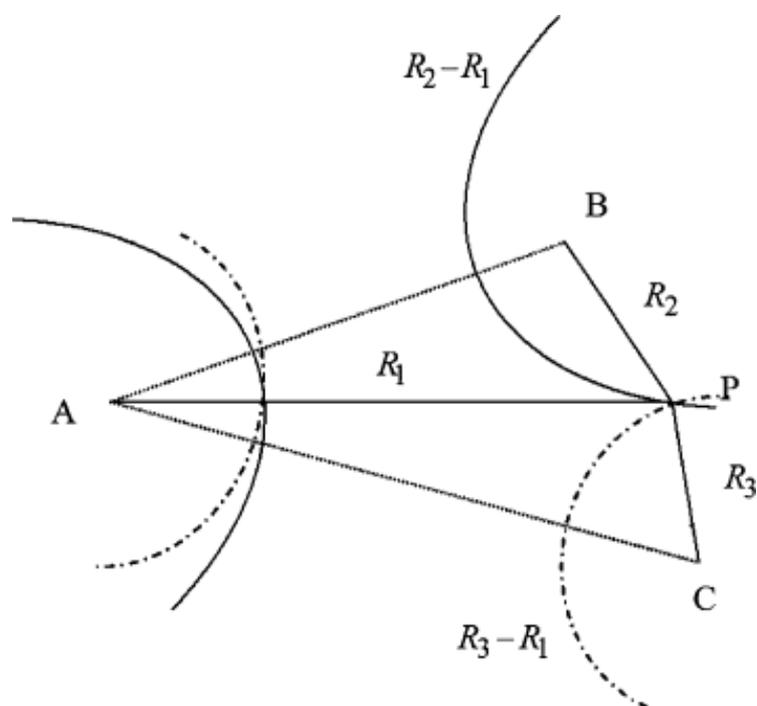


Рисунок 2.3 - Алгоритм позиционирования TDOA

Минусами данного метода является высокая стоимость датчиков TDOA и затраты на дополнительные антенны и оборудование.

2.2.6 AOA (Angle of Arrival)

Положение вычисляется как пересечение двух лучей. Метод, специфичный, например, для массива антенн или направленных сканирующих датчиков.

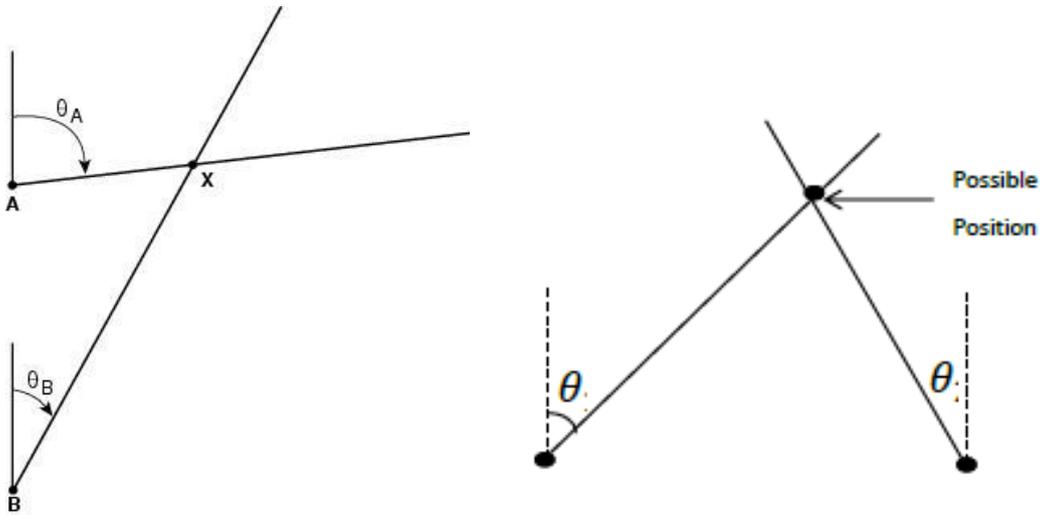


Рисунок 2.4 - Алгоритм позиционирования AOA

2.2.7 SDSTWR (Symmetric Double Sided Two Way Ranging)

Метод SDSTWR основан на использовании теории оптимальной обработки сигналов. Смысл работы можно описать, представив систему, состоящую из двух объектов A и B (рисунок 2.5). Расстояние между объектами неизвестно, его нужно измерить. Объект A посылает объекту B пакет данных с запросом на измерение расстояния и фиксирует момент времени отправки этого пакета. Объект B получает пакет данных от объекта A и через определенное заранее известное время, необходимое для обработки запроса, высылает объекту A подтверждение. Объект A получает уведомление от объекта B и фиксирует момент времени прихода данного сообщения. Далее объект A, зная время, прошедшее между излучением пакета данных с запросом на измерение расстояния и получением подтверждения, может вычесть из него время, затраченное объектом B на обработку запроса. Разделив полученный результат на два, объект A будет знать время прохождения радиосигнала до объекта B. Скорость распространения радиоволн известна и равна скорости света, таким образом, не составит труда вычислить расстояние между объектами A и B. Данную процедуру измерения расстояния между объектами A и B для большей надежности можно проделать несколько раз, после этого вычислить среднее значение этого расстояния. Измерив расстояния от мобильного объекта до четырех контрольных точек с известными координатами, можно определить местоположение объекта в трехмерном пространстве.

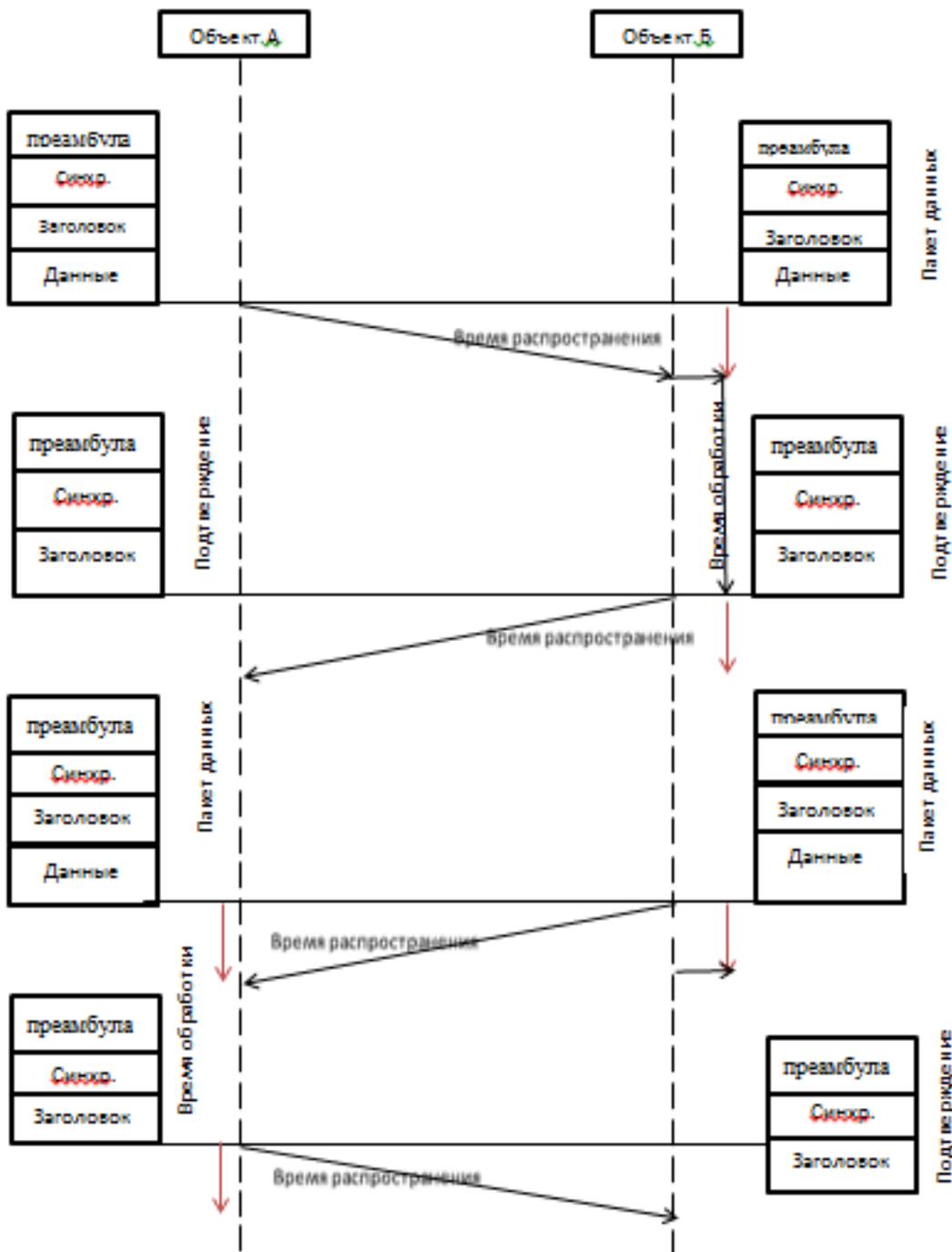


Рисунок 2.5 – Принцип работы метода SDSTWR

2.3 Программно-аппаратный комплекс для стандарта Zigbee

Особенности стандарта Zigbee определяют его программно-аппаратный комплекс, реализующий беспроводное взаимодействие устройств друг с другом. Модель реализации стандарта Zigbee представлена на рисунке 2.5.

