

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**  
**Некоммерческое акционерное общество**  
**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**  
**имени Гумарбека Даукеева**

Кафедра «Телекоммуникационные сети и системы»

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

**ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ**  
Зав. кафедрой  
PhD, доцент Темырканова Э.К.  
(ученая степень, звание, ФИО)

\_\_\_\_\_  
(подпись)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**  
**пояснительная записка**

на тему: «Исследование методов взаимодействия беспроводных сенсорных сетей»

Магистрант: Блидченко Д.В. \_\_\_\_\_ МРЭТн-18-1  
(Ф.И.О.) (подпись)

Руководитель: доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ Касимов А.О.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Рецензент \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_ \_\_\_\_\_  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Консультант по ВТ: доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ Касимов А.О.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Нормоконтроль: доцент, к.т.н. \_\_\_\_\_ Касимов А.О.  
(ученая степень, звание) (подпись) (Ф.И.О.)

Алматы 2020

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**  
**Некоммерческое акционерное общество**  
**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**  
**имени Гумарбека Даукеева**

Институт Космической Инженерии и Телекоммуникаций

Специальность: 6М071900 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Кафедра: «Телекоммуникационные сети и системы»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Блидченко Денису Вадимовичу  
(фамилия, имя, отчество)

Тема: «Исследование методов взаимодействия беспроводных сенсорных сетей»

утверждена Ученым советом университета № 122 от «25» октября 2018 года.

Срок сдачи законченной диссертации «25» мая 2020 года.

Цель исследования: Целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмов, создание новой БСС которую в последствие исследуем.

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

- 1 Разработка алгоритмов обнаружения.
- 2 Выявление возможностей уменьшения количества мотов, используя более чувствительные датчики.
- 3 Исследование сравнительных характеристик случайного и детерминированного методов размещения узлов сенсорной сети.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- 1) график зависимости радиуса действия датчиков от чувствительности приёмника датчиков и мощности передатчика квадрокоптера;
- 2) беспроводная сенсорная сеть модель первая, вторая, третья в матлабе;
- 3) покрытие узлов сетки сенсорным узлом.

Рекомендуемая основная литература:

1. Немировский М.С., Шорин О.А., Бабин А.И., Сартаков А.Л. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма. – М.: Эко-Трендз, 2009. – 400 с.
2. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей/ Е.А. Кучерявый, В.В. Кондратьев и другие// Электросвязь, 2006-№6-с10-15.
3. Милютин Е.Р., Василенко Г.О., Сиверс М.А. и др. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона.

**Г Р А Ф И К**  
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Изучение литературы по теме.	20.12.2018	
Подготовка введения и основной части диссертации.	22.12.19	
Выполнение эксперимента по диссертации.	11.03.2020	
Анализ результатов, предварительные выводы.	11.04.2020	
Представление всей работы.	25.05.2020	

Дата выдачи задания 30 сентября 2018г.\_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_  
(подпись)

(Темырканова Э.К.)  
(Ф.И.О.)

Научный  
руководитель диссертации \_\_\_\_\_  
(подпись)

(Касимов А.О.)  
(Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению  
магистрант \_\_\_\_\_  
(подпись)

(Блидченко Д.В.)  
(Ф.И.О.)

## **Аннотация**

В данном исследовании рассмотрена концепция интернета вещей, технологической основой которой во многих ее приложениях и стали беспроводные сенсорные сети (БСС), подразумевается прежде всего принципиальное изменение количественных характеристик сети.

Беспроводная сенсорная сеть будет выполнять функцию обнаружения квадрокоптеров.

Использование данной беспроводной сенсорной сети планируется на объектах, не допускающих на свою территорию работу дронов.

## **Abstract**

This research discusses the concept of the Internet of things, the technological basis of which in many of its applications and became wireless sensor networks (WSN), implies primarily a fundamental change in the quantitative characteristics of the network. The wireless sensor network will perform the function of detecting the quadcopters. The use of this wireless sensor network is planned at facilities that do not allow drones to operate on their territory.

## **Аңдатпа**

Бұл зерттеуде ғаламтор заттарының концепциясы қарастырылған, қосымшаларының көбінде, сымсыз сенсорлық желілер, технологиялық негізі болды. Ең алдымен желінің сандық сипаттамасы ретінде қарастырылады.

Сымсыз сенсорлық желі квадрокоптерді анықтау функциясын атқарады.

Бұл сымсыз сенсорлық желіні пайдалану өз аумағына дрон енуіне жол бермейтін объектілерде жоспарланып отыр.

## Содержание

Введение	7
1 Беспроводные сенсорные сети их применение	10
1.1 Применение в области обороны и безопасности	12
1.2 Применение в области здравоохранения	13
1.3 Применение в быту	13
1.4 Применение в экологии	14
2 Платформы и влияние факторов на работу БСС	15
2.1 Энергия БСС	18
2.1.1 Технология заимствования энергии	19
2.1.2 Заимствование от солнечного света	21
2.1.3 Заимствование от вибрации	22
2.1.4 ZigBee Green Power	23
3 Отказоустойчивость	25
4 Масштабируемость	26
5 Расходы на производство	26
6 Аппаратные особенности	26
7 Топология сети	29
7.1 Предварительное развертывание	29
7.2 Установка режима работы	29
7.3 Развертывания дополнительных узлов	30
8 Концепция беспроводной сенсорной сети как часть интернета вещей	30
8.1 Restful services	31
8.2 CoAP протокол	32
8.3 AMQP	33
8.4 WebSocket	34
8.5 MQTT	36
9 Окружающая среда	37
10 Способы передачи данных	38
11 Маршрутизации в беспроводных сетях	39
12 Требования	41
13 Алгоритмы маршрутизации в БСС	42
13.1 Алгоритм Directed Diffusion	43
13.2 Алгоритм Rumor Routing	44
13.3 Алгоритм LEACH: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy	44
13.4 Алгоритм APTEEN	47
13.5 Алгоритм SOP: протокол самоорганизации	47
13.6 Алгоритм GAF	48

14	Объект исследования	50
15	О самом исследовании	51
16	Особенности данной БСС	52
17	Факторы, влияющие на разработку данной модели сенсорной сети	52
17.1	Отказоустойчивость	53
17.2	Масштабируемость	53
18	Алгоритмы сравнения мощностей	53
18.1	Расчет радиуса действия БСС для Zig Bee	56
18.2	Расчёт радиуса действия датчиков	57
18.3	Программная реализация в Python для алгоритма 3	59
19	Программы для моделирования	61
20	Модель расчёта потребления беспроводной сенсорной сети в режиме точка многоточие	69
21	Промежуточные выводы	78
	Заключение	79
	Перечень сокращений	81
	Список литературы	82
	Приложение А	84

## Введение

Сегодня телекоммуникационный мир меняется с очень высокой скоростью, и исследования беспроводных сенсорных сетей рассматриваются как одно из важнейших современных направлений развития технологий XXI века.

Многие проекты находятся в стадии разработки, а новые технологии в области производства беспроводной связи и прогресс в микроэлектромеханических системах (MEMS) позволили в пределах двух лет перейти на практическую разработку и внедрение нового класса распределенных коммуникационных систем - беспроводных сенсорных сетей.

Совершенствование, беспроводной связи и цифровой электроники позволили создать недорогие, маломощные многофункциональные беспроводные сенсорные сети на основе мотов (узлов), они достаточно маленького размера и «общаются» непосредственно друг с другом, отличаются низкой стоимостью, быстротой развертывания и эффективностью.

Основная идея БСС заключается в том, чтобы избежать прямого участия человека в сборе информации, например, из-за невозможности людей присутствовать в конкретном месте или во время осуществления технологического процесса, особенно когда необходимо собирать информацию в течение длительного времени. При использовании БСС пользователи могут исследовать явления и процессы, а также получать информацию, которая может быть как простой (измерение температуры), так и сложной (использование в военных районах).

Беспроводные сенсорные сети WSNs (Wireless Sensor Networks) получили широкое распространение и применяются в современном мире практически во всех сферах жизнедеятельности. Такие сети, состоящие из множества небольших узлов, оснащенных приемником-передатчиком, микропроцессором и датчиком, позволяют связать в реальном времени воедино глобальные компьютерные сети и физический мир.

Технология беспроводных сенсорных сетей, не смотря, на несовершенство, актуальна и перспективна на современном этапе, привлекает внимание ученых, научно-исследовательские институты, коммерческие организации, промышленность, многие проекты находятся в стадии разработки, разрабатываются новые сетевые технологии, внедряются новые продукты и создаются новые услуги, тем самым получая широкое применение в современном мире. И недалек тот день, когда сотни миллионов полупроводниковых сенсоров будут многофункциональными средствами автоматизации и внедряться будут во все, начиная от брелка и заканчивая детской коляской. Такие датчики будут образовывать единую беспроводную сенсорную сеть, выполнять первичную обработку данных, самовосстанавливаться, взаимодействовать друг с другом, выступать в роли самоидентификации, оснащаться маленькими аккумуляторами, которые

практически не будут потреблять электроэнергии, и их будет хватать на весь срок работы сенсоров.

Поэтому исследованиям в этой области посвящено достаточно много научных работ и статей А.Е. Кучеренко, К Yamasaki, Т. Н. Phuong и многих других. Так с развитием вычислительной техники и средств связи наступает эра беспроводных сетей и распределенных вычислений.

А многие компании, например, «Высокотехнологичные системы» предлагают свою аппаратно-программную платформу MeshLogic для построения беспроводных сенсорных сетей (сайт [www.meshlogic.ru](http://www.meshlogic.ru)).

#### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмов, создание новой БСС которую в последствие исследуем.

Для достижения заданной цели в работе решаются следующие задачи:

Разработка алгоритмов вычисления.

Выявляются возможности уменьшения количества мотов, используются более чувствительные датчики.

Исследуются сравнительные характеристики случайного и детерминированного методов размещения узлов сенсорной сети.

**Актуальность заключается**, конкретно в большой области применения БСС, и в исследованиях, которые проводятся на данный момент времени, а также проблеме проникновения на запрещённые участки квадрокоптеров, дронов и т.д.

#### **Новизна работы заключается:**

В работе были проанализированы БСС в алгоритмах, для противодействия малым беспилотным дронам, квадрокоптерам, в программе Python представлен код для обработки данных полученных с БСС, а также найдены модели потребления энергии.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении неизвестных ранее алгоритмов, а также в исследовании БСС работающих с этими алгоритмами.

**Практическая значимость работы** заключается в возможности использования полученных результатов в охранных системах безопасности, в защите военных объектов и объектов государственной важности не допускающих на свою территорию проникновение дронов и т.д.

#### **Методология и методы исследования**

Объектом исследования является: БСС которая выполняет функцию обнаружения квадрокоптера, дрона.

**Предметом исследования** являются БСС которая позволяет отслеживать квадрокоптеры и дроны при детерминированном и случайном размещении узлов на открытой местности.



### **Методы исследования.**

Моделирование в Matlab, эффективность вычисляется с применением математических формул для проверки датчиков на разных расстояниях при разных условиях. Использование программного обеспечения Excel.

**Публикации:** статья «Сенсорные сети для обнаружения БПЛА на определенных зонах» в Научно-аналитическом журнале «Высшая школа Казахстана» №4 за ноябрь 2019 года.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертационная работа включает в себя содержание, введение, основная часть, заключение, список использованной литературы насчитывает 31 наименование, перечень сокращений, приложение - 3, работа содержит 81 страницу, 31 рисунок и 9 таблиц.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

**Во введении** обосновывается актуальность диссертации, рассматривается состояние исследуемой проблемы, формируются цель и задачи диссертации, обобщаются основные научные результаты диссертации, определяется научная новизна и практическая ценность результатов, описываются область применения и основные положения для бортовой работы, приводятся сведения, испытательные работы, публикации по теме, описывается структура диссертации, её объем.

**С первого по тринадцатый** пункт диссертационной работы приводятся и анализируются основные характеристики современных БСС, описаны места, где реализуются БСС, представлены положительные и отрицательные стороны этих сетей.

Проведено сравнение алгоритма прямой передачи и наиболее известных алгоритмов кластеризации LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy), SEP (Stable Election Protocol), DEEC (Distributed Energy Efficient Clustering) и TEEN (Threshold-sensitive Energy Efficient Protocol). Также проведено сравнение алгоритмов для однородных, двухуровневых и многоуровневых гетерогенных сенсорных сетей.

**С четырнадцатого по восемнадцатый пункт** посвящены разработке алгоритмов обнаружения квадрокоптеров для БСС, а также их особенностям.

В беспроводных сенсорных сетях (БСС) с кластерной архитектурой узлы кластера играют ключевую роль в процессе работы сети и маршрутизации данных. Естественно, что любые сбои в функционировании этих важных узлов влияющих на качество услуг и надежность сети, даже могут привести к выходу из строя сеть в целом.

Отказоустойчивость является одной из ключевых проблем при проектировании и эксплуатации беспроводных сенсорных сетей. Отказ некоторых узлов в БСС практически неизбежен по следующим причинам: аппаратный сбой, истощение энергии, сбой программного обеспечения, ошибки связи, вредоносные атаки и т. д.

Эффективность вычисляется математически на разных расстояниях при разных условиях.

Дана оценка и сравнительный анализ энергопотребления датчиков БСС на основе широко используемых алгоритмов маршрутизации и самоагрегации для БСС со стационарными узлами на плоскости.

Сравнение энергопотребления алгоритмами осуществляется на основе результатов моделирования на базе MATLAB. В качестве показателей для сравнения используется продолжительность 2000 раз переданной или принятой информации за стабильный период работы сенсорной сети.

Также исследуется охват, связность и плотность беспроводных сенсорных сетей.

В заключении приводятся основные результаты диссертационной работы.

Дополнительные материалы приведены в приложениях.

## **1 Беспроводные сенсорные сети их применение**

БСС - (wireless sensor networks) состоят из миниатюрных вычислительно-коммуникационных устройств - мотов (*от англ. motes - пылинки*), или сенсоров.

Мот - это небольшая плата, размером обычно не более одного кубического дюйма. На ней размещаются процессор, флэш-память оперативная, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и датчики. Работают моты от небольшого аккумулятора и используют их только для сбора, обработки первичной информации и передачи сенсорных данных.

Датчики могут быть разнообразными за счет подключения с помощью цифровых и аналоговых разъемов.

Набор используемых датчиков зависит от функций, выполняемых БСС. Датчики температуры, давления, влажности, света и вибрации используются чаще, тогда как магнитоэлектрические, химические (например, измерение содержания CO, CO<sub>2</sub>), звук и некоторые другие используются реже.

Сенсорные сети, которые основанные на сотрудничестве большого количества крошечных узлов, и которые состоят из модулей сбора и обработки данных, передатчика имеют существенные преимущества перед набором традиционных датчиков.

Рассмотрим две основные особенности этих датчиков:

- возможность датчиков быть расположенными вдали от наблюдаемого явления. При таком подходе требуется множество датчиков, которые используют сложные приемы, чтобы изолировать цель от шума;

- возможность разворачивать несколько датчиков, они же и собирают данные и передают наблюдения центральным узлам, где эти данные собираются и обрабатываются.

Сенсорная сеть состоит из большого количества узлов (мотов), которые плотно расположены вблизи наблюдаемого явления. Положение шпинделей не нужно заранее вычислять. Это позволяет их случайным образом размещать

в труднодоступных районах или использовать для облегчения операций, требующих быстрого реагирования. Рассматривая с другой стороны, сетевые протоколы и алгоритмы, мотосистема должна иметь возможность самоорганизации.

Еще одна уникальная особенность сенсорных сетей - способность отдельных узлов работать вместе. Поскольку мот оснащен процессором, то вместо передачи первичных данных они могут сразу обрабатывать данные, выполняя простые вычисления, а затем передавать, обработанные и только необходимые.

Что же отличает БСС от обычных вычислительных (проводных и беспроводных) сетей:

- полное отсутствие электрических, коммуникационных кабелей и т.д.;
- возможность компактного размещения или даже внедрение мотов в объекты окружающей среды;
- надежность функционирования как отдельных элементов, так и, что более важно, всей системы в целом; в ряде случаев сеть может функционировать при исправности только 10-20% сенсоров (мотов);
- отсутствие необходимости в персонале для монтажа и технического обслуживания.

БСС - можно сказать, что это новый шаг на пути перехода в следующую эпоху, в будущем БСС станут важной частью нашей жизни, даже больше чем современные персональные компьютеры. И для воплощения этих или других проектов, требующих применение БСС, требуются специальные методы.

Для традиционных беспроводных одноранговых сетей было разработано много протоколов и алгоритмов, поэтому они не очень подходят к уникальным особенностям и требованиям сенсорных сетей.

Вот различия между сенсорной и одноранговой сетью:

- в сенсорной сети количество узлов может быть на несколько порядков больше, чем количество узлов в одноранговой сети;
- плотное расположение узлов;
- склонность узлов к сбоям;
- может часто меняться топология сенсорных сетей;
- в основном узлы используют широковещательные сообщения, тогда как большинство одноранговых сетей базируются на точечной связи;
- ограничение узлов по мощности, памяти и вычислительной мощности;
- из-за большого количества датчиков и накладных расходов узлы не могут иметь глобальный идентификационный номер (IN).

Поскольку узлы сети расположены плотно, соседние узлы могут быть очень близко друг к другу. Поэтому соединение с несколькими скачками в сенсорных сетях будет потреблять меньше энергии, чем прямые. Кроме того, можно использовать сигнал передачи данных низкой мощности, что полезно в скрытых наблюдениях. Многоканальные коммуникации могут эффективно преодолеть некоторые затруднения при передаче сигнала на большие

расстояния в беспроводном соединении. Одно из важнейших ограничений для узлов - это низкое энергопотребление. Моты имеют ограниченные источники энергии.

Традиционные сети направлены на достижение высокого качества сигнала, тогда как сетевые протоколы мотов должны ориентироваться преимущественно на энергосбережение. Тогда мот должен иметь механизм, который позволит пользователю продлить срок службы, путем уменьшения пропускной способности или увеличения задержки передачи данных. Сейчас многие исследователи участвуют в разработке схем, соответствующих этим требованиям. Тем самым обеспечивая широкий спектр применения для сенсорных сетей.

БСС получили большое развитие, и могут использоваться во многих областях:

- в области обороны и обеспечении безопасности;
- осуществлять контроль окружающей среды;
- в промышленности, мониторинг промышленного оборудования;
- в охранных системах;
- в сельском хозяйстве, мониторинг состояния сельскохозяйственных угодий;
- в управлении энергоснабжением;
- в контроле систем вентиляции, кондиционирования и освещения;
- в пожарной сигнализации;
- в складском учете;
- в слежении за транспортировкой грузов;
- в области здравоохранения, контроль физиологического состояния человека и т.д.;
- в контроле персонала.

### **1.1 Применение в области обороны и безопасности**

БСС за счет быстрого развертывания, самоорганизации и отказоустойчивости являются неотъемлемой частью систем военного управления, связи, разведки, наблюдения, ориентации. Плотное размещение одноразовых и дешевых узлов позволяет во время военных действий при выходе некоторых из строя не влиять на ход операции, как разрушение традиционных датчиков. Поэтому с важностью можно сказать, что использование сенсорных сетей лучше подходит для ведения военных действий, обнаружение ядерных, биологических и химических атак, наблюдение за оружием и боеприпасами противника, наблюдение за боем, ориентация на местности.

Руководителям и командирам можно постоянно следить за состоянием своих войск, состоянием и наличием техники и боеприпасов во время военных действий и давать своевременную оценку ущербу от боев. А прикрепив датчики к каждой машине, оборудованию и важным боеприпасам, можно узнать об их состоянии, эти данные собираются вместе в ключевых узлах и

передаются на верхние уровни командной иерархии для объединения с другими данными.

Подробные и своевременные данные о силах противника, местности, наведение интеллектуальных боеприпасов, оценка критических областей могут быть собраны в течение нескольких минут, что позволит выиграть время, прежде чем враг сможет их перехватить.

Своевременное развертывание в любое время и в критических районах для наблюдения за ходом военных действий, изучения активности вражеских сил, при применении химического или биологического оружия, применение которого близко к нулю, позволит собрать за короткое время данные, выявить химические агенты, тем самым помогут сократить число жертв.

Применение сенсорных сетей для проведения рекогносцировки в случае радиационных инфекций позволит не подвергать людей воздействию.

## **1.2 Применение в области здравоохранения**

Применение таких сетей в здравоохранении также разнообразно - это устройства для инвалидов, диагностика, сбор физиологических данных о человеке, контроль пациентов и персонала, мониторинг использования лекарств в больницах.

Например, состояние пациента может контролироваться врачом удаленно, это удобно для пациента, и позволяет врачу понять их состояние и оказать своевременную помощь.

Обработанные сенсорными сетями данные, могут использоваться для медицинских исследований, и содержать информацию в течение длительного периода времени. Установленные сетевые узлы также могут отслеживать перемещение пожилых людей и, например, предотвращать падение. Эти узлы небольшие и позволяют пациенту большую свободу передвижения, в то же время, позволяя врачам заранее выявлять симптомы заболевания. Кроме того, они помогают обеспечить пациентам более комфортную жизнь по сравнению с лечением в стационаре. Чтобы проверить возможность такой системы, на медицинском факультете Гренобль-Франция был создан "здоровый Умный дом". Наблюдение за врачами и пациентами в больнице: каждый пациент имеет небольшой и легкий сетевой узел. У каждого узла есть своя специфическая задача. Например, следить за частотой сердечных сокращений, а другой принимает показания артериального давления. Врачи также могут иметь такой узел, это позволит другим врачам найти их в больнице.

Компьютеризированные системы в больницах позволят свести к минимуму побочные эффекты ошибочной доставки лекарств. Можно прикрепить узлы к лекарствам, тогда вероятность выдачи неправильного лекарства может быть сведена к минимуму. У пациентов тоже могут быть узлы определяющие аллергию на необходимые лекарства.

## **1.3 Применение в быту**

Применение в домах - это полная или частичная автоматизация дома.

Про автоматизацию дома можно сказать, что интеллектуальные узлы могут быть вставлены в детские кроватки для того чтобы слышать дыхание младенцев, следить за состоянием здоровья, бытовые приборы, такие как пылесосы, микроволновые печи, холодильники и видеомониторы.

Они могут общаться друг с другом и с внешней сетью через интернет или спутник. Все это позволит пользователям легко управлять устройствами как дома локально, так и удаленно.

Используя сенсорные сети для управления электроснабжением, можно достичь экономии в электроэнергии. То есть датчики будут отслеживать ваше местонахождение и тем самым выключать и включать свет.

Интеллектуальная среда: может иметь два различных подхода, ориентирована на человека или ориентирована на технологию. В случае первого подхода интеллектуальная среда должна приспособиться к потребностям конечных пользователей в плане взаимодействия с ними. Для технологически ориентированных систем следует разрабатывать новые аппаратные технологии, сетевые решения и дополнительные приложения. Описаны примеры использования узлов для создания интеллектуальной среды. Узлы могут быть встроены в мебель и бытовую технику, они могут взаимодействовать друг с другом и с сервером помещения. Сервер комнат также может взаимодействовать с другими серверами комнат, чтобы узнать об услугах, которые они могут предложить, таких как печать, сканирование и отправка факсов. Эти серверы и сенсорные узлы могут быть встроены в существующие устройства и формировать самоорганизующиеся, саморегулирующиеся и адаптивные системы, основанные на модели теории управления.

#### **1.4 Применение в экологии**

Наибольшее распространение беспроводные сенсорные сети получили в области мониторинга окружающей среды и живых существ. Доказано, что они обеспечивают лучшее понимание окружающей среды, могут помочь определить тип, концентрацию метеорологических или геофизических исследований, химическое, биологическое обнаружение, расположение загрязняющих веществ, обнаружить наводнения, посторонние химические агенты в воздухе и воде.

Поскольку мот может быть стратегически и плотно развернут в лесу, то они могут передавать точное обнаружение и происхождение пожара до того, как огонь станет неконтролируемым.

В сельском хозяйстве в режиме настоящего времени возможен контроль загрязнения воздуха, состояния почвы, эрозии, уровня пестицидов в воде в зависимости от меняющихся условий регулируется полив и количество вносимых удобрений.

В экологии сенсорные сети используются для отслеживания движения птиц, мелких животных и насекомых.

Миллионы датчиков могут быть развернуты на постоянной основе. Их можно оборудовать солнечными панелями, потому что узлы могут оставаться без присмотра месяцами или даже годами. Моты будут работать вместе, чтобы выполнять распределенные задачи зондирования и преодолевать препятствия, такие как деревья и камни, которые блокируют проводные датчики. Отражение био состояния окружающей среды требует сложных подходов к распознаванию информации во временном и пространственном масштабах, но благодаря современным технологиям, достижениям в области сбора информации об объектах и явлениях и автоматизированного сбора данных, все это позволило значительно сократить затраты на исследования.

Преимущество этих сетей заключается в том, что узлы могут быть подключены к Интернету, что позволяет удаленным пользователям контролировать, и наблюдать за окружающей средой. Хотя спутниковые и бортовые датчики полезны для наблюдения за широким разнообразием видов, таких как пространственная сложность доминирующих видов растений, они не позволяют наблюдать за мелкими элементами, которые составляют большую часть экосистемы. В таких случаях возникает необходимость в развертывании узлов БСС в полевых условиях. Одним из примеров применения является создание биологической карты окружающей среды в природном заповеднике в Южной Калифорнии. Три секции покрыты сеткой, каждая из которых имеет 25-100 узлов, используемых для постоянного мониторинга состояния окружающей среды. Пример системы обнаружения наводнений и предупреждение о них в США. Несколько типов датчиков, расположенных в системе оповещения, определяют уровень осадков, уровень воды и погоду.

Исследовательские проекты, такие как проект базы данных устройств COUGAR в Корнельском университете и проект DataSpace в Университете Рутгерса, изучают различные подходы к взаимодействию с отдельными узлами сети для получения моментальных снимков и долгосрочного сбора данных. [16]

## **2 Платформы и влияние факторов на работу БСС**

Существует несколько различных платформ, которые отвечают основным базовым требованиям, малая потребляемая мощность, длительное время работы, маломощные приемо-передатчики и наличие сенсоров, но четкая стандартизация отсутствует. К основным платформам относят MicaZ, Intel Mote 2, TelosB.

Разработка сенсорных сетей зависит от многих факторов, все эти факторы важны, поскольку служат в качестве ориентира для разработки протокола или алгоритмов работы сенсорных сетей. Они включают в себя - отказоустойчивость, масштабируемость, издержки производства, вид операционной среды, топологию сенсорной сети, аппаратные ограничения,

модель передачи информации и потребление энергии, хотя на разработку сенсорной сети ни в одном исследовании они полностью не учтены.

Рассмотрим эти факторы для сравнения в различных моделях.

Таблица 2.1- Сравнение узлов разных производителей

Название	MicaZ	TelosB	Intel Mote 2
Микропроцессор	Atmel ATmega128L	MSP430 F1611	PXA271 XScale
Частота	7.37 МГц	8 МГц	320/416/520 МГц
Флеш-памяти	128 Кб	48 Кб	32 Мбайта
ОЗУ	нет	нет	32 Мбайта
Доп. память для данных	4 Кб SRAM	10 Кб RAM	нет
UART's	2	1	нет
Шины	SPI, I2C	SPI	Mini-USB интерфейс
Радио	ChipCon CC2420	ChipCon CC2420	ChipCon CC2420
Внешняя флеш-память	512 Кб	1024 Кб	нет
Дополнительный коннектор	51-pin	16-pin	I-Mote2 коннектор для внешних устройств (31+21 pin)
Аналоговых I/O	восемь 10-битовых	Встроенный 12-битовый ADC/DAC	нет
Цифровых I/O	21		нет
Программируемых LEDs	3	3	2
JTAG порт	да	да	нет
Питание	две батареи AA	две батареи AA	три батареи AA



Рисунок 2.1 - Типичный узел MicaZ





Рисунок 2.2 - Плата Intel Mote 2

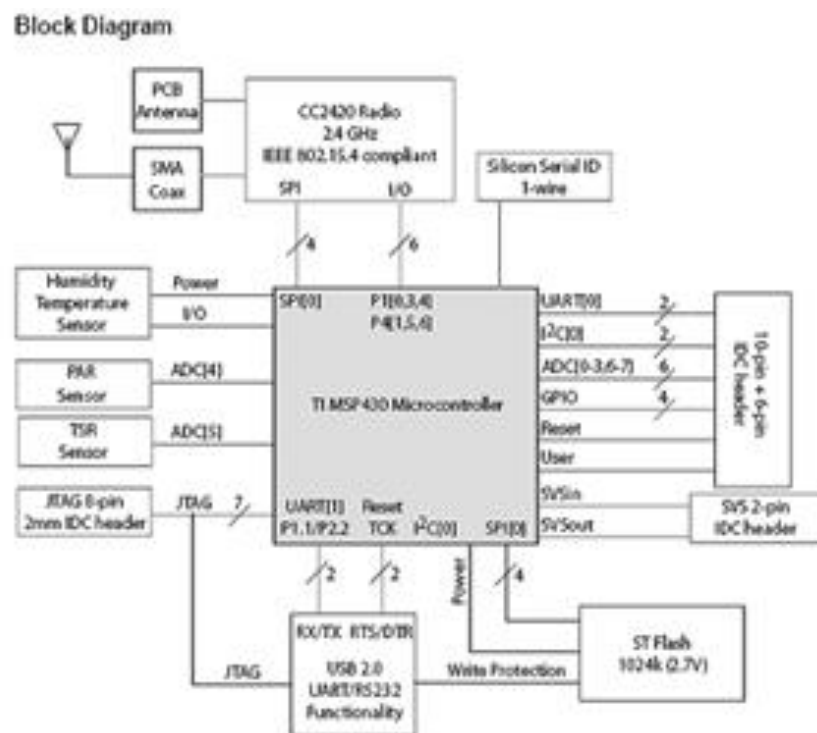


Рисунок 2.3 - Типичная схема узла TelosB

Для беспроводных сетей с маломощными приемниками и передатчиками был специально разработан основной стандарт ИЕЕ 802. 15.4, а на программное обеспечение, стандартов не существует, но существует несколько сотен различных протоколов обработки и передачи данных, а также систем управления узлами.

Наиболее распространенной операционной системой является система с открытым исходным кодом под названием TinyOs. Многие разработчики часто пишут свою собственную систему управления, на языке Java. Программа управления сенсорными узлами, работающая в операционной системе TinyOs, написана на языке nesC.

Одним из первых прототипов сенсорной сети является система SOSUS, предназначенная для обнаружения и идентификации подводных лодок. В середине 1990-х годов технология беспроводных сенсорных сетей начала активно развиваться, а в начале 2000-х годов развитие микроэлектроники позволило изготовить достаточно дешевую элементную базу для таких устройств. Беспроводные сети в начале 2010-х годов в основном базируются на стандарте ZigBee.[6]

С развитием микроэлектронных технологий возникают новые практические и теоретические проблемы, связанные с использованием сенсорных сетей, растет количество потребителей, многие отрасли и сферы деятельности (промышленность, транспорт, жилищно-коммунальное хозяйство, безопасность) заинтересованы во внедрении этих сетей. Кроме того усложняется технологический процесс, развивается производство у отдельных лиц растут потребности в сегментах безопасности, необходим контроль использования ресурсов и запасов.

Гибкая Архитектура, позволение подключать до 65 000 узлов, снижение затрат на установку, отличают такие сети интеллектуальных датчиков от других беспроводных и проводных интерфейсов передачи данных, особенно когда речь идет о большом числе подключенных модулей.

Увеличивающееся количество, снижение стоимости, повышение эксплуатационных параметров БСС позволяют незаметно переходить от проводных решений до систем сбора телеметрических данных, удаленной диагностики и обмена информацией.

«Сенсорная сеть» - это устоявшийся термин (англ. Сенсорные сетки), что обозначает распределенную, самоорганизующуюся, отказоустойчивую сетку из отдельных элементов необслуживаемых и не требующих специального монтажа устройств. Каждый узел сенсорной сети может содержать различные датчики для мониторинга окружающей среды, микрокомпьютер и радиопередатчик. Это позволяет устройству выполнять измерения, самостоятельно обрабатывать исходные данные и осуществлять связь с внешней информационной системой.

## **2.1 Энергия БСС**

Как мы уже отмечали выше, наиболее широко БСС используются в области мониторинга, исследования окружающей среды и живых существ, а также в военной промышленности. Каждый узел датчика собирает данные и передает их на шлюзы или базовые станции (БС) непосредственно сам, либо через другие узлы датчика.

Сенсорные узлы обычно имеют ограниченные возможности питания и восстановления. Поэтому при создании БСС выбор способа организации передачи информации между сенсорным узлом и шлюзами или базовыми станциями является одной из основных проблем. Беспроводные сенсорные узлы (BCS) потребляют энергию для передачи, обработки сообщений и

вычислений. Продление срока службы сенсорного узла напрямую зависит от срока службы обычной батареи, которые довольно часто используются. Энергия, потребляемая при передаче сообщений, может составлять до 75% от имеющегося энергетического ресурса. При этом должны быть решены задачи по отправке сообщений и их маршрутизации. Сенсорная сеть, может включать в себя тысячи узлов, ее ещё называют сенсорным полем. Согласно спецификациям протокола ZigBee, сенсорная сеть может содержать до 64 000 узлов. Как мы уже отмечали выше, БСС имеет ограниченные ресурсы: ограниченный источник питания, малую память, низкую скорость передачи данных и так далее. Они в свою очередь непосредственно влияют на разработку протоколов и алгоритмов, используемых в БСС. Мы уже разобрались, что, разработанные алгоритмы для БСС должны продуктивно работать на очень ограниченных аппаратных ресурсах. В то же время большую часть времени сенсорные узлы находятся в спящем состоянии, что требует использования самоорганизующихся сетевых принципов для функционирования БСС.

Наблюдается тенденция к бережному использованию ресурсов к экономии во многих сферах жизни общества: природных, человеческих, технологических, промышленных и др.

Появление многочисленных исследований на тему зарядки электронных устройств от альтернативных возобновляемых источников энергии обусловлено рядом факторов:

- широкое применение получили беспроводные сенсорные сети, и этот фактор является наиболее значимым, по мнению экспертов.
- снижение энергопотребления микроконтроллеров.

### **2.1.1 Технология заимствования энергии**

В зарубежной литературе существует специальный термин «сбор энергии», используемый для обозначения преобразования возобновляемой энергии из окружающей среды в электрическую энергию. Официального перевода этого термина на русский язык не существует.

Существуют различные способы обозначения этой технологии, например, «сбор энергии», но в будущем вместо термина «заимствование энергии» будет использоваться термин «сбор энергии».

Заимствование энергии - это возможность повысить энергоэффективность БСС, надежность путем преобразования энергии окружающей среды в электрическую энергию, которую потом можно использовать для нужд узла этой сети.

Таким образом, устройства с возможностью заимствования энергии из окружающей среды могут заменить сложные аккумуляторы там, где потребление электроэнергии низкое, а это означает, что они не только генерируют, но и экономят электроэнергию.

Технологии в направлении заимствования энергии, бурно развиваются, и микроконтроллеры, компоненты сенсорных сетей, могут быть подключены

к специализированным модулям, которые забирают энергию из окружающей среды (рис 2.4, 2.5, 2.6).



Рисунок 2.4 - ECO 200 - Motion Energy Harvesting



Рисунок 2.5 - ECT 310 Perpetuum - Thermo Energy Harvesting. Тепловой преобразователь для модулей сенсорной сети



Рисунок 2.6 - ECS 300/ ECS 310 - Solar cells

В случае большого количества узлов с энергоемкими модулями, выясняем какую энергетическую выгоду, дает использование альтернативных источников энергии, и при каком количестве узлов будет взята достаточная энергия для простых операций, а также будет покрыта стоимость приобретенных модулей, создающих энергию.

Основные методы заимствования Энергии основаны на преобразовании световой, кинетической энергии, энергии разности температур среды и источника тепла в электрическую или «полезную» энергии.

Проведем оценку уровней энергии в  $\text{мкВт}/\text{см}^2$  и с помощью таблицы 2.1. рассмотрим каждый из способов заимствования Энергии.

Помимо стандартных общепризнанных методов, развивается метод получения электрической энергии из высокочастотного излучения.

Таблица 2. 2- Методы заимствования энергии окружающей среды

Метод заимствования	Значение	Единица измерения
Вибрации/перемещения человека (в ГЦ диапазоне)	4	мкВт/см <sup>2</sup>
Вибрации/перемещения промышленных систем (в кГц диапазоне)	800	мкВт/см <sup>2</sup>
Изменение температуры человека	60	мкВт/см <sup>2</sup>
Изменение температуры промышленных систем	1-10	мкВт/см <sup>2</sup>
Световое излучение наружное	10000	мкВт/см <sup>2</sup>
Световое излучение в помещении	100	мкВт/см <sup>2</sup>
GSM (900 МГц)	0,1	мкВт/см <sup>2</sup>
WiFi (2,4 ГГц)	0,001	мкВт/см <sup>2</sup>

Исследованием наличия возможности подзарядки от окружающей среды и разработкой систем стандартов занимаются многие крупные компании, например, EnOcean уже выпустила 3 поколения систем, поддерживающих заимствование Энергии.

### 2.1.2 Заимствование от солнечного света

Кремниевая солнечная батарея используется для заимствования энергии из солнечного света. С её помощью можно получить напряжение до 0,6 В, коэффициент полезной мощности (отношение средней полученной мощности к мощности, которую можно получить при постоянном преобразовании солнечной энергии) составляет 15-20%. Аккумуляторы также могут быть изготовлены на органических материалах и оптических волокнах на основе сенсibilизированных красителей (Dye-sensitized solar cells, DSSC).

Величина генерируемого тока зависит от интенсивности падающего света. Срок службы батареи колеблется от 1 до 5 лет. Преимущества его использования - низкая стоимость, прозрачность и низкий уровень освещенности.

Среди компаний и исследовательских центров, занимающихся разработкой технологий для солнечных панелей, можно выделить: Konarka Technologies ( США), Advanced Industrial Science and Technology, ASIT.

Silicon lab разработала чрезвычайно маломощный узел беспроводной сенсорной сети, который заимствует и преобразует солнечную энергию, демонстрируя, что это решение удобно для приложений беспроводной

сенсорной сети. Заимствование энергии окружающей среды в беспроводной сети особенно важно, когда батареи узлов трудно заменить или имеют высокую стоимость.