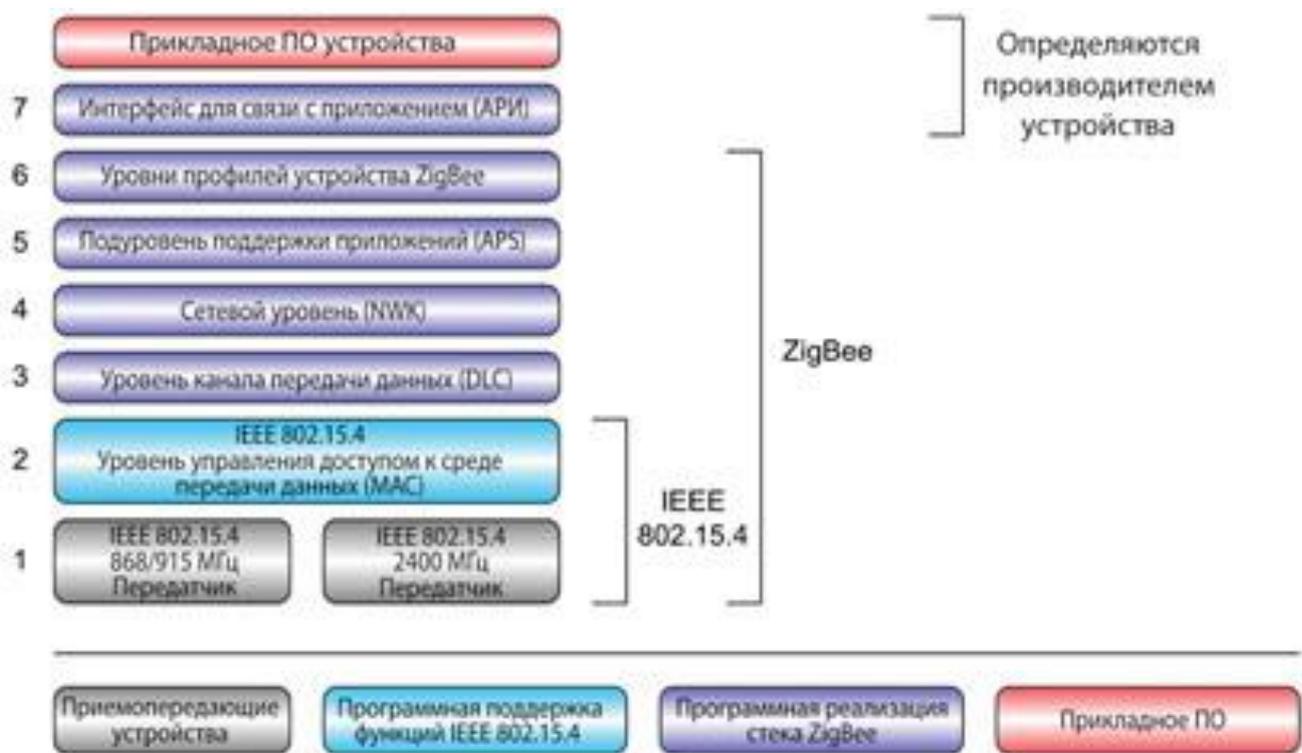


Рисунок 2.5 – Многоуровневая модель стандарта связи ZigBee

Уровни 1, 2 и определяют физические параметры приемопередающих устройств, число адресуемых устройств, принцип радиочастотной посылки, механизмы проверки и подтверждения целостности принятых данных, механизмы предотвращения коллизий и другое. Приемопередающие устройства, предназначенные для работы в стандарте IEEE 802.15.4, обладают характеристиками:

- трансивер работает на частоте 2,4 ГГц по 16-ти каналам с шагом 5 МГц между каналами;
- максимальная скорость передачи по радиоканалу – 250Кбит/с;
- наибольшее расстояние связи на территории вне помещения должно составлять не менее 100 метров.

Уровни три, четыре, пять, шесть описываются самой спецификацией стека ZigBee [10]. На этих уровнях определяется, какими свойствами должны обладать устройства, входящие в сеть, каким образом пакет информации передается от одного сетевого узла к другому, как обеспечивается безопасность передачи данных, как новое устройство подключается к сети, какова ее топология, какой узел в сети главный, а какой — подчиненный и так далее.

В спецификации стека рассматриваются три типа устройств: оконечное устройство, координатор, маршрутизатор. Координатор определяет сеть, выполняет функцию управления узлами, хранит в своей базе данных информацию о параметрах каждого узла, задает идентификатор сети PAN ID, номер частотного канала, также следует отметить, что в процессе работы

беспроводной сенсорной сети координатор может являться источником, приемником и передатчиком сообщений. Маршрутизатор определяет путь доставки сообщения, передаваемого по сети от одного узла к другому, и в процессе работы также может являться источником, приемником или ретранслятором сообщений. Оконечное же устройство не принимает участия в управлении сетью и ретрансляции сообщений, он является только источником/приемником сообщений.

Среди множества преимуществ стандарта ZigBee следует особо выделить поддержку сложных топологий сетей (рисунок 2.6). Именно за счет этого, при относительно малой максимальной дальности связи двух близлежащих устройств, возможно расширить зону покрытия сети в целом. Также этому способствует 16-битная адресация, позволяющая построить сеть, состоящую более, чем из 65 тысяч устройств.

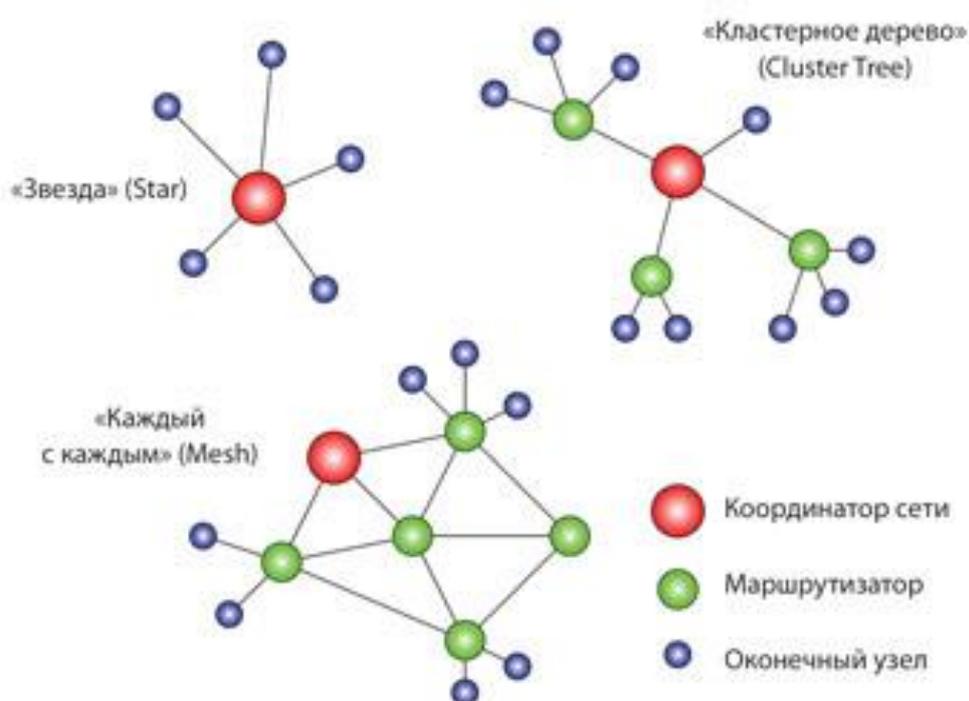


Рисунок 2.6 - Топологии сетей ZigBee

Еще одной отличительной чертой стандарта Zigbee является возможность восстановления работоспособности сети в случае, если из строя выходит один из узлов сети. Данная черта обоснована тем, что каждый узел следит за своими соседями и постоянно обновляет маршрутные таблицы, беря за основу значения мощности принятых от узлов сигналов. В итоге, при изменении фактических координат расположения соседей, а также при выходе из строя одного из устройств, автоматически определяется новый маршрут следования сообщения. Данное преимущество является определенно важным в сетях, работающих на промышленных объектах в условиях высокой

эксплуатации при наличии промышленных помех, в случаях, если часть узлов находится на мобильных устройствах, например, электрокарах.

Анализируя современный рынок микросхем, выполняющих функции приёма-передачи данных по радиоканалу в стандарте IEEE 802.15.4, было отмечено 5 их основных типов.

«Классический» радиотрансивер в стандарте ZigBee. Данная микросхема выполняет лишь функции приема и передачи информации по радиоканалу, она не содержит в себе программного обеспечения, реализующего стек протокола ZigBee. Функцию программной реализации стека ZigBee берет на себя внешний микроконтроллер, к которому микросхема трансивера подключается по одному из стандартных интерфейсов, к примеру, по синхронному периферийному интерфейсу или параллельному интерфейсу. Следует отметить, что для работы трансивера требуется обвязка, включающая в себя дополнительно антенну, кварцевый резонатор и небольшое число пассивных компонентов.

Интегрально гибридные микросхемы (SiP) объединяют в своем корпусе кристаллы «классического» радиотрансивера и микроконтроллера общего назначения. Данный подход позволяет разместить программный стек ZigBee непосредственно во встроенной памяти микроконтроллера, таким образом можно существенно снизить нагрузку на внешний микроконтроллер, который обеспечивает решение задач конкретного приложения. Такие микросхемы требуют минимальной обвязки, включая антенну.

Системы на кристалле (SoC). Данный вид микросхем очень схож с возможностями SiP, но в отличие от SiP и трансивер, и встроенный микроконтроллер интегрированы на одном кристалле. Данные микросхемы также называют ZigBee-процессорами. Они взаимодействуют с внешним контроллером по одному из стандартных интерфейсов (SPI, UART), они допускают загрузку в память сетевых протоколов различной сложности в зависимости от предполагаемой сложности и архитектуры реализуемой сети.

ZigBee-акселераторы. Микросхемы аналогичные SoC, но с уже интегрированным во внутренний микроконтроллер стек протокола ZigBee. Такой вид микросхем является отличным выбором для тех разработчиков, которые предпочитают работать с привычным для него микроконтроллером и хотят добавить ZigBee-функционал без изучения сложного набора протоколов ZigBee-стека. В ZigBee акселераторах необходима внешняя обвязка.

Платформы в едином корпусе (PiP). Микросхемы PiP являются наиболее функциональным решением, подразумевающее объединение высокопроизводительного микроконтроллера с большим набором встроенных периферийных модулей, к примеру, таймеров, аналого-цифровых преобразователей, и трансивера IEEE 802.15.4 на одном кристалле. В таком случае вычислительных возможностей встроенного микроконтроллера и набора встроенной периферии достаточно не только для реализации стека ZigBee, но и также для поддержки конкретного приложения. Дополнительный процессор к таким устройствам не требуется.