Узел, заимствующий солнечную энергию, например, продукт Silicon lab, состоит из чипа серии MCUs Si10xx, который выполняет управление и поддерживает функции беспроводного интерфейса на уровнях, требующих низкого энергопотребления. А наличие дополнительного входного источника позволяет получать энергию от других альтернативных источников энергии, (радиочастотное излучение, вибрации и др.), на этапе управления энергией, когда солнечные батареи не заряжены или доступ к ним в данный момент невозможен.

С помощью микроконтроллера Si1012 с приемопередатчиком на рис. 2.7 показан процесс заимствования солнечной энергии, в узле БСС.

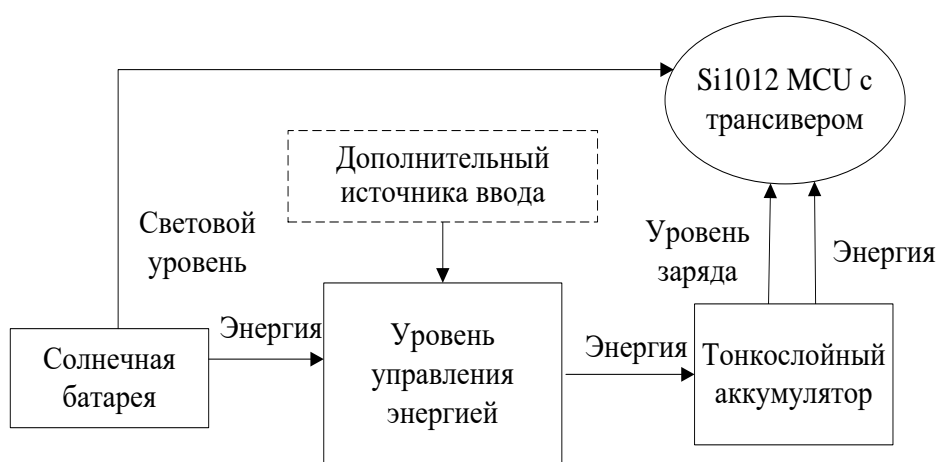


Рисунок 2.7 - Схема заимствования энергии с помощью Si1012 MCU с использованием трансивера

Предлагаемая схема может быть применена в следующих областях:

- охранная система;
- автоматизированная сеть зданий;
- система телемедицины;
- промышленных сенсорных сетях;
- инфраструктурных сенсорных системах;

Преимущества:

- для удобной передачи данных и последующей обработки - наличие интерфейса USB;
- заимствование энергии у различных источников благодаря гибкой структуре.

### 2.1.3 Заимствование от вибрации

В области заимствования энергии от вибрации на рынке до сих пор нет полноценных систем для сбора этой энергии, разные компании

предлагают только частичные решения, например платы LTC3105 и LTC 3109.

Компания Perpetuum на выставке Energy Harvesting & Storage Europ продемонстрировали беспроводный датчик вибрационного энергетического комбайна(VEH). VEH не требует дополнительного технического обслуживания, идеально подходит для установки на вращающиеся детали, такие как подшипники колес поезда и выполняет несколько функций (измерение температуры, передача измеренных данных оператору, выработка необходимого электричества от механических колебаний), помимо заимствования энергии датчик мгновенно обнаруживает критическое повышение температуры в подшипниках, тем самым предотвращая масштабный ремонт.

Cherry Energy Harvesting, предлагает беспроводной коммутатор, который генерирует достаточно электроэнергии для передачи сигнала включения или короткого реле. Расстояние, на которое сигнал может быть передан за счет вырабатываемой энергии, зависит от рабочей частоты. Для передачи на 10 метров используется частота 2,4 ГГц, для передачи на 300 метров - частота 868 МГц. Мощность, генерируемая нажатием кнопки, может достигать 0,5 МВт.

Дополнительные возможности беспроводного коммутатора сбора энергии включают работу в составе беспроводных сенсорных сетей (для этого коммутатор имеет уникальный код, что исключает ложное срабатывание), функцию «сообщения», что позволяет использовать несколько коммутаторов для одного приемника или наоборот.

Компания MicroGen System разработала и практически готова к массовому производству первых модулей типа piezo-MEMS, которые предназначены для энергопитания различных приборов. А если их еще и прикрепить к какому-то источнику постоянной вибрации (столб, стена завода, бытовые приборы, рельсы на дорогах и т. д.), то он будет постоянно вырабатывать небольшой ток, которого может оказаться достаточно для питания одной какой-то микросхемы или же светодиода. Этот слабый ток можно накапливать и преобразовывать с помощью вот этих же микросхем LTC3105 и LTC 3109 в более высокое напряжение, тем самым полностью заменяя аккумуляторы или другого типа элементы питания.

Wibrate специальный Консорциум, который был создан для объединения разработчиков промышленных систем, работающих на основе независимого превращения энергии вибрации в электрическую энергию. К таким системам относятся беспроводные промышленные системы мониторинга и управления. Perpetuum является частью консорциума Wibrate.

#### **2.1.4 ZigBee Green Power**

Альянс ZigBee, активный разработчик стандартов и решений для беспроводных сенсорных сетей, объявил в 2009 году о своем решении выпустить стандарт Zigbee Green Power (GP) для устройств с собственными

альтернативными источниками питания, основанными на технологии заимствования энергии. Основываясь на стандарте ZigBee GP, в 2014 году NXP Laboratories, Великобритания выпустила Руководство по использованию стандарта Zigbee Green Power (GP) при работе с микроконтроллерами серии NXP jn516x. Zigbee Green Power (GP) - это дополнительный кластер, целью которого является минимизация потребляемой энергии сетью. Это может быть достигнуто путем:

-использования более короткого формата кадров GP и, следовательно, меньшего времени передачи, чем в случае кадров ZigBee стандартного формата IEEE 802.15.4, что позволяет экономить энергозатраты на передачу;

-узлы не обязательно должны быть полноценными компонентами беспроводной сенсорной сети, возможно, что узлы передают данные только в случае необходимости (например, если вы нажали специальную кнопку).

Кадр GP относится к прокси-узлу, который является компонентом сенсорной сети и оснащен «туннелем», который преобразует кадр GP в обычный формат кадра ZigBee для повторной передачи в сенсорную сеть.

Кластер GP не нуждается в исходном узле, но должен взаимодействовать как с прокси-узлом, так и с дренажем, чтобы получить интерпретируемые кадры GP. Базовый алгоритм стандарта GP ZigBee показан ниже (Рис. 2.8), где Кадр 1-это кадр GP, а Кадр 2-туннелированный кадр GP.

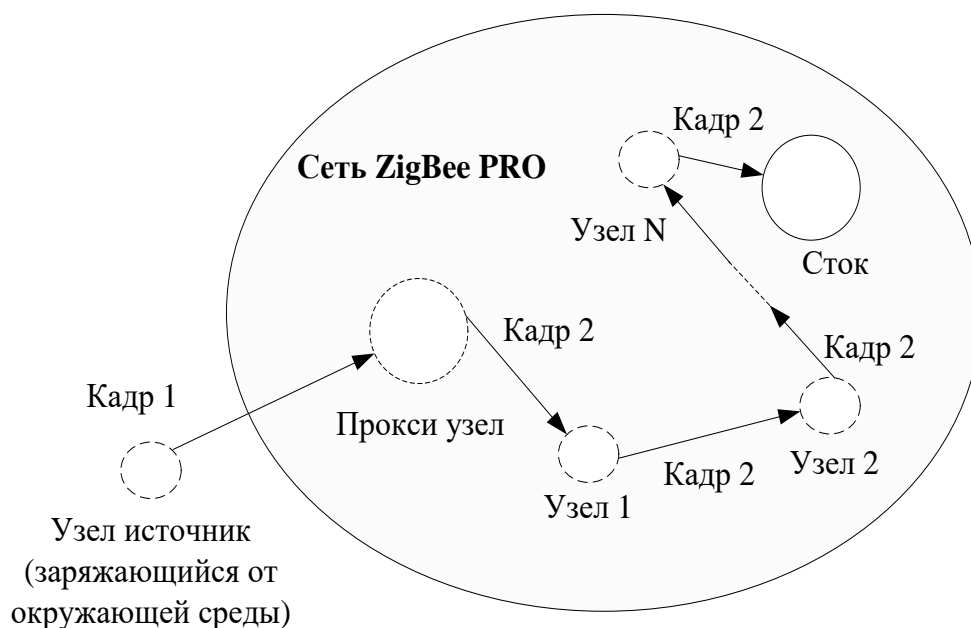


Рисунок 2.8 - Базовый механизм ZigBee GP

Преимущества использования ZigBee GP заключаются в следующем:

- подходит для узлов, расположенных с возможностью поддержания работы;



-возможность использования узлов, основные источники энергии при которых, батареи должным образом не защищены или недоступны, а также использование изолированных узлов или узлов, расположенных опасно;

-использование возобновляемых источников энергии узлами;

-возможность устранения потребности в батарее в узлах сенсорной сети, коллективное поддержание работоспособности, потребление и восстановление энергии;

- дешевая, быстрая и простая установка выходных узлов;

Дано определение заимствования энергии или технологии сбора энергии, что позволяет превращать возобновляемую энергию из окружающей среды в электрическую. Рассмотрены различные методы заимствования энергии и их характеристики, а также показаны преимущества заимствования энергии на примере стандарта Zigbee Green Power.

Таким образом, можно сказать, что для оснащения сенсорной сети возможностью заимствования энергии из окружающей среды предлагаются как готовые решения (например, Silicon Lab), так и стандарты для создания пользовательских модулей для заимствования энергии из окружающей среды. Можно выделить Zigbee Alliance которая разработала специализированный стандарт Zigbee Green Power standard для дополнения стандартной сети возобновляемыми источниками энергии. Ну, а в качестве областей применения данной технологии, чтобы повысить энергетический потенциал сенсорной сети можно рассмотреть разработку энергонезависимых модулей для БСС.

### **3 Отказоустойчивость**

Отказоустойчивость – это возможность технической системы поддерживать работоспособность при выходе или отказе одного из узлов. Отказ узла не должен влиять на работу сенсорной сети, иначе даже небольшая ошибка может привести к полной поломке.

Надежность РК (t) или отказоустойчивость узлов моделируется с использованием распределения Пуассона для определения вероятности отсутствия отказа узлов за период времени (0; t) отметим, что протоколы и алгоритмы могут быть ориентированы на уровень отказоустойчивости, необходимый для построения сенсорных сетей. Если среда, в которой расположены узлы, менее восприимчива к помехам, то протоколы могут быть менее отказоустойчивыми [21]. Например, если узлы встроены в дом для контроля уровня влажности и температуры, то требования к отказоустойчивости могут быть низкими, так как эти типы сенсорных сетей не могут выйти из строя и «шум» окружающей среды не влияет на их работу.

С другой стороны, если узлы используются на поле боя для наблюдения, то отказоустойчивость должна быть высокой, так как наблюдения критические и узлы могут быть уничтожены во время военных действий. В

результате уровень отказоустойчивости зависит от применения сенсорных сетей, и модели должны разрабатываться с учетом этого [21].

#### **4 Масштабируемость**

Масштабируемость – это способность системы справляться с увеличением рабочей нагрузки, тем самым увеличивать свою производительность за счет добавления ресурсов.

Число узлов, развернутых для изучения явления, может быть порядка сотен или тысяч. В зависимости от программы это число может достигать экстремальных значений (миллионов). Новые модели должны быть способны работать с таким количеством узлов. Они также должны использовать высокую плотность сенсорных сетей, которая может варьироваться от нескольких узлов до нескольких сотен на участке, который может быть менее 10 м в диаметре [21].

#### **5 Расходы на производство**

Поскольку сенсорные сети состоят из большого количества узлов, стоимость каждого узла должна быть такой, чтобы оправдать общую стоимость сети. Если стоимость сети выше, чем при развертывании традиционных датчиков, то это экономически не оправдано. В результате стоимость каждого узла должна быть невысокой. Теперь стоимость узла, использующего передатчик Bluetooth, составляет менее 10 долларов. Цена на PicoNode составляет около 1\$. Таким образом, стоимость узла сенсорной сети должна быть значительно меньше 1\$ для экономического обоснования их использования. Стоимость узла Bluetooth, что считается дешевым устройством, в 10 раз превышает средние цены на узлы сенсорной сети.

Стоимость узла является сложным вопросом, имеет некоторые дополнительные модули, такие как модуль сбора данных и модуль обработки, кроме того, они могут быть оснащены системой определения местоположения или электрогенератором, в зависимости от применения сенсорных сетей, учитывается количество функциональных возможностей даже при стоимости меньше 1\$,

#### **6 Аппаратные особенности**

Узел сенсорных сетей состоит из четырех основных компонентов (рис. 6.1):

- блок ввода данных;
- вычислительное устройство;
- блок питания;
- передатчик.

Наличие дополнительных модулей зависит от применения сетей, например, могут быть модули определения местонахождения, силовой генератор и мобилизатор (МАС).

Модуль сбора данных, как правило, состоит из двух частей: датчика и аналого-цифровых преобразователей (АЦП).

Аналоговый сигнал, генерируемый датчиком на основе наблюдаемого явления, преобразуется в цифровой сигнал с помощью АЦП, а затем отправляется в блок обработки. Модуль обработки, который использует объединенную память, управляет процедурами, и позволяет совместно с другими узлами выполнять поставленные задачи наблюдения. Блок передатчика (трансивер) соединяет узел с сетью. Все же одним из наиболее важных компонентов узла является блок питания. Он может иметь возможность подзарядки, например, используя солнечные батареи.

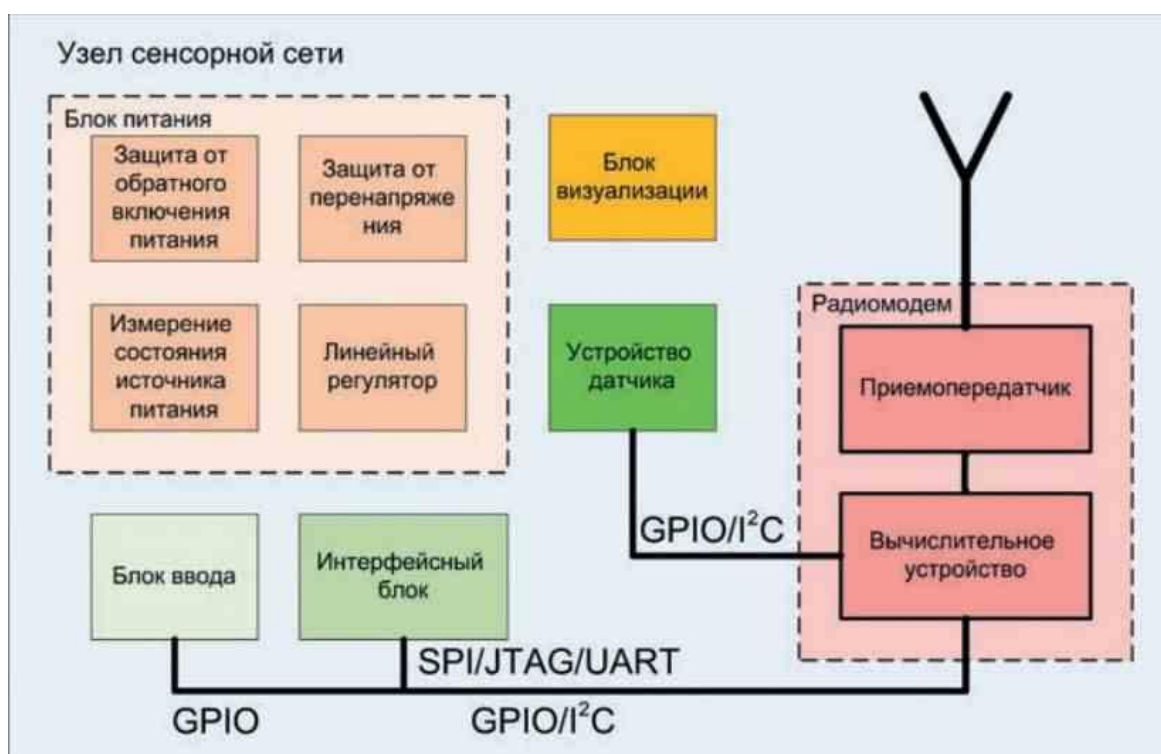


Рисунок 6.1 - Узел сенсорных сетей

Большинство узлов, которые передают данные и собирают их, должны знать свое местоположение с высокой точностью. Поэтому в общую схему включен модуль определения местоположения. Иногда может понадобиться устройство, которое будет менять положение узла при необходимости, если это необходимо для выполнения поставленных задач.

Все эти модули могут быть помещены в футляр размером со спичечный коробок. Размер узла может быть меньше кубического сантиметра и достаточно легкий, чтобы оставаться в воздухе. [22] Кроме размера, существуют и некоторые другие строгие ограничения для узлов. Они должны:

- очень мало потреблять энергии;
- работать с большим количеством узлов на коротких расстояниях;
- иметь низкую себестоимость производства;
- быть автономным и работать без надзора;
- приспособиться к окружающей среде.

Срок службы сенсорной сети зависит от питания отдельных узлов, поскольку узлы могут стать недоступными.

Мощность - это ограниченный ресурс из-за ограничений по размерам. Общий запас энергии интеллектуального узла составляет около 1 Джоуля.

Для интегрированной беспроводной сенсорной сети (WINS) средний уровень заряда должен быть меньше 30 LA, чтобы обеспечить долгосрочную работу. Но можно продлить срок службы сенсорных сетей, используя заряжающиеся аккумуляторы, которые получают энергию из окружающей среды. Солнечные панели являются ярким примером использования подзарядки. Модуль передачи данных узла может быть пассивным или активным оптическим устройством, как в интеллектуальном узле или радиочастотном передатчике.

Для радиочастотной передачи нужен модуль модуляции, который использует определенную полосу пропускания, модуль фильтрации, демодуляции, что делает их более сложными и дорогими. Кроме того, передача данных между двумя узлами может быть потеряна из-за того, что антенны расположены близко к земле. Однако радиосвязь является лучшим в большинстве существующих проектов сенсорных сетей, поскольку частоты передачи данных низкие (обычно менее 1 Гц), а частота циклов передачи высокая на коротких расстояниях. Эти характеристики позволяют использовать низкие радиочастоты. Однако проектирование энергоэффективных и низкочастотных радиопередатчиков все еще является технически сложной задачей, а существующие технологии, используемые при производстве устройств Bluetooth, недостаточно эффективны для сенсорных сетей, поскольку потребляют много энергии. Хотя процессоры постоянно уменьшают свой размер и увеличивают свою мощность, обработка и хранение данных узлом все еще является его слабым местом.

Определения местоположения используется во многих протоколах маршрутизации сенсорной сети (дополнительные сведения см. в разделе 4). Некоторые предполагают, что каждый узел должен иметь модуль глобальной системы позиционирования (GPS), который работает с точностью до 5 метров [22]. В работе утверждается, что оборудование всех узлов GPS не является необходимым для работы сенсорных сетей. Существует альтернативный подход, когда только некоторые узлы используют GPS и помогают другим узлам определять свое положение на земле. [22]

## **7 Топология сети**

Топология – это схема соединения каналами связи узлов сети между собой. Обслуживание сети может быть сложной задачей, наличие того факта, что узлы могут стать недоступными и подвержены частым сбоям.

От сотни до нескольких тысяч узлов могут быть размещены на территории сенсорной сети. Они развертываются в десятке метров друг от друга. Плотность расположения узлов может быть и выше, чем 20 узлов на метр кубический. Плотное расположение множества узлов требует тщательного обслуживания сети. Рассмотрим вопросы, связанные с обслуживанием и изменением топологии сети в три этапа [21].

### **7.1 Предварительное развертывание**

Развертывание узлов может быть в массовом диапазоне узлов или установка их по отдельности. Они могут быть развернуты:

- каждый узел помещается отдельно человеком или роботом;
- распространение из самолета;
- выброшен из катапульты (например, транспортного средства и т.д.);
- путем размещения в ракете или снаряде;
- размещение на заводе-изготовителе.

Несмотря на то, что огромное количество датчиков и их автоматическое развертывание обычно не позволяет разместить их в соответствии с тщательно разработанным планом, первоначальная схема развертывания должна:

- способствовать самоорганизации и отказоустойчивости;
- снижению затрат на установку;
- повышение гибкости размещения;
- устранение необходимости в какой-либо предыдущей организации и предварительном планировании.

### **7.2 Установка режима работы**

После развертывания сети, изменение ее топологии связано с изменением характеристик узлов. Перечислим их:

- изменение поставленных задач;
- положение;
- заряда батареи;
- доступность (из-за помех, шума, движущихся препятствий, и т.д.);
- неисправности.

Узлы могут быть развернуты статически. Однако отказ устройства часто происходит из-за разряда батареи или ее разрушения.

Возможны сенсорные сети с высокой подвижностью узлов. Структура сенсорной сети подвержена частым изменениям после развертывания, из-за того что узлы сети выполняют разные задачи и могут подвергаться преднамеренным помехам.

### **7.3 Развертывания дополнительных узлов**

Для замены неисправных узлов или в связи с изменением задач, могут быть добавлены в любой момент дополнительные узлы, тем самым создается необходимость в реорганизации сети. Все эти частые изменения в топологии одноранговой сети, которая содержит множество узлов и имеет очень жесткие ограничения по энергопотреблению, требует специальных протоколов маршрутизации.

### **8 Концепция беспроводной сенсорной сети как часть интернета вещей**

В настоящее время существует возможность оснащения БСС доступом в интернет. Доступ в интернет я перевожу, чтобы использовать в качестве резервного канала. Если основной из них недоступен, вы можете повысить надежность сети.

Последние достижения в области БСС и использование протокола IP в устройствах с ограниченными ресурсами радикально изменили структуру Интернета [2].

Триллионы умных устройств вскоре будут подключены к Интернету, что позволит нам говорить о формировании концепции Интернета вещей (IOT) [3].

Инженерный Совет Internet IETF (Internet Engineering Task Force) стандартизировал новый протокол IPv6 по маломощным беспроводным персональным сетям (6lowpan). Этот новый стандарт позволяет использовать IPv6 в сетях с низким энергопотреблением и потерями (LLNs), которые, в свою очередь, основаны на стандарте IEEE 802.15.4.

В дополнение к 6lowpan рабочая группа IETF разработала новый протокол маршрутизации для сетей с низким энергопотреблением и потерями (RPL).

Одним из главных преимуществ IP на базе сети LLNs является изменение стандартной архитектуры веб-сервисов без необходимости использования шлюзов, так как смарт-объекты будут интегрированы не только с интернетом, но и с сетью Интернет. Эта интеграция определяется как web of things (WoT-Web of Things). WoT является неотъемлемой частью Интернета вещей и предоставляет возможность контролировать и управлять умными вещами с помощью страниц. Концепция Web of Things (WoT) предоставляет прикладной уровень для создания приложений Интернета вещей. Целью технологии WoT является создание сети для узлов с низким энергопотреблением и потерями на основе передовых протоколов прикладного уровня.

Преимущество новой технологии заключается в том, что приложения для интеллектуальных объектов могут быть построены на архитектуре REST (Representational State Transfer). Архитектура REST позволяет приложениям

полагаться на набор существующих служб, которые могут быть запрошены клиентами в зависимости от их текущих потребностей.

Основная рабочая группа IETF провела работу по стандартизации для внедрения веб-сервисов в сетях интеллектуальных объектов. Основная группа разработала основанный на REST протокол для веб-передачи ограниченного приложения Proto-col (CoAP).

Протоколы Web of Things протокол XMPP

Расширяемый протокол обмена сообщениями и присутствия (XMPP). Этот протокол был стандартизирован в IETF более десяти лет назад и хорошо зарекомендовал себя, в результате чего он до сих пор широко используется в Интернете. Однако, будучи давно устоявшимся протоколом, XMPP имеет ряд естественных недостатков для реализации новых приложений. По этой причине Google прекратила выпуск стандарта XMPP в прошлом году. Однако недавно XMPP снова получил поддержку от инженерного сообщества в качестве протокола для устройств Интернета вещей. XMPP основан на протоколе транспортного уровня TCP и обеспечивает асинхронный и синхронный алгоритм обмена сообщениями.

Протокол XMPP предназначен для связи в режиме реального времени. Он поддерживает быстрый обмен сообщениями и обеспечивает низкую задержку (латентность) с течением времени. XMPP также поддерживает взаимодействие с криптографическими протоколами, такими как TLS / SSL. Однако он не способен обеспечить необходимое качество обслуживания, что делает его использование нецелесообразным для M2M-коммуникаций. XMPP поддерживает архитектуру обмена сообщениями издатель / подписчик, которая больше подходит для IP-адресов, чем принцип обмена сообщениями "запрос/ответ". Известно, что протокол поддерживается огромным количеством разработчиков и обычных пользователей Интернета, что является преимуществом по сравнению с относительно новой технологией MQTT.

Однако из-за того, что протокол XMPP основан на специализированном языке разметки XML, существует ряд недостатков, связанных с дополнительными затратами на передачу данных через лишайники, которые требуют разбора XML-тегов, что повышает требования к вычислительным возможностям и, как следствие, увеличивает энергопотребление устройства.

## **8.1 Restful services**

REST - это на самом деле не протокол, а архитектурный стиль. Он был впервые представлен Роем Томасом Филдингом в 2000 году и до сих пор широко используется. Он может использовать различные протоколы передачи данных, например, при использовании HTTP методы HTTP GET, POST, PUT и DELETE используются для предоставления ресурсов для ориентированной системы обмена сообщениями, где все действия могут выполняться только с помощью синхронных команд HTTP данного типа

«запрос-ответ». Команда использует заголовок HTTP, встроенный в сообщение Ассерта, чтобы указать формат содержащихся данных. Формат данных может быть XML или json (JavaScript object notation) и зависит от http-сервера и его конфигурации. Все вышеперечисленное может быть реализовано в смартфонах и планшетных приложениях, поскольку для этого требуется только библиотека разработчиков ntr, которая доступна для всех операционных систем (ОС).

Функциональность протокола HTTP также может быть использована для проверки подлинности и типа содержимого беседы. Службы Restful используют различные протоколы прикладного уровня, такие как HTTP и HTTPS. Однако на данный момент многие коммерческие платформы M2M не поддерживают запросы HTTP / HTTPS. Вместо этого они предоставляют уникальные ключи аутентификации, которые должны быть в заголовке каждого запроса, чтобы обеспечить определенный уровень безопасности и надежности. Однако маловероятно, что протоколы, использующие концепцию Restful, станут доминирующими коммуникационными протоколами. Учитывая современные тенденции развития мобильных приложений связаны с дополнительными затратами на пропускную способность канала связи, накладывается архитектурой «запрос / ответ» и влияет на скорость разряда батареи. Эта архитектура также заполняет полосу пропускания непрерывно поступающими опросами, которые не обновляют состояние устройства. Этой проблемы можно избежать, если использовать протоколы прикладного уровня, основанные на архитектуре «публикация / подписка», такие как MQTT, XMPP или CoAP.

## **8.2 CoAP протокол**

Constrained Application Protocol (CoAP) - протокол прикладного уровня, разработанный инженерами IETF для устройств с низким энергопотреблением и высокими потерями (LLN). Он был разработан на основе протокола HTTP, поэтому совместим с ним.

CoAP предназначен для использования в очень простых электронных устройствах, и позволяет им взаимодействовать в интерактивном режиме через сеть Интернет. Подробное описание имеется в стандарте RFC под номером 7252.

Протокол CoAP работает поверх протокола транспортного уровня UDP. Как и HTTP он использует методы GET, POST, PUT, DELETE при клиент-серверном взаимодействии. Кроме того, протокол можно использовать для группового взаимодействия (multicast), что дает ему преимущества над протоколами, работающими поверх TCP. Так как CoAP работает поверх UDP, потребовалась разработка механизмов, которые позволили достигнуть необходимого уровня надёжности. Два бита в заголовке сообщения CoAP используются для контроля качества доставки. На основе данного поля можно выделить четыре разновидности сообщений:



Confirmable - сообщения, которые требуют подтверждения доставки (АСК). Поддерживает как синхронный, так и асинхронный режим работы.

Non-Confirmable - сообщения, которые не требуют подтверждения доставки.

Acknowledgment - сообщение, которое отправляется в ответ на сообщения типа Confirmable.

Reset - сообщение, отправляемое, в случае если принимающее сообщение повреждено.

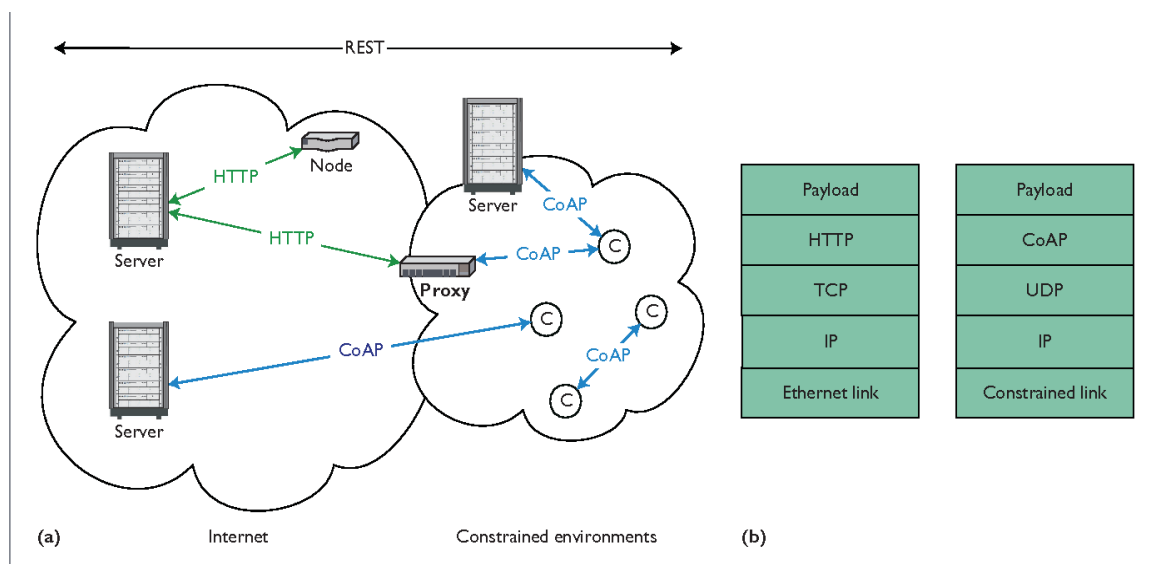


Рисунок 8.1 - Протокол CoAP

Также для протокола CoAP существует механизм Stop-and-Wait, который задерживает отправку сообщений и отправляет повторно сообщения типа Confirmable, в случае их неудачной доставки. И также в CoAP имеется поле, содержащее уникальный идентификатор сообщения размером 16 бит, с помощью которого возможно обнаружить дубликат.

Протокол CoAP, в совокупности с методом HTTP Mapping позволяет, CoAP-клиенту с помощью прокси-сервера подключаться к HTTP-серверу. По аналогии HTTP-сервер имеет возможность подключения и передачи данных к CoAP-клиенту.

Для обеспечения безопасности протокол CoAP использует криптографический протокол DTLS поверх UDP. Он обеспечивает корректную передачу данных, аутентификацию устройства на сервере и установление криптографически защищенного канала связи.

### 8.3 AMQP

Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) - это протокол прикладного уровня, предназначенный для передачи сообщений между компонентами системы, возникшими в финансовой отрасли. Этот протокол может использовать различные протоколы транспортного уровня, но он

предназначен для протоколов с гарантированной доставкой данных, таких как TCP.

Протокол AMQP обеспечивает асинхронную передачу данных на основе модели издатель / подписчик. Его главным преимуществом является функция хранения и пересылки данных, обеспечивающая надежность даже после сбоев в работе сети. Надежность обеспечивают следующие свойства протокола:

«По крайней мере, один раз» означает, что протокол гарантирует правильную доставку сообщения, и если это не удастся, он повторно отправляет сообщение.

«По крайней мере, один раз» означает, что сообщение, безусловно, будет доставлено один раз, а возможно, и больше.

«Ровно один раз» означает, что сообщение будет доставлено только один раз.

В последнее время исследования показали, что AMQP имеет низкую вероятность успешной доставки сообщений при низкой пропускной способности, но эта вероятность возрастает по мере увеличения пропускной способности. Другое исследование показывает, что по сравнению с выше упомянутым REST, AMQP может отправлять большее количество сообщений в секунду. Кроме того, было установлено, что AMQP среди 2000 пользователей, распределенных по пяти континентам, может обрабатывать 300 миллионов сообщений в день.

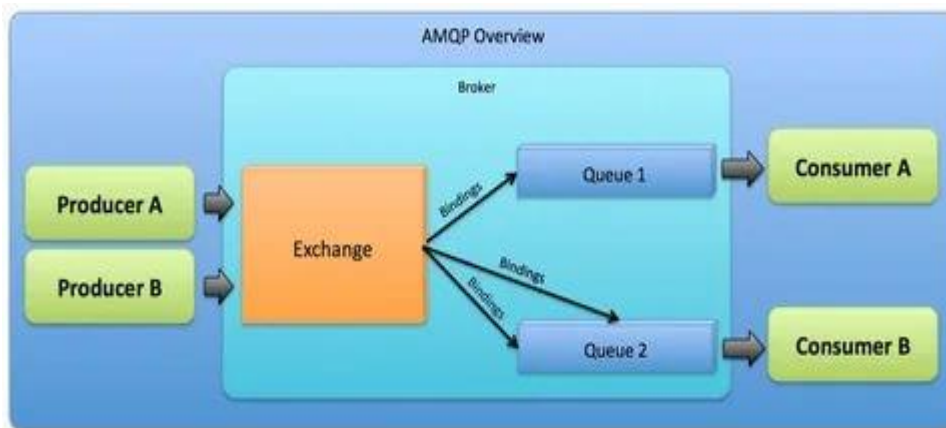


Рисунок 8.2- Протокол AMQP

#### 8.4 WebSocket

Протокол WebSocket был разработан в рамках инициативы HTML по созданию каналов связи по протоколу TCP. В WebSocket клиент инициализирует соединение с сервером, чтобы установить сеанс WebSocket. Сама установка соединения аналогична установке соединения в протоколе HTTP, и веб-серверы могут обрабатывать сеанс WebSocket, используя тот же порт, что и HTTP-соединения. Фактически, во время сеанса HTTP заголовки

удаляются, и клиенты и серверы могут обмениваться сообщениями в асинхронном режиме полной остановки - интегрированное соединение. Сеанс связи может быть прерван по запросу со стороны сервера или клиента.

WebSocket используется для снижения нагрузки на каналы связи в сети связи общего пользования, обеспечивая полнодуплексную связь в режиме реального времени. Существует также прото-протокол WebSocket, называемый WebSocket sub-Protocol( WAMP), который предназначен для поддержки модели издателя / подписчика в WebSocket.

Система обмена сообщениями WebSocket работает поверх протокола TCP и сама по себе не реализует никаких механизмов безопасности. При необходимости безопасные соединения могут быть реализованы через WebSocket с использованием криптографических протоколов TLS / SSL. Во время сеанса сообщение веб-сокета имеют размер 2 байта.

Исследования показали, что при загрузке ссылки протокол HTTP повторно отправляет заголовок HTTP, что увеличивает задержку. WebSocket, по оценкам, обеспечивает снижение задержки от трех до одного по сравнению с полудуплексным режимом опроса HTTP. Протокол WebSocket не предназначен для устройств с ограниченными вычислительными возможностями, в отличие от перечисленных выше протоколов, основанных на клиент-серверной архитектуре. Этот протокол не очень хорошо адаптирован к решениям концепции IW, но он рассчитан на работу в режиме реального времени, является защищенным протоколом и минимизирует требования, предъявляемые к каналу связи, а при использовании протокола WAMP позволяет организовать эффективные сценарии обмена информацией для IW.

Таким образом, WebSocket может конкурировать с любым другим протоколом, работающим поверх протокола TCP.

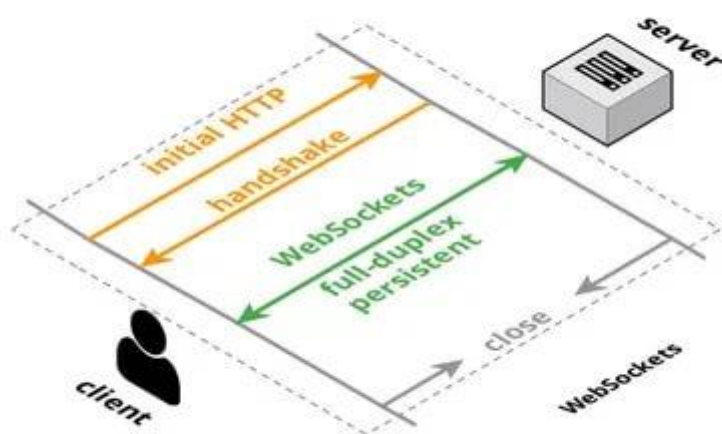


Рисунок 8.3 - Протокол WebSocket

## 8.5 MQTT

Message Queue Telemetry Transport (MQTT) - протокол прикладного уровня, разработанный компанией IBM для упрощения работы M2M. Это асинхронный протокол, построенный поверх протокола транспортного уровня TCP. В качестве сервера MQTT используется так называемый брокер.

Каждый клиент, подключенный к MQTT-брокеру, при обновлении брокера, получает новые данные от канала на брокере, на который он подписан. MQTT разработан для устройств с низким энергопотреблением и высокими потерями (LLN).

Типы сообщений MQTT:

Fireandforget - сообщение отправляется один раз и не требуется подтверждения.

Deliveredatleastonce - повторно отправленные сообщения требуют подтверждения.

Deliveredexactlyonce - механизм четырехступенчатого рукопожатия клиент-брокера.

MQTT, как и протокол HTTP, для обеспечения безопасной передачи данных использует методы аутентификации TLS/SSL.

Реализация протокола CoAP в симуляторе Cooja

Для реализации протокола авторы использовали инструменты разработки, поставляемые с ОС Contiki [7, 9]. Данная операционная система поддерживает современные протоколы связи для сетей с низким энергопотреблением и потерями: 6LoWPAN, RPL, CoAP. Моделирование производилось с помощью инструмента COOJA. Для построения сети на базе CoAP использовалась реализация протокола ОС Contiki.

На рис. 8.4 показано сенсорное поле, которое представляет собой квадрат 100 на 100 метров и содержит 22 узла, размещенных случайным образом.