Следует обратить внимание на то, что ZigBee-микросхемы от разных производителей обладают различными вспомогательными периферийными модулями, благодаря которым увеличивается их быстродействие и функциональность. Такими модулями, например, могут быть: модуль аппаратной поддержки функций уровня управления доступом к среде передачи данных (MAC) или модуль аппаратной поддержки функций шифрования передаваемых данных (AES-128). Во втором случае разработчику конечного устройства предлагается использовать готовые ZigBee-модули, не требующие ни дополнительной доработки, ни обвязки. Такие модули представляют собой размещенные на одной плате IEEE 802.15.4-трансивер, микроконтроллер, содержащий в себе стек ZigBee-протокола, необходимые внешние элементы обвязки (антенну, схемы питания, тактирования и др). Они выпускаются небольшими компаниями, специализирующимися на этой продукции. Использование готовых модулей наиболее целесообразно на начальной стадии проектирования, когда необходимо быстро оценить принципиальную возможность решения задачи. Следует пояснить описанные выше возможности на примере комплектного частотно-регулируемого электропривода. Преобразователь частоты (ПЧ) состоит из силовой и управляющей части. Управляющая часть преобразователя построена на специализированном DSP-микроконтроллере, который выполняет функции управления силовой частью ПЧ и двигателем (рисунок 2.7). Для мониторинга состояния привода и управления в режиме реального времени преобразователь необходимо снабдить беспроводным сетевым интерфейсом Zigbee.

Возможные варианты построения управляющей части преобразователя частоты на базе ZigBee-микросхем изображены на рисунке 2.7.



Рисунок 2.7 - Структура современного преобразователя частоты

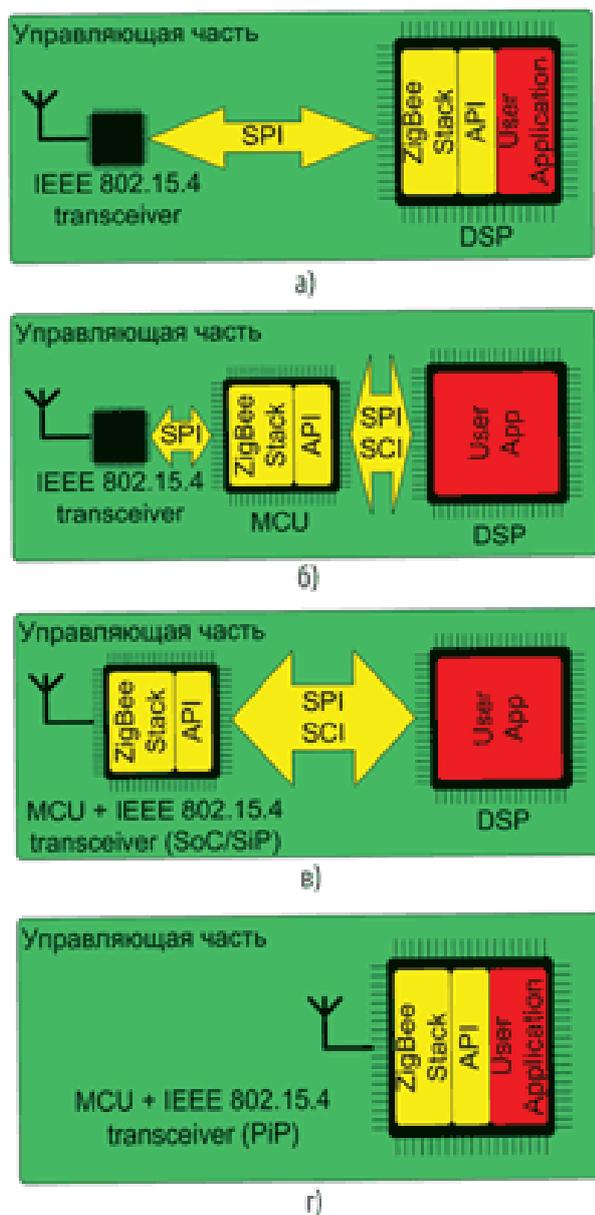


Рисунок 2.8 - Структура управляющей части ПЧ с различными вариантами реализации ZigBee-интерфейса

Схема на рисунке 2.8а предполагает, что вычислительных ресурсов DSP-микроконтроллера достаточно не только для выполнения основных функций приложения, но и стека ZigBee. В схему контроллера ПЧ дополнительно встраивается микросхема радио-трансивера IEEE 802.15.4, имеющая интерфейс SPI для синхронизации с базовым процессором. Обычно, в существующих современных системах управления приводами центральный процессор значительно загружен прикладными задачами. В данном случае для реализации беспроводного интерфейса больше подходят решения, изображенные на рисунках 2.8б или 2.8в. Стек ZigBee реализуется на дополнительном микроконтроллере, что позволяет существенно снизить

нагрузку на основной DSP-контроллер. Решение на рисунке 2.8в основано на использовании системы на кристалле или ZigBee-процессора. Применительно к силовой электронике и электроприводу это наиболее правильное решение, если речь идет о создании серийной продукции, а не опытно-промышленных образцов.

Наконец, в случае если к основному DSP-контроллеру не предъявляется особых требований по быстродействию, то управляющую часть ПЧ можно реализовать по схеме рисунка 2.8г. В этом случае система управления реализована на одной микросхеме. Пока такое решение может быть рекомендовано только для относительно простых систем привода, например со скалярным управлением двигателями, а также для источников питания.

При использовании готовых ZigBee-модулей серьезной модификации управляющей части преобразователя вообще не требуется (рисунок 2.9). При этом ZigBee-стек реализуется внутри модуля. Важным является лишь наличие у модуля нужного интерфейса для сопряжения с целевым микроконтроллером. Это решение позволяет существенно уменьшить время разработки конечного устройства с поддержкой беспроводной сети.

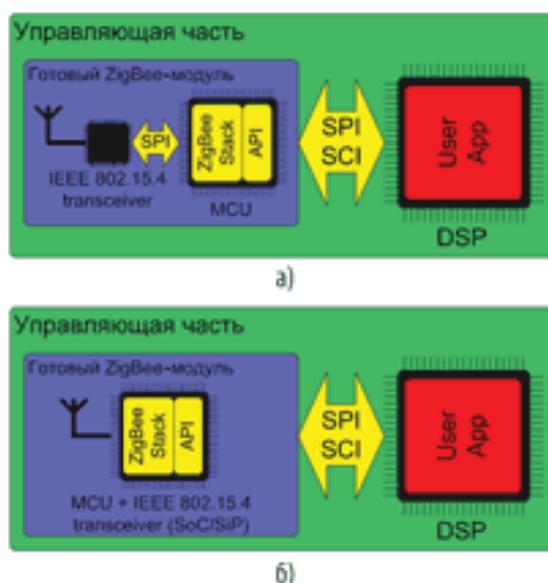


Рисунок 2.9 - Структура управляющей части ПЧ с готовыми ZigBee-модулями

Окончательный выбор элементной базы для конкретной разработки остается за прикладными специалистами.

Для проведения экспериментальной части работы были использованы микросхемы CC2430/CC2431, так как они имеют встроенный модуль определения положения узла в сети. Данные схемы представляют собой систему на кристалле (2,4 ГГц), специально разработанную для работы в IEEE 802.15.4 и ZigBee приложениях (рисунок 2.10).

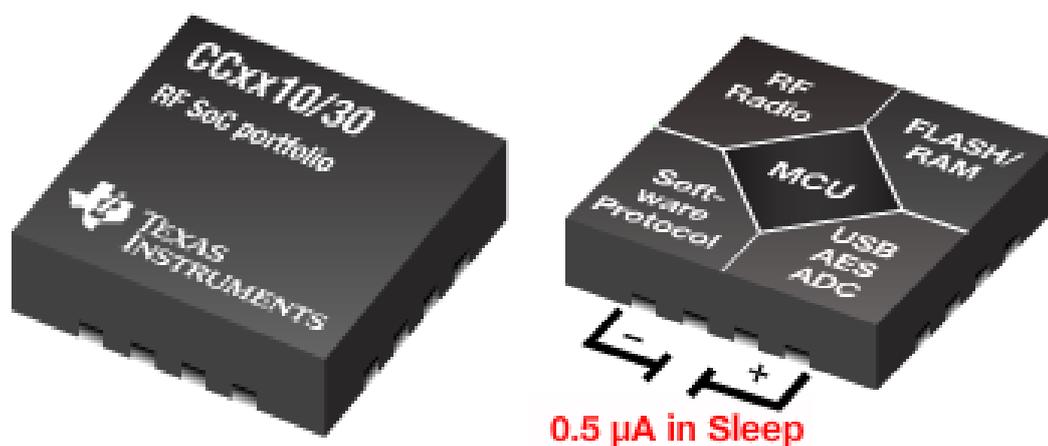


Рисунок 2.10 - Микросхемы CC2430/CC2431

Основные характеристики микросхемы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики микросхем CC2430/CC2431

Параметр	CC2430/CC2431
Интегрированный трансивер	CC2420
Ядро интегрированного микроконтроллера	8051
Частота ядра	32 МГц
Flash память	До 128 Кбайт
RAM память	До 8 Кбайт
Напряжение питания	2.0...3.6В
АЦП	12-бит 8 каналов
Последовательные интерфейсы	2SCI (UART)
Рабочий температурный диапазон	-40...+85°C
Особенности	CC2431 содержит модуль определения положения узла в сети.

В настоящий момент на рынке представлено множество программных методов, которые позволяют рассчитать положение узла в сети. В данных системах узел принимает радиосигналы, несущие информацию о положение объекта в сети. Затем эта информация поступает в центральный узел, где происходит окончательное вычисление координат в сети. После этого вычисленное положение передается обратно в пункт назначения. Такой подход к решению задачи по позиционированию объекта внутри помещения требует значительных вычислительных ресурсов и обычно реализуется на платформе PC или высокопроизводительных микроконтроллеров.

По мере увеличения количества узлов в сети объем трафика, связанного с вычислением положения узлов, увеличивается экспоненциально. Как следствие можно сказать, что данный метод эффективен лишь в небольших сетях с ограниченным числом узлов. Значительный трафик и ограниченная

эффективная пропускная способность сети препятствует применению данного метода в сетях, использующих устройства с аккумуляторным питанием.

Для решения этой задачи в микросхеме CC2431 используется метод «распределенных вычислений». При этом координаты объекта сети вычисляются непосредственно в самом узле на основе данных, полученных от ближайших узлов с известным положением. Таким образом, трафик сети не распространяется далее узлов, ближайших к узлу с определяемым положением. Такой подход позволяет обслуживать большее количество слепых узлов, так как трафик в сети увеличивается прямо пропорционально количеству таких узлов.

Необходимо также отметить способы передачи сигнала в беспроводных сенсорных сетях.

GPS-based метод. Дорогой, недостаточно точно, плохой уровень сигнала в помещении. Всегда должно быть подходящее количество спутников в зоне доступа. Из плюсов следует отметить широкую распространенность, охват больших территорий (например, заводской территории).

Cellular-based метод. В качестве сигнала выступает мощность ближайших базовых станций сотовых операторов телефона. Плюсы в простоте, минусы низкая точность локализации (50-200м). Уровень сигнала зависит от помещения. К плюсам можно отнести глобальный масштаб, так услугами провайдеров сотовой связи пользуются почти все. Он меньше, чем у GPS, но точность в помещении больше.

RFID метод. Радио идентификационные метки имеют малый радиус действия (1-2 м для пассивных, десятки метров для активных сенсоров), но этого может быть вполне достаточно чтобы поставить такую в каждый офисный кабинет. Пассивные метки не потребляют энергии, откликаются только на полученный сигнал.

WLAN (IEEE 802.11). Идентификация в данном методе происходит с помощью WiFi передатчиков. Не нужно внедрять новое оборудование, если оно уже используется. Из преимуществ метода необходимо отметить довольно хорошую точность. Он подходит местам с развитой инфраструктурой. К примеру, университет или больница.

Bluetooth (IEEE 802.15). Из достоинств можно выделить широкую распространенность bluetooth. Если учесть распространение этой технологии в большинстве мобильных телефонов. Есть минус, это меньший радиус действия по сравнению с WiFi.

UWB — Ultra Wide Band. Технология очень похожа на RFID, только оперирует в частотах 3.1-10.6 ГГц, против 0.1-1000 МГц для RFID. Также использует другую технологию обмена импульсами (посылает короткие сигналы сразу на нескольких частотах). UWB метки потребляют меньшую мощность чем RFID

IR метод. Передатчики на основе инфракрасного излучения. Обеспечивают довольно большую точность, но требуют прямую видимость объекта наблюдения.

Попытки решения задачи позиционирования мобильных устройств уже предпринимались уже давно. В частности, для мобильных телефонов такое решение основано на определении того, в какой соте находится владелец сотового телефона. Именно данный принцип лежит в основе метода Cell ID. Так как зоны приема базовых станций сети на местности имеют вид сот, то сначала определяется, какие из них могут принять, а при использовании секторных антенн и приближенно запеленговать, сигналы телефона. На основе полученных данных определяется территория, в пределах которой находится обладатель сотового телефона (с погрешностью до 30 км). Для решения задачи позиционирования в ряде режимов (дальномерном, разностно-дальномерном и суммарно-дальномерном) может быть использована задержка сигналов при распространении. При этом, если точно известно время начала передачи радиосигналов, то на основе значения времени их прихода в приемник можно вычислить расстояние от мобильного телефона до антенны базовой станции. Данный метод предъявляет очень жесткие требования к временной синхронизации всех элементов системы позиционирования, даже до долей микросекунды.

Он реализован в GPS-системе, однако его практически нереально использовать для позиционирования мобильных телефонов. Существует также метод позиционирования по разности моментов времени прихода сигналов, основанный на точном определении времени приема сигналов сотового телефона в 3 или более базовых станциях сети. На основе вычисления разницы значений времен поступления сигналов в парах мест вычисляются гиперболические линии положения передатчика. Источник сигнала будет находиться в точке пересечения двух гипербол. Точность, достигаемая при использовании данной технологии, зависит от: ограничений ширины полосы частот сигнала; точности синхронизации элементов системы и среды распространения сигнала (флуктуаций скорости распространения радиоволн в атмосфере в зависимости от изменений температуры, влажности).

Следует отметить, что точность позиционирования зависит от очень многих факторов. Например, для городских условий характерен многолучевой прием сигналов, при котором как на мобильный телефон, так и на базовую станцию приходят как прямые, так и отраженные от различных объектов радиосигналы. При этом параметры сигналов (их амплитуда в месте приема (Signal Strength), угол прихода (Angle of Arrival AOA) и значение расстояния базовая станция мобильный телефон) непрерывно изменяются в широком диапазоне, что значительно затрудняет определение фактических координат. Сложность решения проблемы точности позиционирования в системах мобильной связи и определяет достаточно большое число видов систем мобильного позиционирования.

3 Экспериментальная часть

3.1 Исследование точности позиционирования при разном количестве опорных узлов

Для исследования эффективности системы позиционирования внутри помещения, была развернута сеть на территории офиса сложной конфигурации, состоящая из восьми опорных узлов, далее было увеличено количество опорных узлов до 14. Слепые узлы пронумерованы от 1 до 4. Узлы от А до Н – изначальные опорные точки, от I до N – дополнительные опорные узлы (для эксперимента с 14 опорными точками)

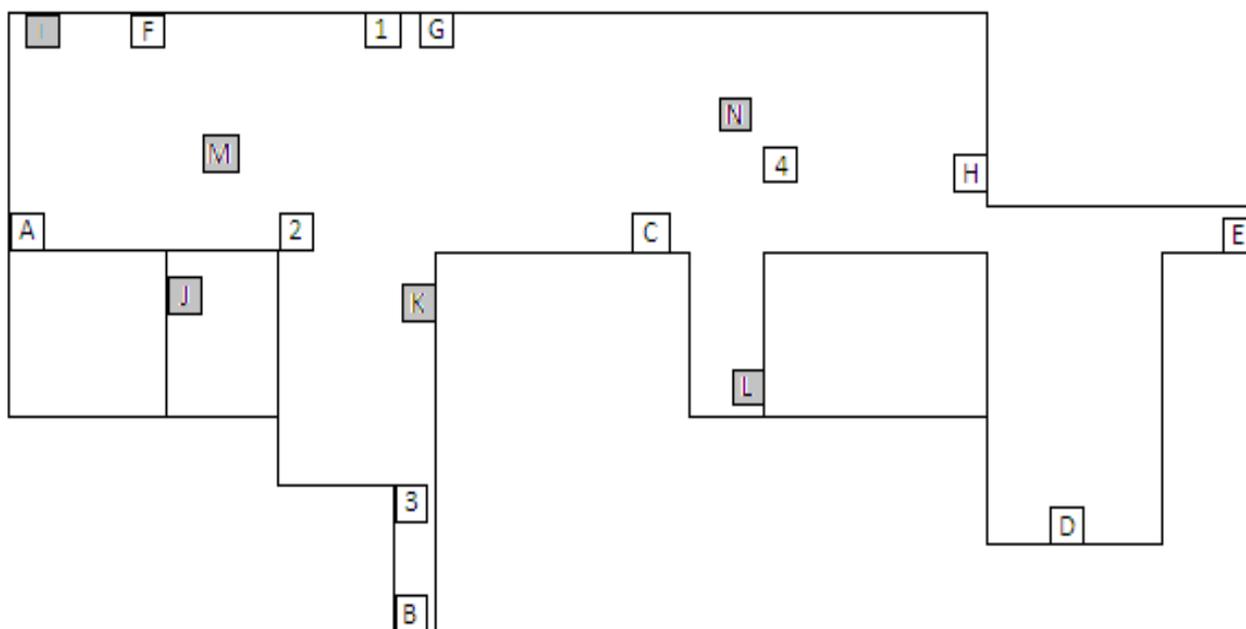


Рисунок 3.1 - Расположение узлов внутри офиса

Результаты измерения координат приведены в таблице 3. Они получены после усреднения 20 измерений в каждом положении.

Для эксперимента была рассчитана абсолютная погрешность δ и среднеквадратичное отклонение для каждого случая по формулам 3.1 и 3.2

$$\delta_x = |X_f - X_i| \quad (3.1)$$

$$\delta_y = |Y_f - Y_i| \quad (3.2)$$

Также было определено среднеквадратичное отклонение по формулам 3.3 и 3.4

$$\Delta x = (X_f - X_i)^2 \quad (3.3)$$

$$\Delta y = (Y_f - Y_i)^2, \quad (3.4)$$

где: X_f - фактическое положение объекта по оси X;
 X_i – измеренное положение объекта по оси X;
 Y_f - фактическое положение объекта по оси Y;
 Y_i - измеренное положение объекта по оси Y.