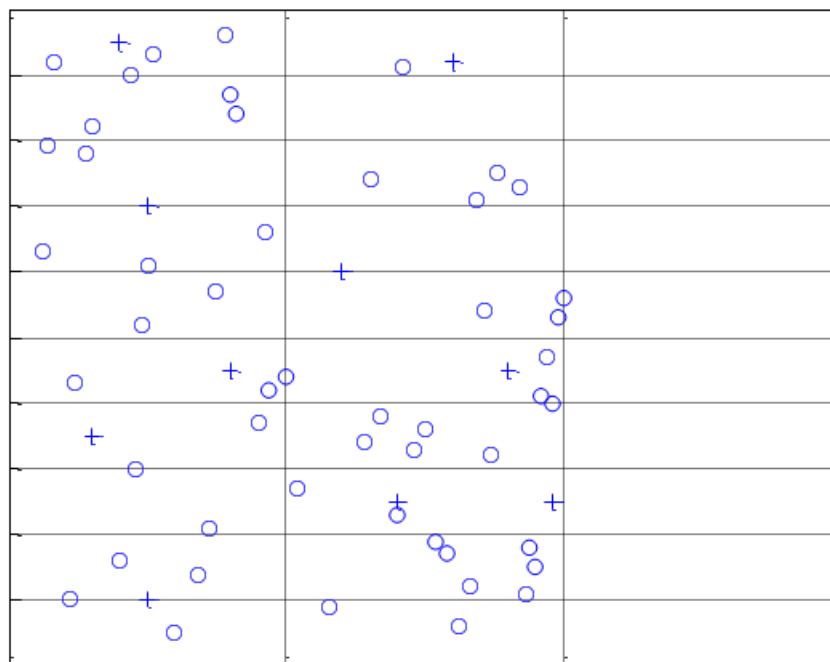


Рисунок 8.4- Сенсорное поле

## 9 Окружающая среда

Узлы очень близко и плотно располагаются непосредственно внутри наблюдаемого явления. Таким образом, они работают без присмотра в удаленных географических районах.

- в канализации или реке вместе с потоком воды.
- на оживленных перекрестках;
- на дне океана;
- на поверхности океана во время торнадо;
- внутри торнадо;
- в биологически и химически загрязненных областях;
- на поле боя;
- в доме или большом здании;
- на большом складе;
- прикрепленными к животным;
- прикрепленными к быстро движущимся транспортным средствам;
- внутри больших машин [21].

Этот список дает представление о том, при каких условиях узлы могут работать. Они могут работать под высоким давлением на дне океана, в суровых условиях, среди мусора или в поле боя, при экстремальных температурах, например в сопле двигателя самолета или в арктических регионах, в очень шумных местах, где много помех[21].

## 10 Способы передачи данных

В сенсорной сети multi-hop, узлы общаются посредством беспроводной связи. Связь может осуществляться через радио, ИК-порт или оптические носители. Для того чтобы использовать эти методы в глобальном масштабе, среда передачи должна быть доступна во всем мире. Одним из вариантов радиосвязи является использование промышленных, научных и медицинских диапазонов (ISM), которые в большинстве стран доступны без лицензий.

Некоторые типы частот, которые могут быть использованы, описаны в международной таблице частот, содержащейся в статье S5 регламента радиосвязи (том 1). Некоторые из этих частот уже используются в беспроводной телефонии и беспроводных локальных сетях (WLAN). Для малогабаритных и недорогих сенсорных сетей усилитель сигнала не требуется. Аппаратные ограничения и нахождение компромисса между эффективностью антенны и энергопотреблением накладывают определенные ограничения на выбор частоты передачи в сверхвысоком диапазоне частот. Они также предлагают использование 433 МГц ISM в Европе и 915 МГц ISM в Северной Америке. Основными преимуществами использования радиочастот ISM являются широкий диапазон частот и доступность по всему миру. Они не привязаны к конкретному стандарту, что дает большую свободу для реализации стратегий энергосбережения в сенсорных сетях. С другой стороны, существуют различные правила и ограничения, такие как различные законы и вмешательство со стороны существующих приложений. Эти полосы частот также называются нерегулируемыми частотами. Большая часть современного оборудования для узлов базируется на использовании радиопередатчиков. Iamps беспроводные узлы, использует Bluetooth-совместимые передатчики 2,4 ГГц и имеют встроенный синтезатор частот. Устройство маломощных узлов описано в специальной литературе, в нем используется один канал радиопередачи, работающий на частоте 916 МГц. В архитектуре WINS также используется радиосвязь. Еще одним возможным способом связи в сенсорных сетях является ИК-порт. ИК-связь доступна без лицензии и защищена от помех со стороны электрических устройств. ИК-передатчики дешевле и проще в изготовлении. Многие современные Ноутбуки, КПК и мобильные телефоны используют ИК-интерфейс для передачи данных. Главным недостатком такого соединения является требование прямой видимости между отправителем и получателем. Это делает ИК-связь нежелательной для использования в сенсорных сетях из-за среды передачи. Интересный способ передачи данных используется интеллектуальными узлами, которые являются модулями для автоматического мониторинга и обработки данных. Они используют оптический носитель для передачи информации. Существует две схемы передачи: пассивная с использованием углового кубического светоотражателя (CCR) и активная с использованием лазерного диода и управляемых зеркал. В первом случае встроенный источник света не требуется, и для передачи сигнала

используется трехзеркальная конфигурация (CCR). Активный метод использует лазерный диод и активную лазерную систему связи для передачи световых лучей к предполагаемому приемнику.

## **11 Маршрутизации в беспроводных сетях**

Существует три типа маршрутизации: простая, фиксированная и адаптивная. Разница между ними заключается в том, когда надо учитывать изменения топологии сети и нагрузки при решении задачи выбора маршрута.

Простая маршрутизация, при которой выбор маршрута не учитывает изменения топологии сети и состояния нагрузки. Он не обеспечивает направленную передачу данных. В результате он обеспечивает низкую эффективность, но простоту в реализации алгоритма маршрутизации и обеспечение устойчивой работы сети при выходе из строя отдельных ее элементов. Существует два типа простой маршрутизации: случайная и лавинная. Особенностью случайной маршрутизации является то, что выбирается одно случайно выбранное свободное направление, для передачи пакета из узла связи, тем самым пакет «бродит» по сети, и в конце концов с какой-то вероятностью он достигает пункта назначения. Это не обеспечивает ни эффективного использования пропускной способности сети, ни оптимального срока доставки пакета.

Лавинная маршрутизация (или заполнение всех доступных исходных направлений пакетами) предполагает передачу пакета от узла во всех направлениях, кроме того, откуда пакет пришел к этому узлу. Существует явление «умножение» пакета, при котором резко ухудшается использование пропускной способности сети, что обусловлено большой нагрузкой на узлы.

Мы должны отметить копии пакета и уничтожить дубликаты, которые проходят через него снова на каждом узле, чтобы уменьшить нагрузку. Главное преимущество этого метода заключается в том, что он гарантирует оптимальное время доставки посылки получателю, так как, по крайней мере, один из них обеспечивает такое время из всех направлений, что посылка отправляется. Этот метод может быть использован в незагруженных сетях, Если требования к минимизации времени и надежности доставки пакетов достаточно высоки.

Фиксированная маршрутизация, при которой выбор маршрута учитывает изменения топологии сети и не учитывает изменения ее нагрузки.

Для каждого узла назначения, направление передачи выбирается по таблице маршрутов (каталогу), которая определяет кратчайшие пути. Каталоги находятся в центре управления сетью. Они снова складываются и при необходимости модифицируются. Неспособность адаптироваться к изменениям нагрузки приводит к задержкам сетевых пакетов. Существуют одноколейные и многодорожечные версии фиксированной маршрутизации. Первый основан на одном пакетном пути между двумя абонентами, что сопряжено с неустойчивостью к сбоям и перегрузкам, а второй - на

нескольких возможных путях между двумя абонентами, из которых выбирается лучший путь. Фиксированная маршрутизация применяется в сетях с мало меняющейся топологией и устойчивыми потоками пакетов.

Адаптивная маршрутизация, при которой решения о направлении передачи пакетов принимаются на основе изменения, как топологии, так и сетевой нагрузки. Существует несколько модификаций адаптивной маршрутизации, которые отличаются тем, какая информация используется при выборе маршрута. Широкое распространение получили такие модификации, как локальная, распределенная, централизованная и гибридная маршрутизации.

Локальная Адаптивная маршрутизация основана на использовании информации, имеющейся на данном узле, и включает в себя: таблицу маршрутов, что определяет все направления передачи пакетов из данного узла; данные о состоянии выходных линий связи (работающих или не работающих); длину очереди пакетов, ожидающих передачи. Информация о состоянии других узлов связи не используется. Таблица маршрутов определяет кратчайшие маршруты, обеспечивает доставку посылки получателю в кратчайшие сроки. Преимущество этого метода заключается в том, что решение о выборе Маршрута принимается с использованием самых последних данных о состоянии узла. Недостатком метода является его «близорукость», так как выбор Маршрута проводится без учета глобального состояния всей сети. Таким образом, всегда существует риск отправки пакета по перегруженному маршруту.

Распределенная Адаптивная маршрутизация основана на использовании информации, заданной для локальной маршрутизации, и данных, полученных от соседних узлов сети. В каждом узле создается таблица маршрутов (каталог) для всех узлов назначения, где задаются маршруты с минимальным временем задержки пакетов. Прежде чем сеть начнет работать, это время оценивается на основе топологии сети. Во время работы сети узлы периодически обмениваются с соседними узлами, так называемыми таблицами задержек, которые указывают нагрузку (длину очереди пакетов) узла. После обмена таблицами задержек каждый узел перечисляет задержки и корректирует маршруты на основе полученных данных и длины очередей в самом узле. Таблицы задержек могут обмениваться не только периодически, но и асинхронно в случае резких изменений нагрузки или топологии сети.

Учет состояния соседних узлов при выборе маршрута значительно повышает эффективность алгоритмов маршрутизации, но это достигается за счет увеличения нагрузки сети служебной информацией. Кроме того, информация об изменениях состояния узлов распределяется по сети относительно медленно, поэтому маршрут выбирается на основе несколько устаревших данных.

Централизованная Адаптивная маршрутизация характеризуется тем, что задача маршрутизации для каждого узла сети решается в центре маршрутизации (ЦМ). Каждый узел периодически генерирует сообщения о



своем состоянии (длина очередей и работоспособность линий связи) и передает его, на основе этих данных создается таблица маршрутов для каждого узла. Естественно, что передача сообщений, формирование и распределение маршрутных таблиц - все это связано с временными задержками, следовательно, с потерей эффективности данного метода, особенно при большой пульсации нагрузки в сети. Кроме того, существует риск потери сетевого управления в случае сбоя.

Гибридная Адаптивная маршрутизация основана на использовании таблиц маршрутов, отправляющихся см на узлы сети, в сочетании с анализом длины очередей в узлах. Таким образом, здесь реализуются принципы централизованной и локальной маршрутизации. Гибридная маршрутизация компенсирует недостатки централизованной маршрутизации (маршруты, генерируемых центром, несколько устарели) и локальной (метод «близорукости») и воспринимает их преимущества: маршруты соответствуют глобальному состоянию сети, а учитывая текущее состояние узла, обеспечивает своевременность решения.[21].

## **12 Требования**

В связи с необходимостью сокращения использования вычислительных ресурсов (радио, аккумулятор, датчики) протоколы маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях должны соответствовать следующим требованиям:

**Автономия.** Удаление определенного узла в сети не должно влиять на его работу. Поскольку в сети не должно быть центрального узла, любой пользователь может выполнять функции удаленной маршрутизации.

**Энергетическая эффективность.** Протоколы маршрутизации должны максимально эффективно использовать энергию.

**Масштабируемость.** БСС состоят из сотен узлов, поэтому протоколы маршрутизации должны работать с таким количеством узлов.

**Стабильность.** Датчики могут внезапно перестать работать по причине выхода из строя батареи или внешних причин. Протоколы маршрутизации должны обрабатывать эту возможность таким образом, чтобы, когда ток в узлах исчезнет, можно было использовать альтернативный маршрут.

**Неоднородность приборов.** Хотя большинство приложений беспроводных сенсорных сетей зависит от однородности узлов, внедрение различных типов датчиков может обеспечить значительное преимущество.

**Мобильность.** Во многих случаях узлы могут перемещаться во время работы. Протоколы маршрутизации должны принимать это во внимание.

Особенности и ограничения беспроводных сенсорных сетей создают особые требования к протоколам маршрутизации. Обычно выделяют следующие технические характеристики:

**Основанный на атрибутах.** В таких алгоритмах узел отправляет запросы в определенные участки сети и ожидает ответа от датчиков, расположенных в этой области. Выбор атрибутов зависит от конкретного приложения. Важной

особенностью данной схемы является то, что содержание сообщения данных анализируется на каждом этапе маршрутизации.

Энергетическая эффективность. В этих алгоритмах можно выбрать те маршруты, которые, как ожидается, максимально способствующие сохранению энергии в сети. Для этого маршрут состоит из узлов с более высокими энергетическими ресурсами.

Агрегирование данных. Относительно близкие узлы могут производить аналогичные данные, которые могут быть объединены с некоторой приемлемой потерей точности.

Применение датчиков существенно зависит от связи между узлами, так как это необходимо для выполнения определенных процедур или алгоритмов. На самом деле существует три основных типа алгоритмов маршрутизации для беспроводных сенсорных сетей:

- централизованные алгоритмы: они выполняются на узле, который имеет знания всей сети. Эти алгоритмы достаточно дорогие в использовании из-за высокой стоимости передачи данных для получения состояния всей сети;

- распределенные алгоритмы: коммуникация осуществляется путем отправки сообщений;

- локальные алгоритмы: узлы используют данные, полученные из ближней области. Используя эту информацию, алгоритм может быть выполнен на одном узле.

Используемые алгоритмы являются важным фактором, который необходимо учитывать при выборе алгоритма маршрутизации. Если используются локальные алгоритмы, то важна высокая коммуникационная связность соседних узлов. При централизованных алгоритмах объединения сообщений является большим плюсом. Распределенные алгоритмы должны обеспечивать надежное соединение между любыми двумя узлами сетки. При выборе локальных алгоритмов следует учитывать, что использование дополнительных инструментов позиционирования (например, GPS) может значительно увеличить стоимость такой сети.

Классификация по методу расчета путей:

- проактивные протоколы - все пути рассчитываются заранее, прежде чем они понадобятся;

- реактивные протоколы - пути рассчитываются по требованию;

- гибридные протоколы - это сочетание двух подходов.

### **13 Алгоритмы маршрутизации в БСС**

Алгоритм SPIN: протоколы датчиков для получения информации по согласованию. Основные идеи спиновых протоколов обмен измеренными данными может быть дорогостоящим, но обмен данными об измеренных данных (метаданными) может и не быть. Узлы должны контролироваться и адаптироваться к изменениям в их собственных энергетических ресурсах.

Потенциально каждый узел является базовой станцией, и информация передается от каждого к каждому. Протокол использует метаданные и систему «переговоров». Семантика метаданных не определяется протоколом и зависит от конкретных приложений. Протокол может адаптироваться в зависимости от количества энергии, оставшейся на узлах. Протокол работает в зависимости от времени и доставляет информацию всем узлам сети, даже если они ее не запрашивали.

Спиновый алгоритм имеет три стадии работы и, соответственно, может быть передан три типа ADV, REQ и сообщений данных.

- ADV-используется для распространения информации о новых данных. Содержит метаданные.

- REQ для запроса этих данных

- Данные - это сами данные.

Если узел хочет отправить новые данные, он сначала отправляет ADV-сообщения своим соседям, если один из соседей заинтересован в получении этих данных, он отправляет REQ-сообщение, а затем получает данные (уведомления о данных).

В семействе SPIN существует несколько протоколов:

- SPIN-1: стандартный протокол.

- SPIN -2: протокол использует информацию об оставшейся энергии.

- SPIN-BC: для распространения широкоэмиттерных сообщений.

- SPIN-PP: для отправки сообщений типа «Точка-точка».

- SPIN-EC: аналогично предыдущему, но с использованием энергетической информации (энергетической эвристики).

- SPIN-RL: предназначен для нестабильных каналов (каналы с потерями).

Протоколы семейства SPIN хорошо подходят для приложений, где узлы являются мобильными, поскольку им нужна только локальная информация о своих соседях.

Недостатком протоколов позвоночника является то, что они не гарантируют доставку данных.

### **13.1 Алгоритм Directed Diffusion**

Сенсорная сеть рассматривается как виртуальная база данных. Реализована обработка запросов от БС. Запрос распределяется по всей сети (флуд) или передается в выбранную группу узлов. В ответ узлы, в которых есть запрошенные данные, отправляют их обратно в БС. Промежуточные узлы могут объединять данные. Диффузия - это ориентированный на данные и ориентированный на приложения протокол, в котором все данные, генерируемые сенсорными узлами, обозначаются парами атрибутов.

Основная идея протокола направленной диффузии заключается в объединении данных из различных источников на промежуточном узле (внутри сетевое агрегирования), что устраняет избыточность и уменьшает количество передач, тем самым продлевая срок службы сети.

Основные элементы направленной диффузии.

Называющий. Данные обозначаются с помощью атрибутов.

Желать. Узел запрашивает данные, отправляя запрос интереса к определенным данным.

Уклон. Градиенты устанавливаются в пределах сетки для доставки данных, соответствующих запросу.

Усиление БС «задает» определенные маршруты для доставки данных с более высокой скоростью (данные о быстро меняющихся событиях).на основе именованя

Задачи обозначаются списком атрибутов-пар значений.

Описание задачи определяет запрос (интерес) для данных, которые соответствуют атрибутам.

BS периодически присылает (широковещательный) запрос (интерес) для данных всем своим соседям.

Каждый узел сохраняет кэш интересов. Каждая запись соответствует отдельному запросу. Не содержит информации о БС. Объединение (агрегирование) совпадающих запросов.

Каждая запись в кэше имеет несколько полей. Отметка времени, указывающая, когда был получен последний соответствующий запрос.

Несколько градиентов: скорость передачи данных, продолжительность и направление.

Использует обработку (агрегацию данных внутри сети). Достигает желаемого глобального поведения через локальное взаимодействие. Эмпирически приспосабливается к окружающей среде.

### **13.2 Алгоритм Rumor Routing**

Вариант Направленной Диффузии. Используется, когда количество событий невелико, а количество запросов велико. С помощью наводнение распространяется информация о событиях, а не запросы. Долгоживущие пакеты, называемые агентами, распространяют (заполняют) информацию о событиях в сети. Когда узел обнаруживает событие, он добавляет его в таблицу событий и создает агент. Агенты путешествуют по сети, распространяя информацию о локальном событии. Время жизни агента (Time-To-Live)

Когда узел создает запрос, он знает маршрут к соответствующему событию и может ответить, посмотрев на свою таблицу событий. Нет никакой необходимости использовать флуд для распространения запросов. Существует только один путь между источником и приемником. Маршрутизация слухов хорошо работает только тогда, когда число событий невелико. Расходы на поддержку большого количества агентов и таблиц событий.

### **13.3 Алгоритм LEACH: Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy**

Узлы самоорганизуются в кластеры и выбирают cluster head. Все узлы, которые не являются cluster head'ами, передают информацию cluster head'у.