Измерений координат по 8 опорным точкам

$$\delta_x = |19 - 17,7| = 1,3 \text{ м}$$

$$\delta_x = |16,5 - 20,3| = 3,8 \text{ м}$$

$$\delta_x = |19 - 20,98| = 1,98 \text{ м}$$

$$\delta_x = |27 - 22,74| = 4,26 \text{ м}$$

$$\delta_y = |6 - 10,5| = 4,5 \text{ м}$$

$$\delta_y = |10 - 9,5| = 0,5 \text{ м}$$

$$\delta_y = |15,5 - 13,5| = 2 \text{ м}$$

$$\delta_y = |9 - 9,26| = 0,26 \text{ м}$$

$$\Delta x = (19 - 17,7)^2 = 1,69$$

$$\Delta x = (16,5 - 20,3)^2 = 14,44$$

$$\Delta x = (19 - 20,98)^2 = 3,9204$$

$$\Delta x = (27 - 22,74)^2 = 18,1476$$

$$\Delta y = (6 - 10,5)^2 = 20,25$$

$$\Delta y = (10 - 9,5)^2 = 0,25$$

$$\Delta y = (15.5 - 13.5)^2 = 4.2025$$

$$\Delta y = (9 - 9.26)^2 = 0.0676$$

Ошибка измерялась путем усреднения ошибок по оси X и оси Y для точки (формула 3.5)

$$P = \frac{P1 + P2}{2} \quad (3.5)$$

$$P = \frac{6.8 + 7.5}{2} = 40.9\%$$

$$P = \frac{23 + 5}{2} = 14\%$$

$$P = \frac{10.4 + 9.5}{2} = 9.97\%$$

$$P = \frac{16 + 2.9}{2} = 9.44\%$$

Таблица 3 – Результаты измерений координат по 8 опорным точкам

Номер узла	Фактическое положение по X, м	Фактическое положение по Y, м	Измеренное положение по X, м	Измеренное положение по Y, м	δx , м	δy , м	$(X - x)^2$	$(Y - y)^2$	Ошибка, %
1	19	6	17,7	10,5	1,3	4,5	1,69	20,25	40,9
2	16,5	10	20,3	9,5	3,8	0,5	14,44	0,25	14
3	19	15,5	20,98	13,5	1,98	2	3,9204	4,2025	9,97
4	27	9	22,74	9,26	4,26	0,26	18,1476	0,0676	9,44

Из таблицы 3 видно, что значения абсолютной погрешности δx и δy для каждого измерения, среднеквадратичное отклонение и процент ошибок достаточно велики в рамках системы позиционирования в заданном помещении.

Дополнительно был проведен эксперимент, когда в сеть были добавлены еще шесть опорных узлов. Результаты измерения представлены в таблице 4.

$$\delta x = |19 - 18.5| = 0.5 \text{ м}$$

$$\delta x = |16.5 - 18.5| = 2 \text{ м}$$

$$\delta x = |19 - 18,3| = 0,7 \text{ м}$$

$$\delta x = |27 - 24,5| = 2,5 \text{ м}$$

$$\delta y = |6 - 9,28| = 3,28 \text{ м}$$

$$\delta y = |10 - 9,08| = 1,92 \text{ м}$$

$$\delta y = |15,5 - 13,7| = 1,8 \text{ м}$$

$$\delta y = |9 - 9,16| = 0,16 \text{ м}$$

$$\Delta x = (19 - 18,5)^2 = 0,25$$

$$\Delta x = (16,5 - 18,5)^2 = 4$$

$$\Delta x = (19 - 18,3)^2 = 0,49$$

$$\Delta x = (27 - 24,5)^2 = 6,25$$

$$\Delta y = (6 - 9,28)^2 = 10,76$$

$$\Delta y = (10 - 9,08)^2 = 3,687$$

$$\Delta y = (15,5 - 13,7)^2 = 3,24$$

$$\Delta y = (9 - 9,16)^2 = 0,026$$

$$P = \frac{2,6 + 54,67}{2} = 28,64\%$$

$$P = \frac{23 + 5}{2} = 15,65\%$$

$$P = \frac{10,4 + 9,5}{2} = 7,645\%$$

$$P = \frac{16 + 2,9}{2} = 5,52\%$$

Таблица 4 – Результаты измерений координат по 14 опорным точкам

Номер узла	Фактическое положение по X, м	Фактическое положение по Y, м	Измеренное положение по X, м	Измеренное положение по Y, м	δx , м	δy , м	$(X - x)^2$	$(Y - y)^2$	Ошибка, %
1	19	6	18,5	9,28	0,5	3,28	0,23	10,76	28,64
2	16,5	10	18,5	9,08	2	1,92	3,92	3,687	15,65
3	19	15,5	18,3	13,7	0,7	1,8	0,49	3,24	7,65
4	27	9	24,5	9,16	2,5	0,16	6,25	0,026	5,52

Из таблицы 4 видно, что установка шести дополнительных опорных узлов привела к увеличению точности позиционирования для всех слепых узлов в среднем в 1,52 раза. Это означает снижение среднеквадратичного отклонения измеренных координат. Результаты двух экспериментов графически изображены на рисунке 3.2.

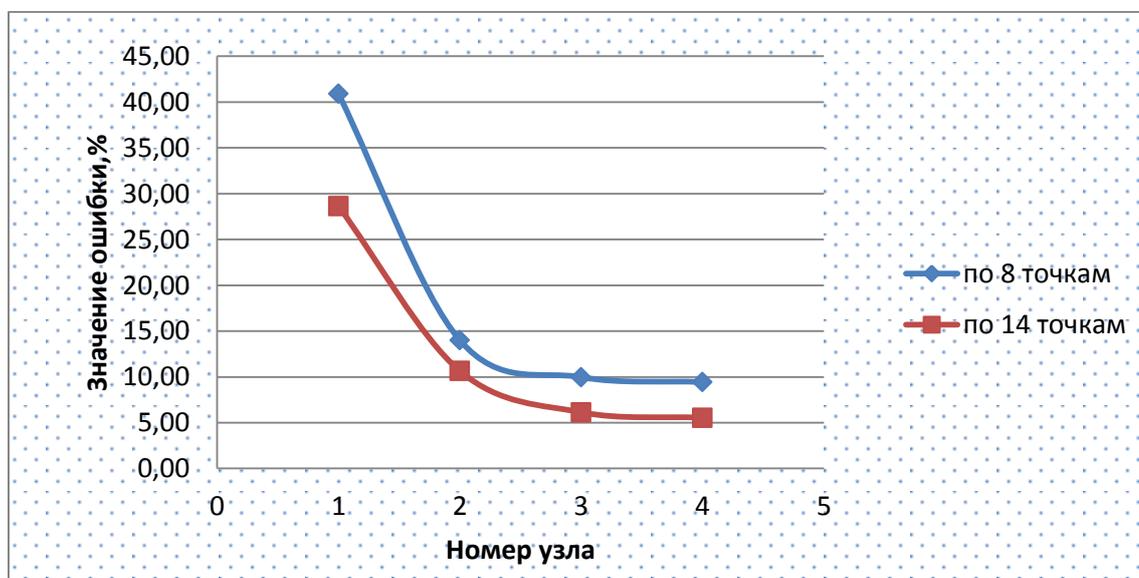


Рисунок 3.2 – Значения ошибок измерений по 8 и 14 опорным точкам

Из рисунка 3.2 видно, что значения ошибок системы позиционирования объектов меньше в сети с 14 опорными узлами.

Таким образом, увеличение числа опорных точек ведет к снижению ошибки измерения в каждом конкретном случае и увеличивает точность измерения в 1,52 раза.

3.2 Исследование затухания сигнала при распространении между передатчиком и приемником

Для определения затухания сигнала в системе позиционирования были проведены замеры внутри помещения и за пределами помещения. В ходе моделирования распространения сигнала были получены кривые ослабления сигнала при распространении между передатчиком и приемником, которые представлены на рисунке 3.3 и 3.4.

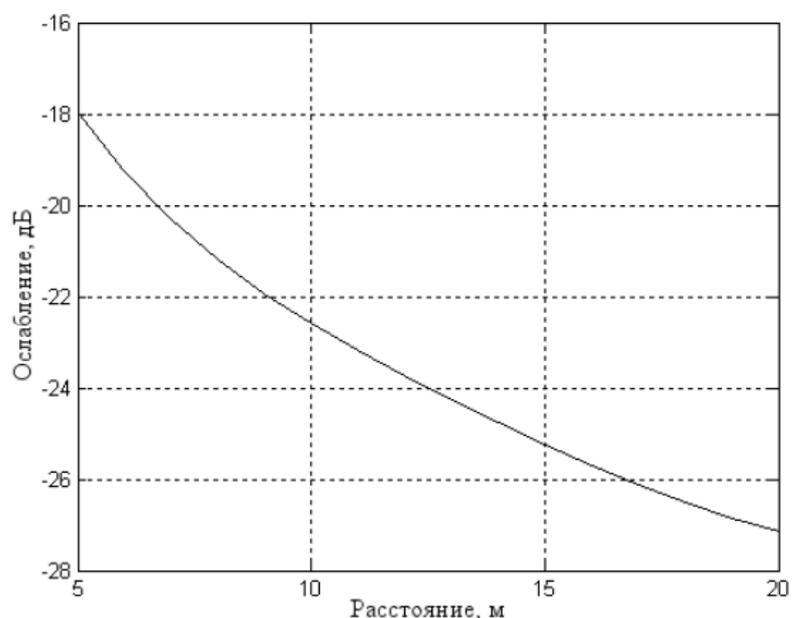


Рисунок 3.3 – Ослабление сигнала (вне помещения)

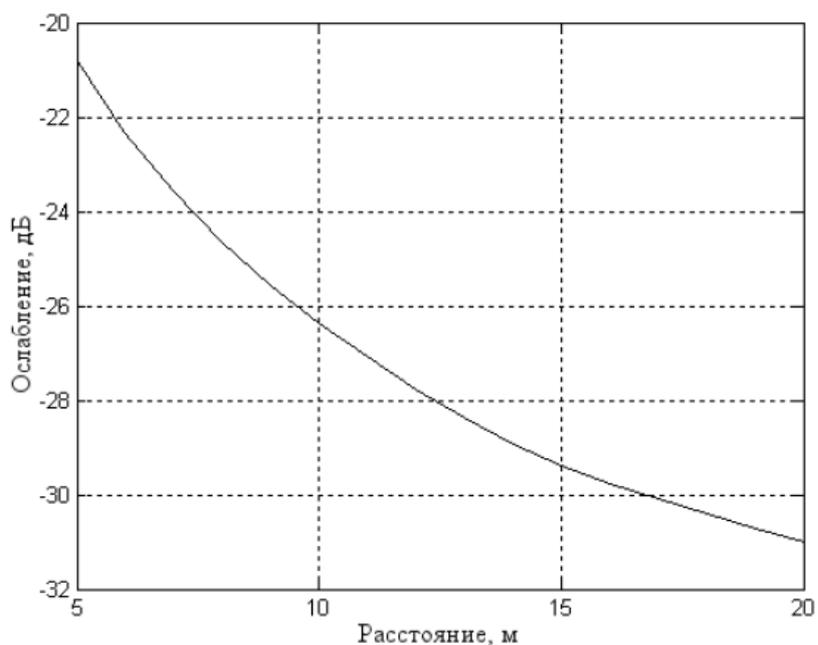


Рисунок 3.4 – Ослабление сигнала (внутри помещения)

Распределение ошибок при оценке расстояний получалось при многократном (20) повторении передачи пакета и оценке уровня принимаемого сигнала при рассматриваемом расстоянии между передатчиком и приемником. Полученные зависимости представлены на рисунках 3.5, 3.6.