Cluster head принимает данные, производит их обработку и передает на базовую станцию. Периодически происходит случайная смена cluster head'а и перекластеризация.

Две фазы (рисунок 13.1):

- организация кластеров;
- передача данных cluster head'у и на базовую станцию.

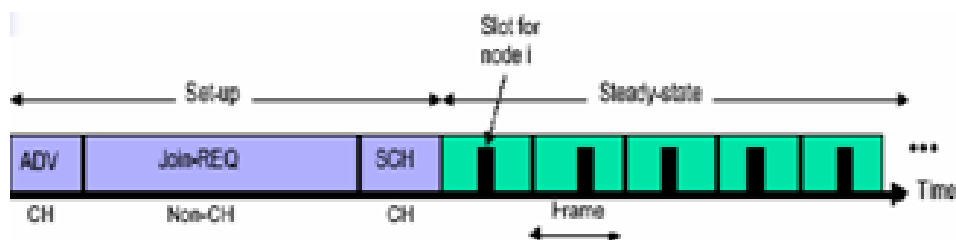


Рисунок 13.1 - Схема работы алгоритма LEACH

На начальном этапе каждый узел предлагает себя в качестве главы кластера с определенной вероятностью. Узлы, которые не стали cluster-headами, могут стать ими позже. Решение принимается исходя из заданной плотности кластерных головок в сети для распределения энергетической нагрузки по всей сети, причем кластерные головки периодически повторяются.

Главный узел кластера передает свое состояние другим узлам сети. Каждый узел выбирает, к какому кластеру он хочет присоединиться, исходя из энергоэффективности. Когда все узлы организованы в кластер, руководитель кластера создает расписание для каждого узла.

Формирование кластера.

Каждый руководитель кластера отправляет сообщение ADV, используя протокол CSMA / CA. Сообщение содержит идентификатор узла и заголовок, указывающий, что это сообщение ADV. Основываясь на силе сигнала от каждой головки кластера, каждый узел выбирает, к какому кластеру присоединиться. Каждый узел посылает сообщение запроса на соединение (используя CSMA / CA) своему руководителю кластера. сообщение содержит идентификатор главы кластера и самого узла. Каждый руководитель кластера создает расписание TDMA. Это гарантирует, что столкновения сообщений будут предотвращены и энергия будет сохранена.

Фаза передачи (рис. 13.2).

Узлы передают данные в отведенное им время. После получения сообщений от всех узлов Руководитель кластера генерирует свои собственные сообщения. Затем Руководитель кластера отправляет эти сообщения на базовую станцию. Чтобы уменьшить количество коллизий, cluster-head's использует коды CDMA. Перед передачей главный узел кластера прослушивает канал. Когда канал свободен, он передает информацию на базовую станцию.

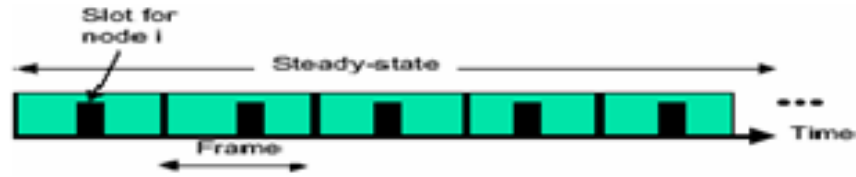


Рисунок 13.2 - Алгоритм LEACH: Фаза передачи

#### Достоинства

- Использование адаптивного самоорганизующегося протокола позволяет распределить энергетическую нагрузку по всей сети.
- Позволяет обрабатывать данные на кластерной головке, что позволяет уменьшить объем передаваемых по сети данных.
- Оптимальное количество кластеров может быть определено заранее в зависимости от топологии сети и соотношения затрат на обработку / передачу информации.
- Первая «смерть» узла происходит в восемь раз позже, чем при использовании прямой передачи и статических кластерных протоколов.

PEGASIS: энергоэффективный сбор информации в сенсорных информационных системах.

Улучшение выщелачивания. Образует цепочку, а не скопление. Данные передаются по цепочке, и один узел отправляет их. Превосходит выщелачивание с точки зрения энергетической эффективности. Большие задержки для узлов на концах цепочки. Иерархический Пегасис: использование CDMA.: Пороговая чувствительная энергоэффективная сеть, управляемый событиями протокол для критически важных по времени приложений.

Узел постоянно отслеживает окружающую среду, но передает информацию только в том случае, если значение существенно меняется.

Отсутствие прерывистой передачи.

Критические данные передаются немедленно, посылает «жесткий» и «мягкий» порог своим узлам.

«Жесткий порог»: узел отправляет информацию СН только в том случае, если значение находится в интересующем его диапазоне.

«Мягкий порог»: узел отправляет информацию СН только тогда, когда значение изменилось, по крайней мере на пороговое значение.

Каждый узел в кластере периодически становится СН.

Иерархическая кластеризация рисунок 13.3. Хорошо подходит для современных критических приложений.

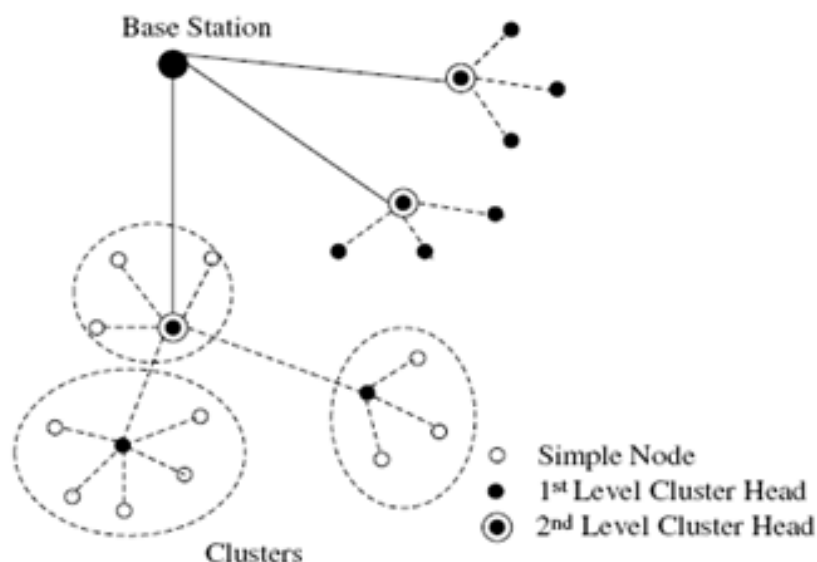


Рисунок 13.3 - Иерархия узлов в алгоритме TEEN

Ниже энергозатраты.

Более низкие затраты по сравнению с проактивными протоколами. «Мягкая» граница может адаптироваться. «Жесткий» предел может варьироваться в зависимости от программы. Не подходит для периодического контроля.

#### 13.4 Алгоритм APTEEN

Адаптивная пороговая чувствительная Энергоэффективная сеть.

Подростковая расширения для поддержки и периодического мониторинга, а также для реагирования на критические события. В отличие от TEEN, узел должен собирать и передавать данные, если они не были отправлены в течение определенного периода времени (count time), установленного СН. В сравнении с алгоритмом выщелачивания, TEEN & APTEEN потребляет меньше энергии.

Недостаток. Накладные расходы и сложность создания многоуровневых кластеров и организации пороговых функций.

#### 13.5 Алгоритм SOP: протокол самоорганизации

Архитектура поддерживает различные типы узлов. Фиксированные узлы маршрутизатора используются в качестве магистрали сети. Мобильные или стационарные сенсорные узлы отправляют информацию на маршрутизаторы. Узел датчика может быть частью сети только в том случае, если он может передавать информацию напрямую на маршрутизатор. Эта архитектура требует возможности обращаться к каждому узлу.

Достоинство:

- Подходит для приложений, где необходимо подключиться к узлу.
- Низкая стоимость обслуживания таблицы маршрутизации.
- Поддержка сбалансированной иерархии маршрутов.

- Энергосбережение: использование ограниченного подмножества узлов.

Недостаток:

- этот протокол не является протоколом по требованию, особенно на организационном этапе;

- наличие многочисленных пробелов повышает вероятность реорганизации сети (дорогостоящая операция).

### 13.6 Алгоритм GAF

Географическая Адаптивная точность - основанный протокол учитывает энергетические ресурсы узла.

Каждый узел знает свои координаты через GPS. Ассоциируйте себя с точкой на виртуальной сетке. Узлы, которые считаются в одной и той же точке, эквивалентны с точки зрения "стоимости" маршрутизации пакета.

Узел 1 может достигать либо узла 2,3, либо 4, поэтому узлы 2,3,4 эквивалентны (рис. 13.4). Любые 2 могут находиться в спящем режиме, не влияя на маршрутизацию.

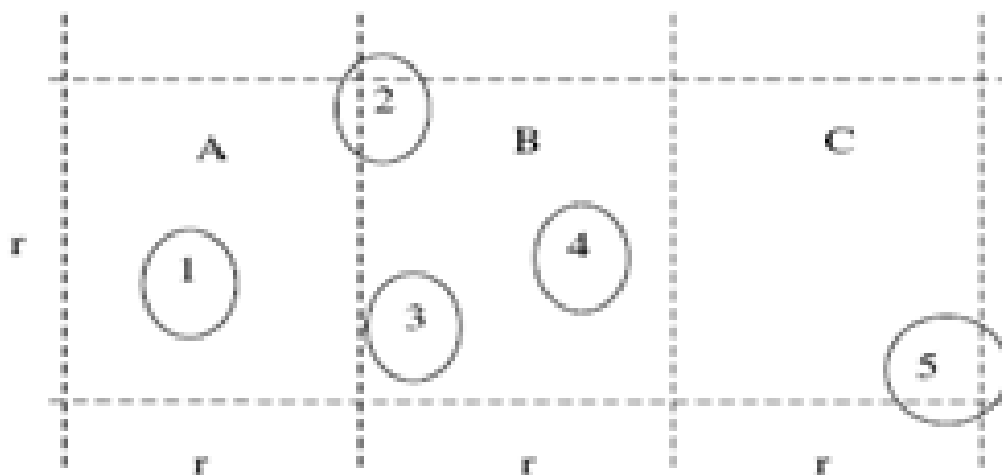


Рисунок 13.4 - Достижимые узлы в алгоритме GAF

Разработанный в первую очередь для Мане, но также может быть использован для сенсорных сетей три государства:

- обнаружение (Discovery): определяет соседей в сетке;
- деятельный;
- спящий;

Рассматривая мобильность, каждый узел оценивает время, которое он «покидает» сетку, и передает это время своим соседям. Соседние узлы регулируют время сна, чтобы обеспечить маршрутизацию.

Протокол плохо масштабируется. Только активные узлы посылают информацию, поэтому точность информации не очень высока.

Алгоритм передачи: географическая и энергетическая маршрутизация.



Ограничивает количество запросов, отправляемых в направленном распространении. Рассматривает только конкретную область сети, а не всю сеть в целом. Каждый узел хранит оценочную стоимость и стоимость обучения, чтобы достичь BS через своих соседей. Расчетная стоимость =  $f$  (остаточная энергия, расстояние до места назначения).

Фаза 1: пересылка пакетов в определенную область:

- пересылка пакета на соседний узел с минимальной функцией  $f$  (ближайшей к BS и имеющей наибольшую энергию);
- если все узлы находятся дальше, чем сам узел отправителя, то выбирается один из соседних узлов с учетом стоимости обучения;

Фаза 2: пересылка пакета в пределах желаемой области.

Применяется любая рекурсивная отправка сообщений. Район делится на 4 подрайона и высылается 4 экземпляра пакета (рис. 13.5).

Повторяется до тех пор, пока не останется районов с одним узлом. Применяется ограниченное наводнение. Он используется, когда плотность узлов низкая.

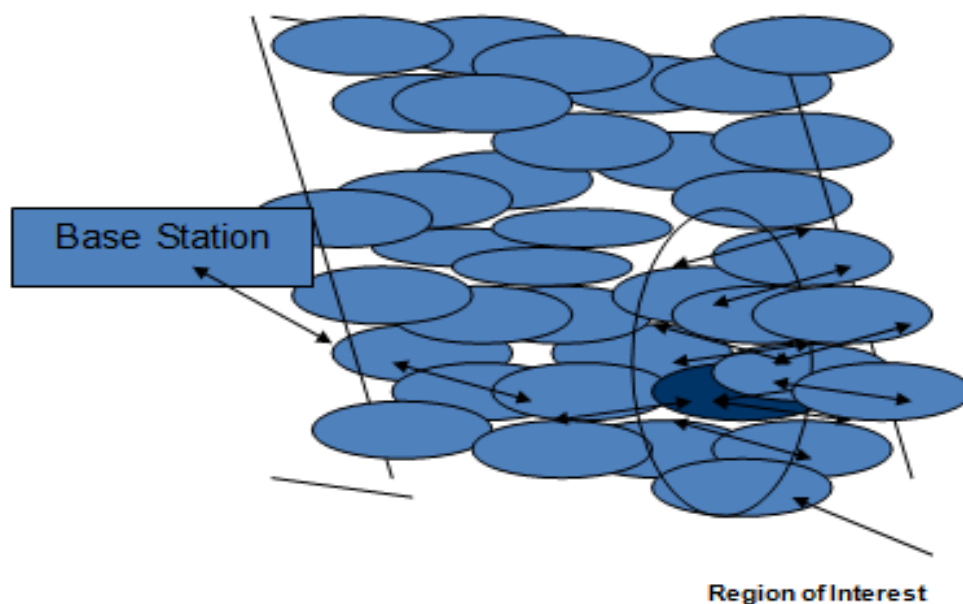


Рисунок 13.5 - Отправка сообщения в алгоритме GEAR

Протоколы маршрутизации со многими маршрутами (Multipath routing)

-Повышение надежности передачи информации, за счет существования нескольких маршрутов.

-Увеличивает энергетические затраты.

-Увеличивает количество трафика в сети.

## 14 Объект исследования

Под объектом исследования я подразумеваю сенсоры. Сенсоры могут быть использованы для систем мониторинга. Применение таких систем может быть использовано в системах охраны, либо системах умного дома.

Сама структура систем мониторинга имеет следующий вид. На нижнем уровне располагаются датчики; каждый датчик подключается к моту. С мотом проводными соединениями связано сразу несколько датчиков или датчик расположен на плате мота - это зависит от функций, которые датчики выполняют. Мы будем располагать датчики непосредственно на контролируемой поверхности.

Моты будут использоваться только для сбора и первичного преобразования сенсорных данных, они же сразу пересылают информацию друг другу, а в конце, специальному устройству - шлюзу (базовой станции, координатору), имеющему проводное соединение с сервером, где эти данные будут обрабатываться.

В сети может быть несколько шлюзов, а также может быть, что каждый мот может стать шлюзом в зависимости от определённых условий, что повышает ее надежность и быстродействие.

Управление режимами сбора информации и основная обработка получаемых сенсорных данных осуществляется приложениями сети. Такая организация позволяет избавиться от большого числа кабельных соединений, поскольку раньше каждый датчик проводными соединениями связывался с приемником информации [8].

Более эффективна в данном случае конфигурация типа «звезда». В этом случае моты будут передавать информацию выделенным мотам-маршрутизаторам, которые взаимодействуют с базовой станцией.

Такой подход повысит безопасность сети, а также это повысит вероятность работоспособности канала, так как не будет лишних устройств, к которым могут подключиться злоумышленники.

Обычно маршрутизаторы сенсорами не оснащаются, но в принципе ничто не запрещает их ими оснастить. Таким образом, получается, что сеть состоит из множества кластеров, образованных маршрутизатором и сенсорными узлами, в которых маршрутизатор спрашивает сенсорные данные.

Маршрутизаторы ретранслируют данные друг другу, и в конечном итоге эти данные передаются на шлюз. Надежность такой системы очень высока: отказ большого количества, как двигателей, так и маршрутизаторов никак не повлияет на работу системы.

Описанную сетевую архитектуру можно отнести к гибриднему типу, где некоторые узлы (маршрутизаторы) образуют сетчатую Сеть, а маршрутизатор со своими площадными узлами фактически использует кластерную топологию. Важной задачей, с которой неизбежно сталкивается разработчик WSN, является увеличение времени работы без замены батарей.

Наиболее энергоемкой операцией для беспроводного узла является передача и прием данных.

Мы определяем объем полезной информации, передаваемой шлюзом по сети, состоящей из  $N$  пылинки с  $M$  датчиками каждая, при условии, что для хранения каждого отдельного измерения требуется два байта памяти:  $Q = 2N * M$  (байт). Если необходимая частота измерения равна  $H$  герц, то информационный поток, передаваемый по сети в целом, будет равен:  $S = Q * H * N * M * 2$  (байт / сек). Эта оценка не учитывает тот факт, что служебные данные, которые сопровождают каждое сообщение, передаваемое по сети, увеличивают общий объем данных, передаваемых по сети, примерно в 7-10 раз. Обратите внимание, что это оценка общего потока данных, поступающего в шлюз; для маршрутизаторов и особенно пылинок значения локальных потоков будут намного ниже. Однако непрерывная обработка и широкоэвещательная передача этого потока данных может в некоторых случаях привести к сбою некоторых сетевых компонентов (маршрутизаторов или *motas*). Для того чтобы максимально увеличить срок службы сети, можно применить несколько альтернативных решений, связанных с выбором режимов ее работы. Процесс разработки беспроводной системы мониторинга напряжения включает в себя определение структуры сети, решение двух взаимосвязанных задач - выбор аппаратных компонентов и программного обеспечения.

## **15 О самом исследовании**

В данном исследовании будет рассмотрен метод борьбы с квадрокоптерами посредством беспроводной сенсорной сети и проведен анализ факторов влияющих на эту БСС. Беспроводная сенсорная сеть будет выполнять функцию обнаружения квадрокоптера. Использование данной беспроводной сенсорной сети планируется на объектах, не допускающих на свою территорию работу дронов. Также здесь будут про анализированы факторы, влияющие на расстояние обнаружения дронов, на дальность действия мотов БСС.

Исследования в области технологий микро-электроники, микро-процессоров, беспроводной связи и цифровой электроники позволили создавать недорогие, маломощные, многофункциональные беспроводные сенсорные сети на основе мотов (узлов). Они небольшие и «общаются» непосредственно друг с другом [17]. Мот-это плата размером обычно не больше одной спичечной коробки. На плате есть процессор, память — флэш и оперативная, цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи, радиочастотный приемопередатчик, источник питания и датчики [17]. Вариантов датчиков множество. Исходя из типов установленных датчиков, разнообразное применение самой БСС. Датчики подключаются через цифровые и аналоговые коннекторы. Набор применяемых датчиков зависит от функций,

выполняемых беспроводными сенсорными сетями. Питание мота осуществляется от небольшой батареи[17].

Проблема дронов (квадрокоптеров с видео камерами) достаточно актуально на данное время.

## **16 Особенности данной БСС**

Беспроводная сеть будет оснащаться датчиками, улавливающими радио магнитное излучение в диапазонах **RC433 - 433 МГц** и **RC868 - 868-916 МГц**, излучаемое квадрокоптерами. Зная местоположение датчиков.

Обработывая информацию с датчиков программно можно определить пересечение квадрокоптером периметра и направление движения квадрокоптера.

На охраняемой области по четырем сторонам света будут располагаться датчики фиксирующие мощность излучения сигнала в, котором работают квадрокоптеры. Квадрокоптер летает возле охраняемого периметра, но не пересекает его датчики, фиксируют излучение.

Когда квадрокоптер пересекает периметр, датчики фиксируют мощность излучения его сигнала, она будет максимальной, после пересечения она начнет уменьшаться, а мощность сигнала на другой стороне периметра и по центру, датчиков будет увеличиваться. Сравнивая мощности сигнала на разных датчиках, мы можем определить, пересекал ли квадрокоптер периметр или нет, и примерное его движение.

Данная БСС будет использоваться снаружи, поэтому все её узлы должны быть защищены от климатических факторов. Протокол работы Zig Bee. Режим работы mesh, точка-точка, точка многоточие или звезда в зависимости от условий. Как вариант в качестве мота можно использовать Arduino, Teensy, Netduino и др. Для экономии моты данной БСС можно оснащать дополнительными датчиками, например контроля периметра, климата и т.д.

## **17 Факторы, влияющие на разработку данной модели сенсорной сети**

Из-за особенностей данной БСС, к факторам которые будут влиять на её работу можно отнести отказоустойчивость, масштабируемость, издержек производства, вид операционной среды, топологию сенсорной сети, аппаратные ограничения, модель передачи информации и потребление энергии [21], а также алгоритмы обработки информации. Данные факторы рассматриваются и описываются многими исследователями, но ни в одном исследований полностью они не учтены. Они также влияют на разработку сетей, поскольку служат в качестве ориентира для разработки протокола или алгоритмов работы сенсорных сетей. Кроме того, эти факторы могут быть использованы для сравнения различных моделей [21].

## 17.1 Отказоустойчивость

Узлы БСС могут выйти из строя. Причины выхода из строя отсутствия энергии, физических повреждений или стороннего вмешательства [21]. На работоспособность одного или нескольких узлов не должна влиять на общую работу сенсорной сети. Это характеристика надежности и отказоустойчивости.

Отказоустойчивость - способность поддерживать функциональность сенсорной сети без сбоев при выходе из строя узла [21]. Надежность  $R_k(t)$  или отказоустойчивости узла моделируется с помощью распределения Пуассона для определения вероятности отсутствия неисправности узла в период времени  $(0; t)$  [21].

## 17.2 Масштабируемость

Количество узлов развернутых одновременно для исследования явления или явлений может быть порядка больше сотен. В зависимости от явления или явлений, число может достигать значений (миллионов). Данная модель сенсорной сети будет работать максимально с сотнями узлов.

## 18 Алгоритмы сравнения мощностей

$P$ - мощность излучения в Дб улавливаемое датчиками БСС от дронов.

Если в области датчиков нет источников излучения, то они находятся в спящем режиме. При обнаружении радиоизлучения датчики БСС включаются. После включения датчики постоянно фиксируют мощность излучения и запоминают максимальную мощность излучения. А дальше работают по следующим алгоритмам.

Первый алгоритм, когда у нас всего четыре датчика способных улавливать электромагнитное излучение. Их надо расставить по периметру, как на рисунке 18.1.

Это самый простой и не совсем надёжный алгоритм по моей оценке, так как область полностью не перекрывается, если дронов будет больше одного, нельзя сказать точно пересек ли он охраняемый периметр, и сложно определить векторы движения.

Если  $P_{1max} > P_1(t)$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 1.

Если  $P_{2max} > P_2(t)$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 2.

Если  $P_{3max} > P_3(t)$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 3.

Если  $P_{4max} > P_4(t)$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 4.



Рисунок 18.1 - Пример 1 охраняемой области

Второй алгоритм, когда у нас пять датчиков способных улавливать электромагнитное излучение. Четыре также надо расставить по периметру, а пятый сделать центральным, как на рисунке 18.2.

Это среднее решение по моей оценке, область охраны также полностью не перекрывается, он позволяет определить пересечение периметра, если дронов больше одного, а также определить векторы движения.

Если  $P1_{max} > P1(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц\ max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 1.

Если  $P2_{max} > P2(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц\ max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 2.

Если  $P3_{max} > P3(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц\ max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 3.

Если  $P4_{max} > P4(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц\ max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 4.



Рисунок 18.2 - Пример 2 охраняемой области

Третий алгоритм, когда у нас девять датчиков способных улавливать электромагнитное излучение.

Восемь также надо расставить по периметру, а девятый сделать центральным, как на рисунке 18.3.

Это максимальное решение по моей оценке, область охраны полностью перекрывается, он позволяет определить пересечение периметра, если дронов больше одного, а также позволяет максимально точно определить векторы движения. Если  $P_{1max} > P_1(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 1.

Если  $P_{2max} > P_2(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 2.

Если  $P_{3max} > P_3(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 3.

Если  $P_{4max} > P_4(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 4.

Если  $P_{5max} > P_5(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 5.

Если  $P_{6max} > P_6(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 6.

Если  $P_{7max} > P_7(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 7.

Если  $P_{8max} > P_8(t)$ , а  $P_{ц}(t) = P_{ц max}$ , то пересечение периметра произошло в области расположения датчика 8.

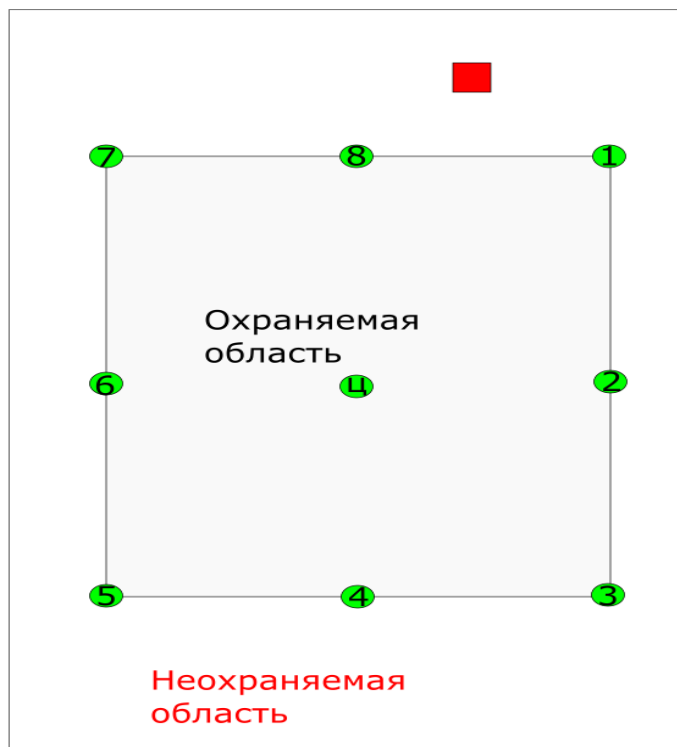


Рисунок 18.3 - Пример охраняемой области

### 18.1 Расчет радиуса действия БСС для Zig Bee

Формула (1) для определения мощности сигнала на входе радиоприемного устройства эмпирическая модель [3].

$$P_{\text{вход}} = P_{\text{вых}} + 20 * \lg(\lambda) - 20 * \lg(4 * \pi) - 20 * \lg(r) \quad (1)$$

где  $P_{\text{вых}}$  - мощность сигнала на выходе передатчика, от  $P_{\text{вых}} = 1$  дБм;  
 $P_{\text{вход}}$  - мощность сигнала на входе радиоприемника должна быть не меньше -95дБм;

$\lambda$  - длина волны радиосигнала 0,125 для диапазона 2,4 ГГц;

$r$  - расстояние между приемником и передатчиком;

Отсюда формула (1) для нахождения радиуса примет вид:

$$r = 10^{\frac{(-P_{\text{вход}} + P_{\text{вых}} + 20 * \lg(\lambda) - 20 * \lg(4 * \pi))}{20}} \quad (2)$$

Расчеты радиуса действия БСС для Zig Bee по формуле 2.

$$r = 10^{\frac{(95 + 1 + 20 * \lg(0,125) - 20 * \lg(4 * 3,14))}{20}} = 627,94 \text{ м.}$$



## 18.2 Расчёт радиуса действия датчиков

Мощность передатчика квадрокоптеров фирмы Dji 20 Дбм, частота его работы 2400 ГГц. Мощность передатчиков энтузиастов может варьироваться от 10 Дбм до 29 Дбм. Чувствительность датчика от -90 до -105 Дбм.

Отсюда по формуле (2) найдем на каком расстоянии датчики смогут обнаружить электромагнитное излучение.

$$r = 10^{\frac{(-P_{\text{вход}} + P_{\text{вых}} + 20 \cdot l \cdot g(\lambda) - 20 \cdot l \cdot g(4 \cdot \pi))}{20}}$$

где  $P_{\text{вых}}$  - мощность сигнала на выходе передатчика, от  $P_{\text{вых}} = 10$  до 29 Дбм;

$P_{\text{вход}}$  - мощность сигнала на входе радиоприемника должна быть не меньше -90 до 105 Дбм;

$\lambda$  - длина волны радиосигнала 0,125 для диапазона 2,4 ГГц;

Таблица 18.1 Сравнение расстояний, на котором датчики фиксируют излучение

$P_{\text{вых}}$	$P_{\text{вход}}$	$\lambda$	$r$	$P_{\text{вых}}$	$P_{\text{вход}}$	$\lambda$	$r$
10	-90,00	0,125	995,22	10	-100,00	0,125	3147,17
11	-90,00	0,125	1116,66	11	-100,00	0,125	3531,18
12	-90,00	0,125	1252,91	12	-100,00	0,125	3962,05
13	-90,00	0,125	1405,79	13	-100,00	0,125	4445,50
14	-90,00	0,125	1577,32	14	-100,00	0,125	4987,93
15	-90,00	0,125	1769,78	15	-100,00	0,125	5596,55
16	-90,00	0,125	1985,73	16	-100,00	0,125	6279,43
17	-90,00	0,125	2228,03	17	-100,00	0,125	7045,64
18	-90,00	0,125	2499,89	18	-100,00	0,125	7905,34
19	-90,00	0,125	2804,92	19	-100,00	0,125	8869,93
20	-90,00	0,125	3147,17	20	-100,00	0,125	9952,23
21	-90,00	0,125	3531,18	21	-100,00	0,125	11166,58
22	-90,00	0,125	3962,05	22	-100,00	0,125	12529,11
23	-90,00	0,125	4445,50	23	-100,00	0,125	14057,90
24	-90,00	0,125	4987,93	24	-100,00	0,125	15773,22
25	-90,00	0,125	5596,55	25	-100,00	0,125	17697,84
26	-90,00	0,125	6279,43	26	-100,00	0,125	19857,31
27	-90,00	0,125	7045,64	27	-100,00	0,125	22280,27
28	-90,00	0,125	7905,34	28	-100,00	0,125	24998,87
29	-90,00	0,125	8869,93	29	-100,00	0,125	28049,19
10	-95,00	0,125	1769,78	10	-105,00	0,125	5596,55
11	-95,00	0,125	1985,73	11	-105,00	0,125	6279,43
12	-95,00	0,125	2228,03	12	-105,00	0,125	7045,64

Продолжение таблицы 18.1

Рвых	Рвход	$\lambda$	г	Рвых	Рвход	$\lambda$	г
13	-95,00	0,125	2499,89	13	-105,00	0,125	7905,34
14	-95,00	0,125	2804,92	14	-105,00	0,125	8869,93
15	-95,00	0,125	3147,17	15	-105,00	0,125	9952,23
16	-95,00	0,125	3531,18	16	-105,00	0,125	11166,58
17	-95,00	0,125	3962,05	17	-105,00	0,125	12529,11
18	-95,00	0,125	4445,50	18	-105,00	0,125	14057,90
19	-95,00	0,125	4987,93	19	-105,00	0,125	15773,22
20	-95,00	0,125	5596,55	20	-105,00	0,125	17697,84
21	-95,00	0,125	6279,43	21	-105,00	0,125	19857,31
22	-95,00	0,125	7045,64	22	-105,00	0,125	22280,27
23	-95,00	0,125	7905,34	23	-105,00	0,125	24998,87
24	-95,00	0,125	8869,93	24	-105,00	0,125	28049,19
25	-95,00	0,125	9952,23	25	-105,00	0,125	31471,71
26	-95,00	0,125	11166,58	26	-105,00	0,125	35311,84
27	-95,00	0,125	12529,11	27	-105,00	0,125	39620,54
28	-95,00	0,125	14057,90	28	-105,00	0,125	44454,98
29	-95,00	0,125	15773,22	29	-105,00	0,125	49879,30

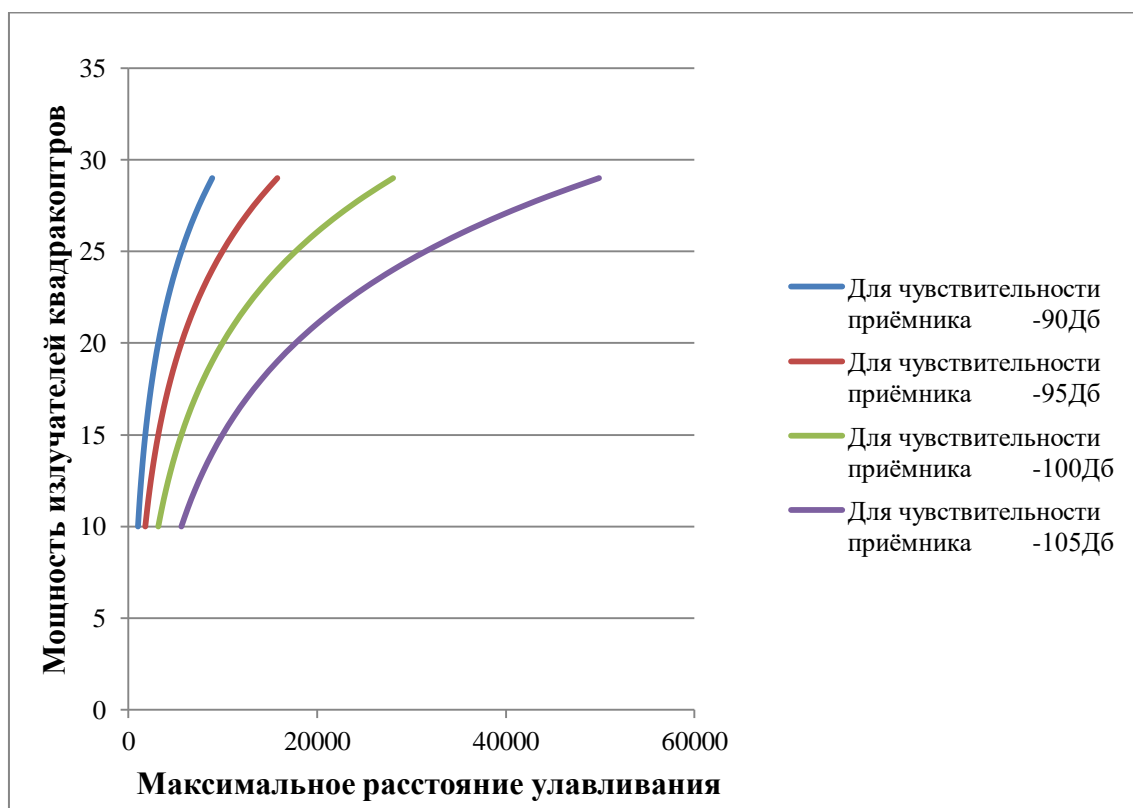


Рисунок 18.4 - График зависимости радиуса действия датчиков от чувствительности приёмника датчиков и мощности передатчика квадрокоптера

### 18.3 Программная реализация в Python для алгоритма 3

Python-это высокоуровневый универсальный язык программирования, ориентированный на повышение продуктивности разработчиков и читабельности кода. Синтаксис Python минималистичен. В то же время стандартная библиотека включает в себя большое количество полезных функций.

Python поддерживает структурное, объектно-ориентированное, функциональное, императивное и аспектно-ориентированное программирование. Основными архитектурными особенностями является динамическая типизация, автоматическое управление памятью, полный самоанализ, Обработка исключений, поддержка многопоточных вычислений и высокоуровневые структуры данных. Он поддерживает разделение программ на модули, которые, в свою очередь, могут быть объединены в пакеты.

Эталонной реализацией Python является интерпретатор CPython, который поддерживает наиболее активно используемые платформы[11]. Он распространяется под свободной лицензией Python Software Foundation, что позволяет использовать его без ограничений в любых приложениях, в том числе и проприетарных[12]. Существует реализация интерпретатора для JVM с возможностью компиляции CLR, LLVM и других независимых реализаций. Проект PyPy использует JIT-компиляцию, что значительно увеличивает скорость выполнения программ на Python.

Python-это быстро развивающийся язык программирования.

Новые версии с добавленными или измененными языковыми свойствами выпускаются примерно каждые два с половиной года. Этот язык не был официально стандартизирован. Роль стандарта де-факто выполняет CPython, который разрабатывается под контролем автора языка. Python в настоящее время занимает третье место в рейтинге TIOBE с рейтингом 8,5%. Аналитики отмечают, что это самый высокий бал Python за все время его присутствия в рейтинге.

Код:

```
f = open("Data.txt", 'r', encoding = 'utf-8') «Открывает текстовый документ с данными полученными от датчиков БСС»
```

```
lst1 = list(f.readline(1))
```

```
lst2 = list(f.readline(2))
```

```
lst3 = list(f.readline(3))
```

```
lst4 = list(f.readline(4))
```

```
lst5 = list(f.readline(5))
```

```
lst6 = list(f.readline(6))
```

```
lst7 = list(f.readline(7))
```

```
lst8 = list(f.readline(8))
```

```
lst_centre = [0, 1, 3, 5, 7]
```

```
«Считывает данные из строк для каждого датчика »
```

```
for i in range(len(lst1)):
```

```

    max1 = max(lst1)
    max2 = max(lst2)
    max3 = max(lst3)
    max4 = max(lst4)
    max5 = max(lst5)
    max6 = max(lst6)
    max7 = max(lst7)
    max8 = max(lst8)
«Поиск максимума для каждого датчика»
    max_centre = max(lst_centre)
    if max1 > lst1[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print t('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 1');
    if max2 > lst2[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 2');
    if max3 > lst3[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 3');
    if max4 > lst4[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 4');
    if max5 > lst5[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 5');
    if max6 > lst6[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 6');
    if max7 > lst7[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 7');
    if max8 > lst8[i] and lst_centre[i] == max_centre:
        print ('Пересечение периметра произошло в области расположения
датчика 8');
«Проверка согласно алгоритму 3»
    elif lst1[i] > 0:
        print ('дрон за периметром 1');
    if lst2[i] > 0:
        print ('дрон за периметром 2');
    if lst3[i] > 0:
        print ('дрон за периметром 3');
    if lst4[i] > 0:
        print ('дрон за периметром 4');
    if lst5[i] > 0:

```

```
print ('дрон за периметром 5');
if lst6[i] > 0:
print ('дрон за периметром 6');
if lst7[i] > 0:
print('дрон за периметром 7');
if lst8[i] > 0:
print ('дрон за периметром 8');
```

## 19 Программы для моделирования

При анализе функционирования многостадийных обслуживающих комплексов БСС одной из ключевых задач является оценка с помощью моделирования. Взаимная зависимость между работы узлов, а также их стохастический характер их длительности не позволяет гарантировать необходимую точность при получении соответствующих оценок искомой случайной величины. Имитация процесса обслуживания позволяет упростить понимание законов распределения различных величин и собрать подробные сведения, оценить их числовые характеристики, рассчитать риски задержки обслуживания и решить целый ряд других необходимых задач.