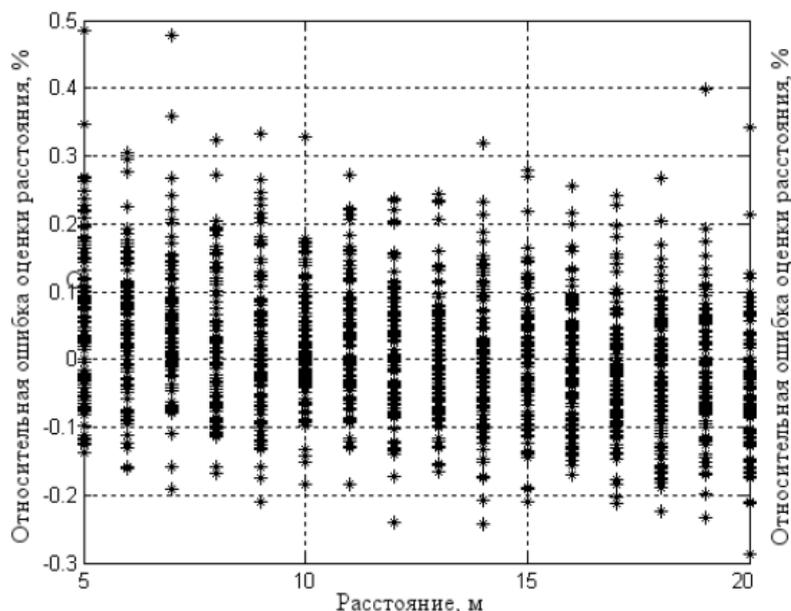


Рисунок 3.5 – Число битовых ошибок (вне помещения)

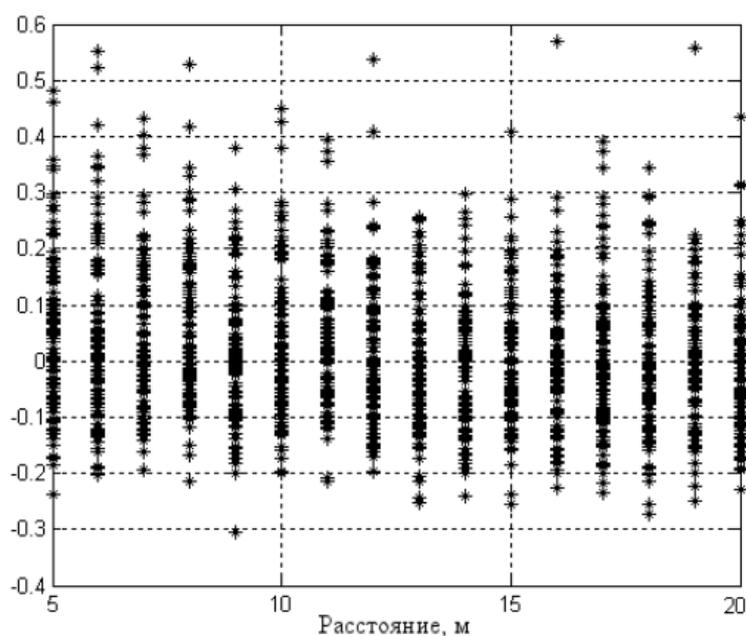


Рисунок 3.6 – Число битовых ошибок (внутри помещения)

По результатам моделирования дисперсия относительной ошибки измерения расстояния составляет 10 и 15 процентов при оценке расстояний

вне и внутри помещения соответственно. Усредненные оценки мощности принимаемого сигнала, полученные при увеличении расстояния показаны на рисунках 3.7 и 3.8.

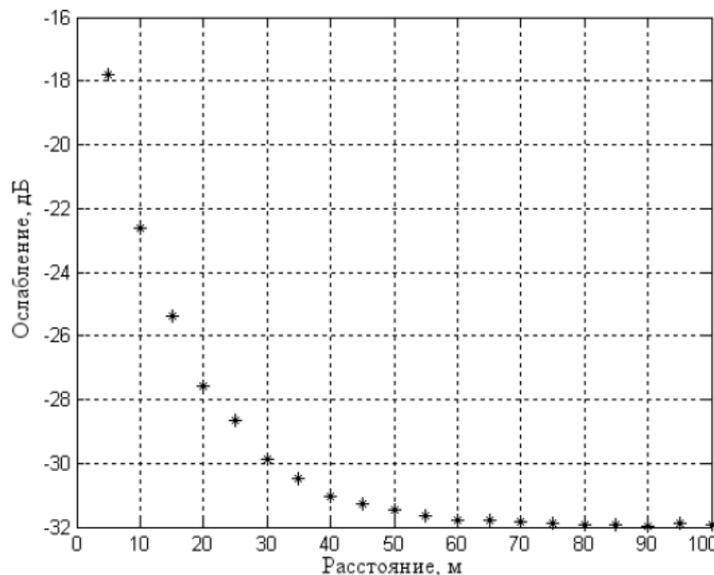


Рисунок 3.7 – Мощность сигнала в приемнике (вне помещения)

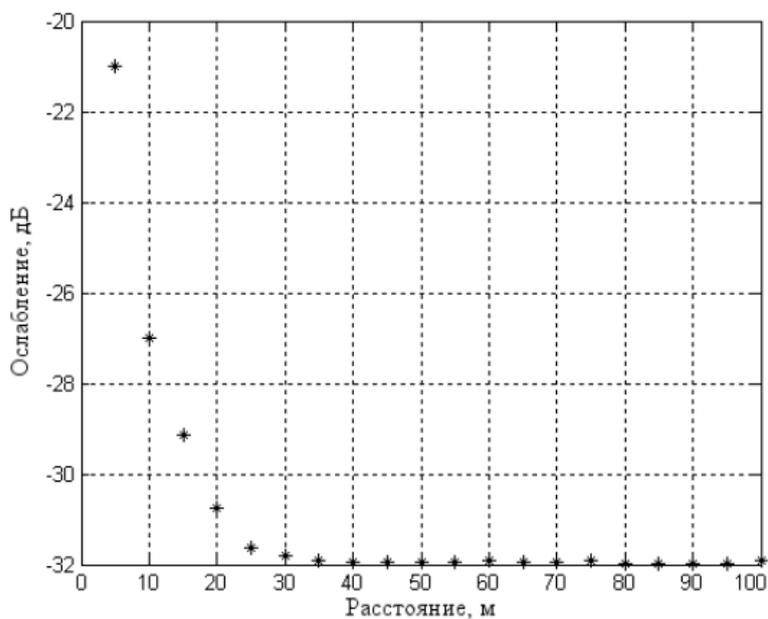


Рисунок 3.8 – Мощность сигнала в приемнике (внутри помещения)

Из приведенных рисунков видно, что при увеличении дальности расстояния, в оценку уровня принимаемого сигнала всё больший вклад начинают вкладывать шумы, присутствующие в канале передачи. Коэффициент битовых ошибок (BER) при увеличении расстояния показан на рисунках 3.9, 3.10.

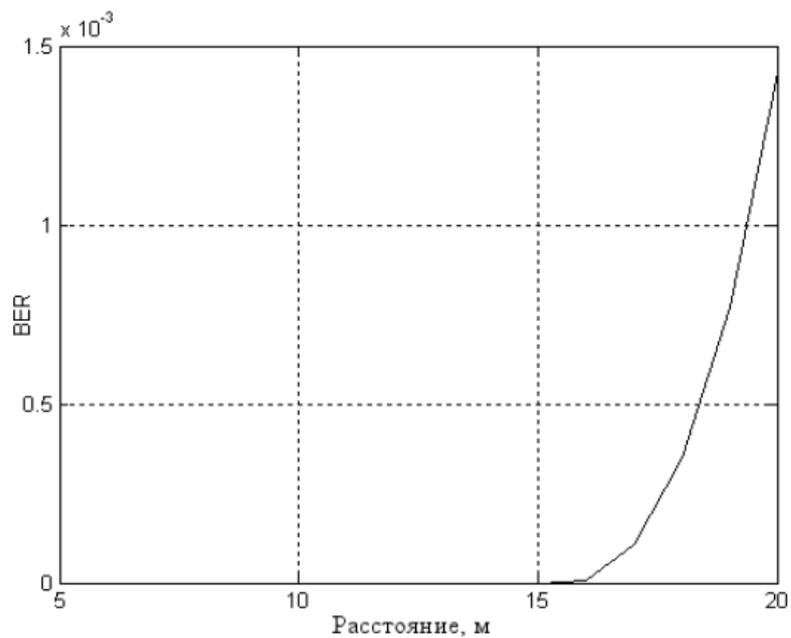


Рисунок 3.9 – Число битовых ошибок (вне помещения)

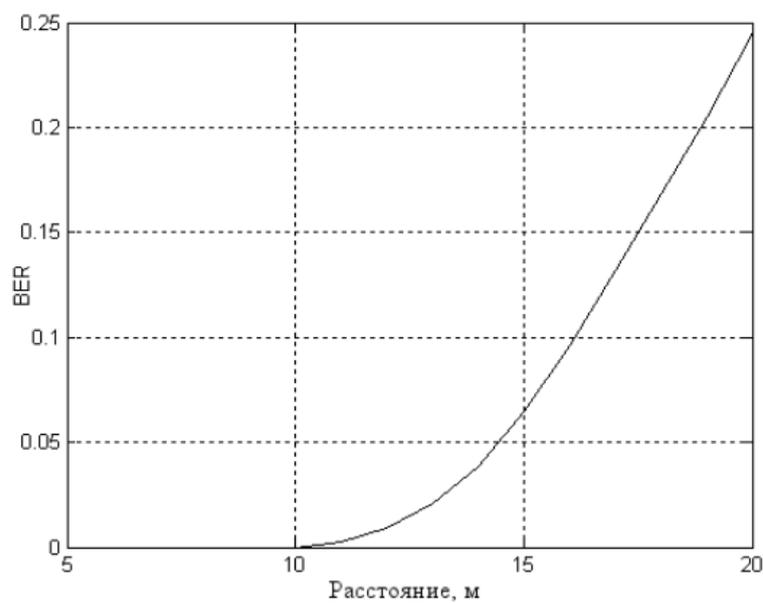


Рисунок 3.10 – Число битовых ошибок (внутри помещения)

Таким образом дальность связи в сетях IEEE 802.15.4 по стандарту оказывается в пределах 20 метров (при уровне передаваемого сигнала -3дБм).

3.3 Исследование точности позиционирования в зависимости от частоты выборки

Для исследования точности позиционирования была смоделирована беспроводная сенсорная сеть с помощью дискретного модульного симулятора OMNeT++.

В симуляторе OMNeT++ [11] была построена беспроводная сенсорная сеть, в которой было реализовано 2 основных класса объектов: сенсорный узел (класс Node) и движущаяся цель (класс Target). Архитектура сети представляет собой множество датчиков, расположенных в виде матрицы, причем мощности передатчика достаточно лишь для связи с ближайшими соседями. В сети предусмотрена возможность самостоятельного определения мощности передатчика сенсорного узла для возможности моделирования сетей с большим потоком избыточных данных.

Основные положения алгоритма сети:

- В каждом сенсорном узле установлен нижний порог на величину поступающего сигнала. При повышении этого порога датчик однозначно определяет событие – присутствие мобильного объекта рядом.

- На этапе инициализации сети происходит локализация узлов и автоматическая настройка мощности передатчика сенсорного узла для обеспечения стабильной связи с ближайшими узлами-соседями.

- Каждый сенсорный узел, обнаруживший объект, посылает сообщение своим соседям-узлам о характеристиках принятого сигнала и своих координатах (идентификационном номере).

- Для определения координат мобильного объекта с неизвестными координатами (x, y) и исходной мощностью излучения (P) необходимы сведения как минимум от трех узлов.

Для мобильного объекта задается начальное положение, скорость, направление, ускорение и модель движения (направленное, линейное, круговое, по закону синуса).

В ходе движения объекта сеть снимает информацию через определенный интервал времени. После того, как определяется узел лидер происходит определение координат объекта и последующая передача сообщения мастер-узлу, обладающего большими вычислительными ресурсами и мощным передатчиком. На рисунке 11 изображены сенсорные узлы в виде кружков, номер 10 – мастер-узел, мобильный объект в верхней части. В момент снятия скрина экрана, узел №5 посылает сообщение соседям данные о своем измерении.

В системе может присутствовать три типа сообщений: от сенсора к сенсору, от объекта к сенсору и сообщение для мастер-узла. Мастер-узел обладает дополнительной возможностью анализа – алгоритмом аппроксимации данных. Реализуется аппроксимация данных, полученных узлами сети, при помощи алгоритма триангуляции, описанного в предыдущей главе.

Приведу численные результаты исследования работы беспроводной сенсорной сети из 20 узлов при движении объекта по кругу и по закону синуса. Данные модели были исследованы при различной частоте выборки информации сенсорной сетью по времени. В таблице 5 приводятся максимальные (max) и средние (avg) относительные значения погрешности аппроксимации при различной частоте выборок. Аппроксимация производилась мастер-узлом сети, куда поступают сведения от всех узлов-лидеров.

Таблица 5 – Результаты измерений

Частота выборок по времени	Движение по кругу		Движение по синусоиде	
	Max ошибка	Avg ошибка	Max ошибка	Avg ошибка
0,1 с	6,9%	1,3%	19,3%	2,9%
0,3 с	9,9%	1,8%	25,2%	4,9%
0,5 с	23,7%	4,4%	36,6%	12,0%
0,9 с	35,9%	5,2%	59,2%	21,2%
1 с	31,3%	7,1%	57,9%	22,9%

У мобильного объекта были заданы следующие начальные условия: скорость движения 25 м/с, ускорение 10 м/ с². Интервал снятия данных – 20 секунд.

Из таблицы 5 видно, что частота выборки 0,5 с для случая кругового движения и 0,3 с для синусоидального движения, вполне достаточна для получения траектории высокой точности.

Таким образом, если у мобильного объекта сложная траектория движения, можно увеличить частоту снятия информации беспроводной сенсорной сетью, таким образом можно не потерять требуемую точность позиционирования.

Заключение

В ходе выполнения работы был проведен обзор современных беспроводных технологий, рассмотрены особенности беспроводных сенсорных сетей, подробно была разобрана архитектура сенсора. Также были освещены вопросы существующих алгоритмов позиционирования объектов внутри помещения, такие как триангуляция, RSSI, TOA и др.

В экспериментальной части работы была определена точность локализации при количестве опорных узлов 8 и 14. Было выявлено, что значения ошибок системы позиционирования объектов в сети с 14 опорными узлами меньше в 1,52 раза.

Для определения затухания сигнала были произведены замеры внутри помещения и за пределами помещения. По результатам моделирования было выяснено, что значение дисперсии относительной ошибки измерения в случаях измерений внутри и за пределами помещения составляет 10 и 15 процентов. При увеличении дальности расстояния между узлами, увеличивался уровень шумов, все значения были приведены графически. По результатам эксперимента было выявлено, что в сетях IEEE 802.15.4 дальность связи располагается в пределах 20 метров, если уровень передаваемого сигнала -3дБм.

В работе также была смоделирована сеть, в рамках работы которой было выявлено, что частота выборки 0,5 с для случая кругового движения и 0,3 с для синусоидального движения, вполне достаточна для получения траектории высокой точности.

Перечень сокращений

WSN	Wireless Sensor Network
SOSUS	Sound Surveillance System
EPE	Ekaheu Positioning Engine
GPS	Global Positioning System
RSSI	Received Strength Signal Indication
TOA	Time of Arrival
RTT	Round Trip Time или Return Time of Arrival
TDOA	Time Difference of Arrival
AOA	Angle of Arrival
BER	Bite Error Rate
VOR	VHS Omnidirectional Ranging
AWACS	Airborne Warning and Control System
SDSTWR	Symmetric Double Sided Two Way Ranging
ПЧ	Преобразователь частоты
UWB	Ultra Wide Band

Список литературы

1. C.Siva Ram Murthy, B.S.Manoj "Ad Hoc Wireless Networks: Architectures and Protocols", Prentice Hall, 2004, 880p.
2. Tiny OS webpages. – <http://www.tinyos.org>
3. P. Bahl and V.N. Padmanabhan, "RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system". Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 784 p.
4. P. Bahl, V. N. Padmanabhan, A. Balachandran "Enhancements to the RADAR User Location and Tracking System", Microsoft Research: Redmond, WA. 2000, 784 p.
5. Ekahau, "Ekahau positioning engine 2.0; 802.11 based wireless LAN positioning system". An Ekahau Technology Document, November 2002, 123 p.
6. Veljo Otsason, Alex Varshavsky, Anthony LaMarca, and Eyal de Lara, "Accurate GSM Indoor Localization". Ubicomp 2005, 158 p.
7. Meurer M., Heilmann S., Reddy D., Weber T., Baier P.W., "A signature based localization technique relying on covariance matrices," in Proceedings of Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC), 2005, 175 p.
8. Teuber A., Eissfeller B., "WLAN indoor positioning based on Euclidean distances and fuzzy logic", Proceedings of the 3rd Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'06), Hannover, Germany, 2006, 168 p,
9. I.F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayirci, "Wireless sensor networks: a survey", 2002, 56 p.
10. ZigBee Alliance. ZigBee Specification. Q4/2007//www.zigbee.org/en/spec_download/zigbee_downloads.asp
11. <http://omnetpp.org>
12. <http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/cc2431.html>
13. Л.С. Восков, Р.О. Курпатов. Энергоэффективный комбинированный метод локализации в беспроводных сенсорных сетях // Журнал «Датчики и системы», №4, 2011. – М. : ООО «СенСиДат-Контрол», 2011, 153 с.
14. Иванов Е.В., Козлов В.Н., Курикса В.А. "Экспериментальное определение координат в сетях стандарта IEEE 802.15.4" // Труды 63-й научной сессии РНТОРЭС им. А.С. Попова, Москва, 2008, 256 с.
15. Кривченко Т., Кривченко И., Долгушин С., Артеев В., Федоров В., Ламберт Е., Курилин А. Беспроводная связь в системах мониторинга и управления // Электронные компоненты. 2005, 461 с.
16. Дарибаева Ж. Позиционирование объектов в беспроводных сенсорных сетях // Сборник научных трудов аспирантов и магистрантов АУЭС. 2013. – 50 с.

Приложение А

Моделирование триангуляции для системы позиционирования

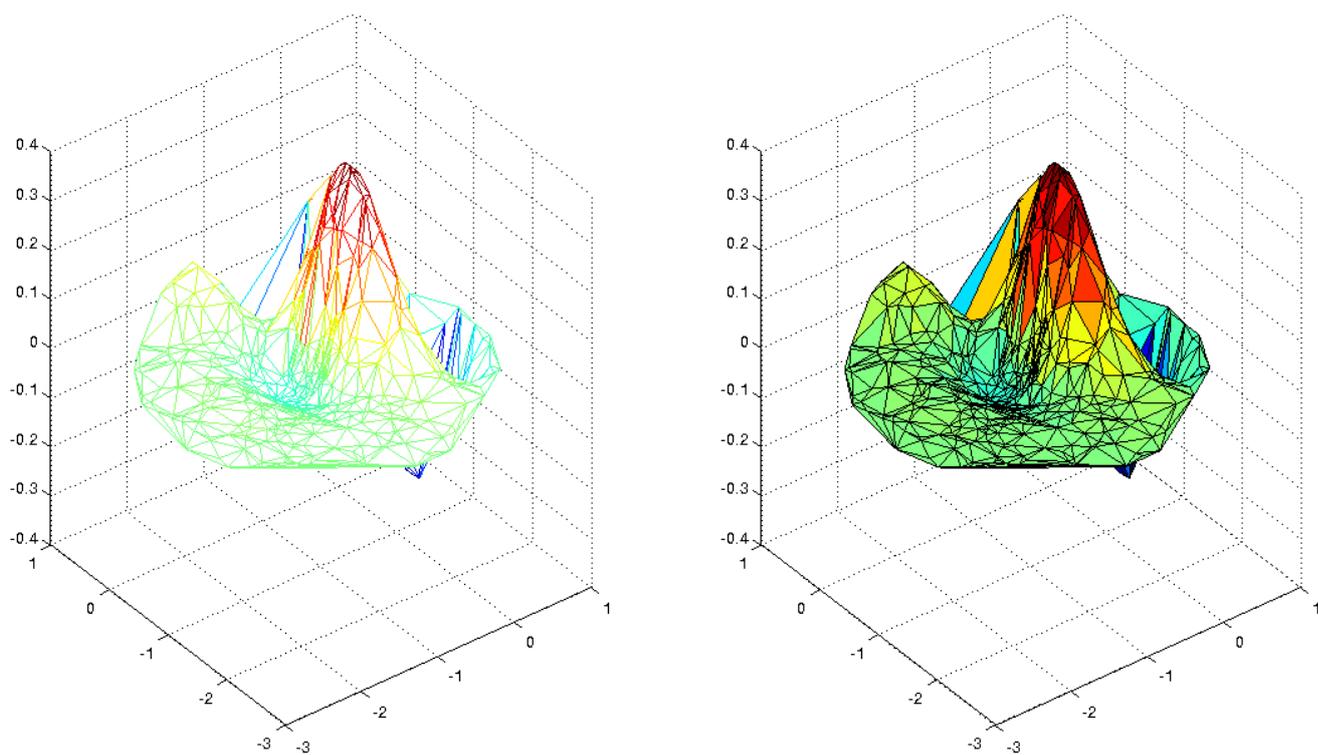


Рисунок А1 – Метод триангуляции Делоне

Приложение Б

Исследование точности позиционирования в зависимости от частоты выборки

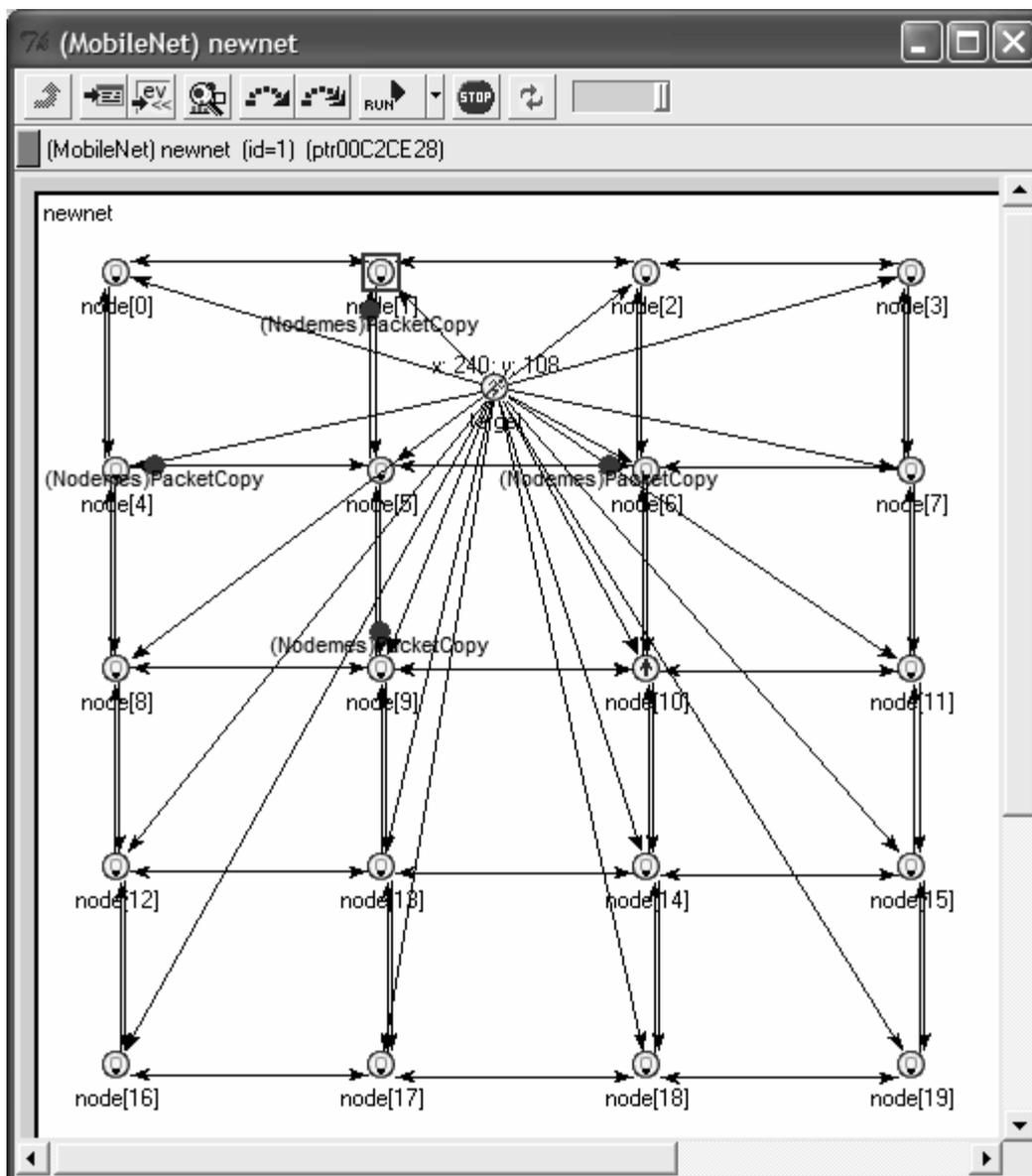


Рисунок Б1 – Окно для визуализации работы сети

Продолжение приложения Б

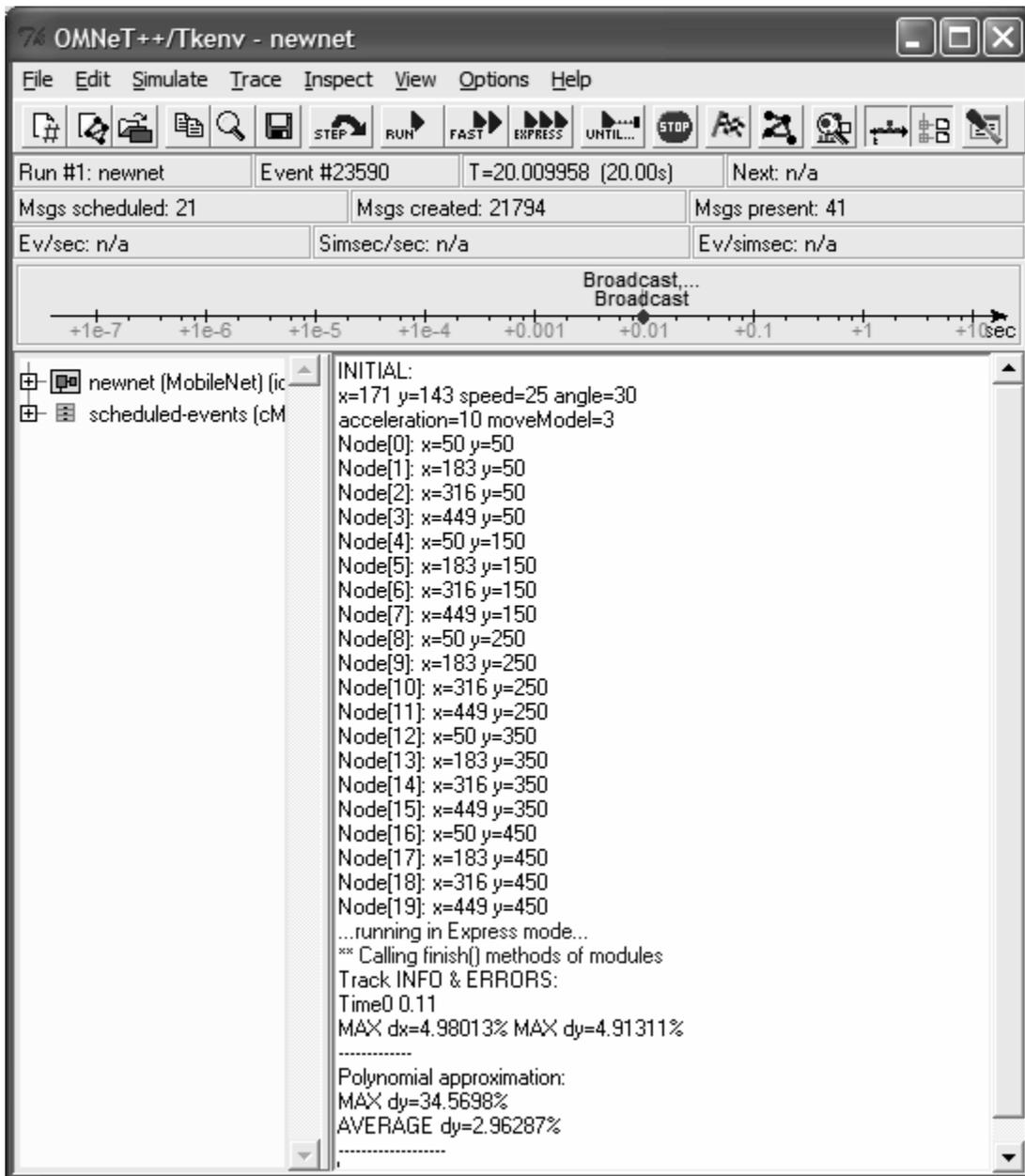


Рисунок Б2 – Основное окно для вывода информации