Исследование специфики решаемой задачи позволило выдвинуть ряд требований, предъявляемых к системе, предназначенной для моделирования многостадийного обслуживания. Анализ же существующих систем моделирования, обусловлен необходимостью разработки модели в подобной системе. С учетом специфики функционирования исследуемых комплексов, а также на основании требований, предъявляемых к системе, была разработана ее структура и определены назначения основных подсистем. Таким образом, разработана система имитационного моделирования, предназначенная для моделирования процесса функционирования многостадийных обслуживающих комплексов и обеспечивающая возможность сбора и анализа статистических данных о случайной величине, описывающей длительность проекта.

Агентное моделирование хорошо подходит для концепции моделирования беспроводных сенсорных сетей. Согласно этому определению, агентное моделирование может быть определено как отдельный случай моделирования, в котором основное внимание уделяется изучению состояния глобальной системы в зависимости от поведения агентов, являющихся компонентами системы. В случае сенсорных сетей наблюдается аналогичный подход, поскольку сетевые узлы распределены по всей территории, активно взаимодействуют с окружающей средой (сбор параметров среды является основной задачей сенсорной сети) и соседними узлами, а поведение и характеристики одного узла сенсорной сети влияют на производительность всей сенсорной сети. В случае традиционного моделирования моделируемая система рассматривается как линейный набор пассивных элементов в общем процессе, и поведение этих элементов заранее определено заранее. В подходе

дискретных событий внимание уделяется конкретному процессу, который уже рассматривается нелинейно, и анализируются этапы конкретного процесса.

В случае моделирования агента каждый сетевой компонент имеет свой собственный сценарий поведения, который влияет на качество задачи. Таким образом, агентское моделирование - это удобный подход для описания систем, состоящих из компонентов, поведение которых неоднозначно и зависит от многих факторов.

Чтобы выполнить моделирование, необходимо определить инструмент, который будет использоваться для разработки модели, и протестировать метод.

### **Anylogic**

Среда моделирования Anylogic является продуктом XJ Technologies. Среда дает возможность использовать различные подходы в современном имитационном моделировании, а именно: моделирование дискретных событий, основанное на агентах, системную динамику.

Anylogic имеет удобный интерфейс и инструменты для анализа данных и представления результатов моделирования: гистограммы, наборы данных, статистика, графики и диаграммы [11].

Субъективно AnyLogic не такой удобный инструмент для моделирования беспроводной сенсорной сети, как для моделирования бизнес-процессов или систем очереди. Из-за отсутствия специализированной библиотеки нужно много программирования, и Anylogic не обеспечивает возможность отладки Java-кода.

### **Glomosim**

Среда моделирования GloMoSim (Global Mobile Information System Simulator) использует язык программирования Parsec. В моделировании используются следующие понятия: сущность, обмен сообщениями, ресурсы.

Сущности обмениваются сообщениями и запрашивают ресурсы, возможно, распараллеливая выполнение программы и поддерживая более 1000 узлов в модели. Среда является представителем дискретного событийного моделирования. GloMoSim является специализированной средой для моделирования беспроводных и adhoc сетей.

### **GPSS World**

Язык моделирования GPSS World (GPSS от англ. General Purpose Simulation System), используемый для имитационного моделирования различных систем, в основном систем массового обслуживания.

Система имитационного моделирования общего назначения дискретных и непрерывных систем, разработанная компанией Minuteman Software. Основное применение в моделировании систем, которые можно свести к системам массового обслуживания. Основными компонентами моделирования являются очереди, заявки, обслуживающие приборы, и прочее.

Задачу моделирования протокола сенсорной сети достаточно сложно свести к СМО, но использование GPSS World будет актуально при

исследовании потока информации, который обрабатывается каждым узлом сети.

### **Matlab**

Matlab - один из мощнейших на сегодняшний день пакетов обработки данных. Название расшифровывается как Matrix Laboratory. В переводе на русский язык Матричная Лаборатория.

Возможности программы охватывают практически все области математики. Итак, используя Matlab, мы можем:

- выполнять различные операции над матрицами, решать линейные уравнения и работать с векторами;

- вычислять корни полиномов любой степени, выполнять операции над многочленами, дифференцировать, экстраполировать и интерполировать кривые, а также строить любые функции;

- решайте дифференциальные уравнения. В частных производных, линейных, нелинейных, с граничными условиями-неважно, Matlab все решит;

- выполнение статистического анализа данных с использованием цифровой фильтрации, статистической регрессии;

- выполнять целочисленные арифметические операции.

Кроме всего этого, функции Matlab позволяют визуализировать данные вплоть до построения трехмерных графиков и создания анимированных видеороликов.

Наше описание Matlab, конечно, далеко не полный. Кроме возможностей и функций, предоставляемых производителем, существует огромное количество инструментов для Matlab, написанных энтузиастами или другими компаниями.

Matlab как язык программирования - это язык программирования, который используется непосредственно при работе с программой. Программы, написанные в Matlab, бывают двух типов функции и скрипты.

Такой мощный пакет применяется не только в учебе, не только облегчение расчётов студентов, также применяется в науке.

В настоящее время Matlab очень популярен среди специалистов во многих научных и инженерных областях. С другой стороны, возможность работы с большими матрицами делает Matlab незаменимым инструментом для финансовых аналитиков, который позволяет решать гораздо больше задач, чем, например, хорошо известный Excel. Дополнительные сведения о том, как сделать презентацию на компьютере, см. в обзорной статье.

Matlab - это высокоуровневый язык программирования и одноименное среда для моделирования, а также для научных и инженерных расчетов, которая базируется на интерпретаторе родного языка Matlab. Алгоритмы, выполняемые в Matlab, в основном используют векторы и матрицы для обработки больших наборов данных.

Привлекательность среды для решения этих задач заключается в наличии инструментов и наборов инструментов, а также редактора визуального моделирования. Matlab позволяет решать широкий спектр задач

от обработки больших массивов данных, моделирования СФУ, сетей и алгоритмов автоматического управления. Именно наличие специализированных инструментов является основной причиной выбора Matlab как инструмента для моделирования вычислений в беспроводной сенсорной сети.

Возможность обработки больших массивов данных позволит оценить разработанный метод на большом количестве узлов.

Следующие преимущества Matlab по сравнению с другими моделирующими средами:

- может работать с большими объемами данных;
- имеются инструменты для визуализации сенсорной сети;
- может работать с беспроводными сетями, которые выбраны в качестве метода автоматического управления;
- имеются инструменты для работы со статистикой и графиками.

Существуют системы моделирования конкретно БСС. Основных их шесть инструментов моделирования: NS-2, TOSSIM, Emstar, Castalia, J-Sim, АТЕМУ, и анализируются преимущества и недостатки каждого инструмента моделирования.

**Система NS-2** была разработана в 1989 году и используется в качестве реального сетевого симулятора. NS-2 - это дискретный симулятор событий, построенный в объектно-ориентированном стиле. Разработан на языке C++. Он работает в операционной системе Linux. Его можно использовать как для проводных, так и беспроводных сетей. Это система с открытым исходным кодом.

Преимущества и недостатки.

К преимуществам, во-первых, как неспецифический имитатор NS-2 для WSN можно отнести поддержку широкого спектра протоколов на всех уровнях.

Например, NS-2 предоставляет специальные и специфические протоколы WSN. Во-вторых, для данной системы открыт исходный код, что позволяет экономить затраты на моделирование, и пользователи легко могут изменять и совершенствовать систему.

Однако также есть недостатки у данного симулятора. В-первую очередь, пользователи, которые используют этот симулятор, владеют знаниями с написанием программ на скриптовых языках. Во-вторых, использование NS-2 может является более сложным и трудоемким, чем использование другие системы моделирования. В заключение NS-2 обеспечивает плохую графическую поддержку, без графического пользовательского интерфейса (GUI).

**Система TOSSIM** - это эмулятор, специально разработанный для WSN, что работает на TinyOS, который распространяется с открытым исходным кодом. Разработан в 2003 году. Он написан на Python и C++. Он работает на операционной системе Linux. TOSSIM также распространяется в исходном коде.



Преимущества и недостатки.

К их преимуществам можно отнести скорость эмуляции. Кроме того, TOSSIM имеет графический интерфейс TinyViz, который очень удобен для взаимодействия с электронными устройствами, так как предоставляет изображения вместо текста команд.

Кроме того, TOSSIM-очень простой, но мощный эмулятор для WSN. Каждый узел можно оценить при идеальных условиях передачи, и с помощью этого эмулятора можно исследовать скрытые проблемы. Он может поддерживать тысячи узлов.

Однако также есть недостатки у данного эмулятора. Во-первых, TOSSIM предназначен для моделирования поведения и применения TinyOS, и он не предназначен для моделирования производительности других новых протоколов. Поэтому TOSSIM не может правильно моделировать проблемы энергопотребления в WSN, люди могут использовать Power TOSSIM, еще один симулятор TinyOS. Во-вторых, каждый узел должен работать в коде Nesc, языке программирования, который руководствуется событиями на основе компонентов и реализуется в TinyOS. В-третьих, TOSSIM разработан специально для моделирования только узлов.

**Система Emstar** это эмулятор, специально разработанный для WSN, встроенный в язык C. Работает в операционной системе Linux. Этот эмулятор поддерживает расширенные возможности для работы с аппаратными датчиками.

Преимущества и недостатки

Преимущества: Модульная модель программирования позволяет пользователям запускать каждый модуль отдельно без ущерба для повторного использования программного обеспечения. Эмулятор имеет графический интерфейс, который может быть очень полезен пользователям для управления электронными устройствами.

Однако также есть недостатки у данного эмулятора. Emstar не поддерживает большое количество узлов и их датчиков, что в результате сказывается на масштабируемость. Emstar может работать только в реальном времени.

**Система Castalia** это дискретный симулятор, основанный на событиях. Написано на языке C++. Castalia распространяется по некоммерческой лицензии, для использования в образовательных учреждениях или некоммерческих научно-исследовательских организациях, а также по коммерческой лицензией. Этот симулятор поддерживает написание модулей самим Пользователем. Он работает на Linux и Unix-подобных операционных системах. Castalia-это популярная система моделирования WSN. Большая часть исходного кода может быть доступна в его первоначальном виде.

Преимущества и недостатки

Преимущества, во-первых, Castalia предоставляет мощные средства трассировки и отладки. Он поддерживает широкий спектр возможностей

радиоканала и поддерживает множество протоколов MAC. Кроме того, Castalia может имитировать проблемы энергопотребления в WSN.

Однако есть и некоторые ограничения. Например, количество доступных протоколов недостаточно велика.

**Система J-SimSim** это дискретный симулятор событий, написан на Java. Имеется графический интерфейс. Распространяется в исходном коде. Он широко используется в физиологии и области биомедицины, но также может быть использован для моделирования БСС. Кроме того, J-Sim может моделировать процессы в реальном времени.

Преимущества и недостатки

Преимущества: Модель J-Sim может повторно использовать и взаимозаменять свои компоненты. J-Sim имеет огромное количество протоколов. J-Sim имеет графический интерфейс, который может помочь пользователям отслеживать и отлаживать программы. В заключение, по сравнению с NS-2, J-Sim может имитировать больше по количеству сенсорных узлов, около 500 и J-Sim может сэкономить много оперативной памяти.

Однако также есть недостатки у данного симулятора. Время выполнения больше, поскольку J-Sim изначально не предназначен для моделирования WSN.

**Система АТЕМУ** построена на C языке; создана под платформу MICA. АТЕМУ имеет графический интерфейс. Работает в операционных системах Solaris и Linux. Имеет открытый в исходный код.

Достоинства и недостатки

Достоинства, Может имитировать несколько датчиков на узле. Имеет огромную библиотеку законченных устройств. Имеет возможность обеспечить очень высокий уровень детализации эмуляции БСС. В заключение, простой графический интерфейс может помочь пользователям в отладке и мониторинге реализации модели.

Также есть недостатки у данного эмулятора АТЕМУ может дать высокую точность результатов, но время моделирования гораздо дольше, чем у аналогичных систем моделирования. Кроме того, система АТЕМУ по функционалу для моделирования маршрутизации имеет меньше возможностей.

ГИ - графический интерфейс;

ЯП – язык программирования;

ТАУ- теория автоматического управления;

ИМ- имитационное моделирование;

АМ- агентное моделирование

Таблица 19.1 - Инструменты моделирования

Среда	Специфика	Виды	Способы	Разработчик, дата выпуска
Anylogic	Моделирование бизнес процессов, СМО	ИМ, ДСМ	ГИ, ЯП Java	XJ Technologies, 2000
Glomosim	Локальные /беспроводные сети	ИМ	Parsec	Parallel Computing, Laboratory UCLA, USA
GPSS World	СМО	ИМ	ЯП, GPSS	IBM, Wolverine Software, Minuteman Software, USA, 1996
Matlab	Анализ больших данных, разработка алгоритмов	ИМ	ГИ, ЯП Matlab	MathWorks, USA, 1984

Таблица 19.2 - Сравнение шести основных систем моделирования БСС

Система	Дискретно-событийная система иначе основанная на трассировке	Графический интерфейс пользователя	Открытый в исходный код	Специально-предназначен для БСС, иначе общий	Особенности
1	2	3	4	5	6
NS-2	Да	Нет	Да	Нет	1. Не более 100 узлов. 2. Не может имитировать проблемы пропускной способности или потребление электроэнергии в БСС.
TOSSIM	Да	Да	Да	Да	1. Около тысяч узлов. 2. Только однородные приложения.

Продолжение таблицы 19.2

1	2	3	4	5	6
Emstar	Нет	Да	Да	Да	1. Не поддерживает большое количество узлов. 2. Работает только в режиме реального времени и только узлы MICA2.
Castalia	Да	Да	Да	Да	1. Поддержка протоколов MAC. 2. Симуляция потребляемой мощности и канала. 3. Расширенная эмуляция радиоканала.
J-Sim	Да	Да	Да	Нет	1. Может имитировать большое количество узлов датчиков, около 500. 2. Может имитировать радиоканалов и потребляемой мощности. 3. Время его работы гораздо больше.
ATEMU	Да	Да	Да	Да	1. Может эмулировать различные узлы в однородных сетях или гетерогенных сетях. 2. Симуляция потребляемой мощности и радиоканалов. 3. Время моделирования гораздо дольше.

Я рассмотрел различные способы моделирования БСС. И сравнил их достоинства и недостатки, результаты приведены в таблице 19.1 и 19.2.

Выбор системы стоит проводить в зависимости от целей исследования, выбирая более эффективную, для данного случая.

В результате проведения обзора и анализа инструментов моделирования, я остановил свой выбор на среде Matlab, из-за наличия инструментов для работы с большими объемами данных, инструментов визуализации, работы со статистикой.

Узлы соединяются друг с другом не напрямую, а через модуль беспроводного канала. Стрелки указывают на передачу сообщений от одного модуля к другому. Если у узла есть пакет для отправки, он идет к беспроводному каналу, который затем решает, какие узлы должны получить пакет. Узлы также связаны с физическими процессами, которыми они управляют. Для каждого физического процесса существует один модуль.

Узлы взаимодействуют с физическим процессом в пространстве и времени (посылая сообщение соответствующему модулю) для получения показаний датчиков. Там может быть несколько физических процессов, представляющих несколько датчиков.

## **20 Модель расчёта потребления беспроводной сенсорной сети в режиме точка многоточие**

Здесь представлено сравнение способов инсталляции сенсорных узлов для покрытия заданной области при использовании различных способов: случайного размещения и детерминированного размещения. Рассмотрены методы повышения энергоэффективности сенсорных узлов при обнаружении квадрокоптера.

Рассмотрены два аспекта функционирования БСС: во-первых, обеспечение покрытия территории, для чего используется алгоритм случайной инсталляции сенсорных узлов и последующей оценкой качества покрытия заданной области. Во-вторых, повышение энергоэффективности сети, для чего использован метод повышения энергоэффективности сенсорных узлов.

Как известно, существует два основных способа инсталляции узлов в беспроводной сенсорной сети: случайное размещение и детерминированное размещение [3]. Случайное размещение обычно используются для крупномасштабных БСС не только потому, что это требует меньших затрат, но также и потому, что в ряде случаев, такой способ может быть единственно возможным.

Однако случайное размещение сенсорных узлов может привести к появлению неконтролируемых зон; поэтому, в большинстве случаев, случайное размещение, не будет эффективно для достижения максимального покрытия [4].

Рассмотрена вероятность покрытия при случайном размещении сенсорных узлов на заданной территории. Мы использовали двоичную модель, которая рассмотрена и приведена в приложении А. В этой модели, каждый сенсорный узел имеет одинаковый и постоянный радиус действия сенсора. Область обслуживания накроем сеткой линий  $n \times m$ , с размером каждой ячейки сетки равной 1. Двоичная модель предполагает, что доля покрытия области в границах обслуживания аппроксимируется долей покрытых узлов сетки. Покрытие всей области пропорционально числу покрытых узлов решетки. Для описания покрытия узлов сетки  $G(x, y)$  введем двоичную функцию, значение которой равно 1, если узел попадает в зону покрытия сенсора

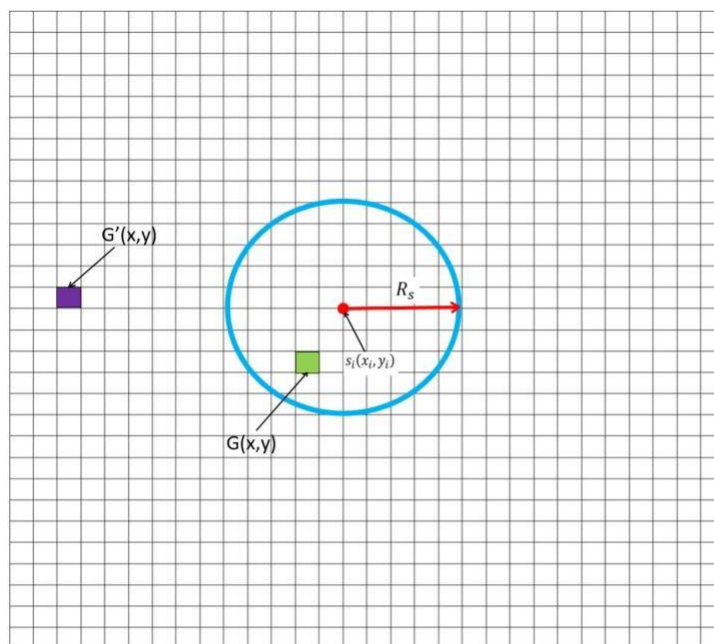


Рис. 20.1 - Покрытие узлов сетки сенсорным узлом

Рассмотрим модели беспроводных сенсорных сетей с расстановкой случайным и детерментным способом. Модели будем оценивать по остаточной энергии за 2000 циклов, что примерно должно хватить на год при опросе пять раз в сутки.

В первой модели сенсорные узлы распределены равноудалено от центра и друг от друга на плоскости размером 250м\*250м. Число узлов в сети составляет девять, и базовая станция находится на границе сенсорного поля с координатами (150, 150)м (рисунок 20.2). Главный узел имеет постоянный источник энергии. Остальные узлы запитываются от кроны 9V с запасённой энергией в 8,5 Дж. Время жизни модели 2000 циклов.

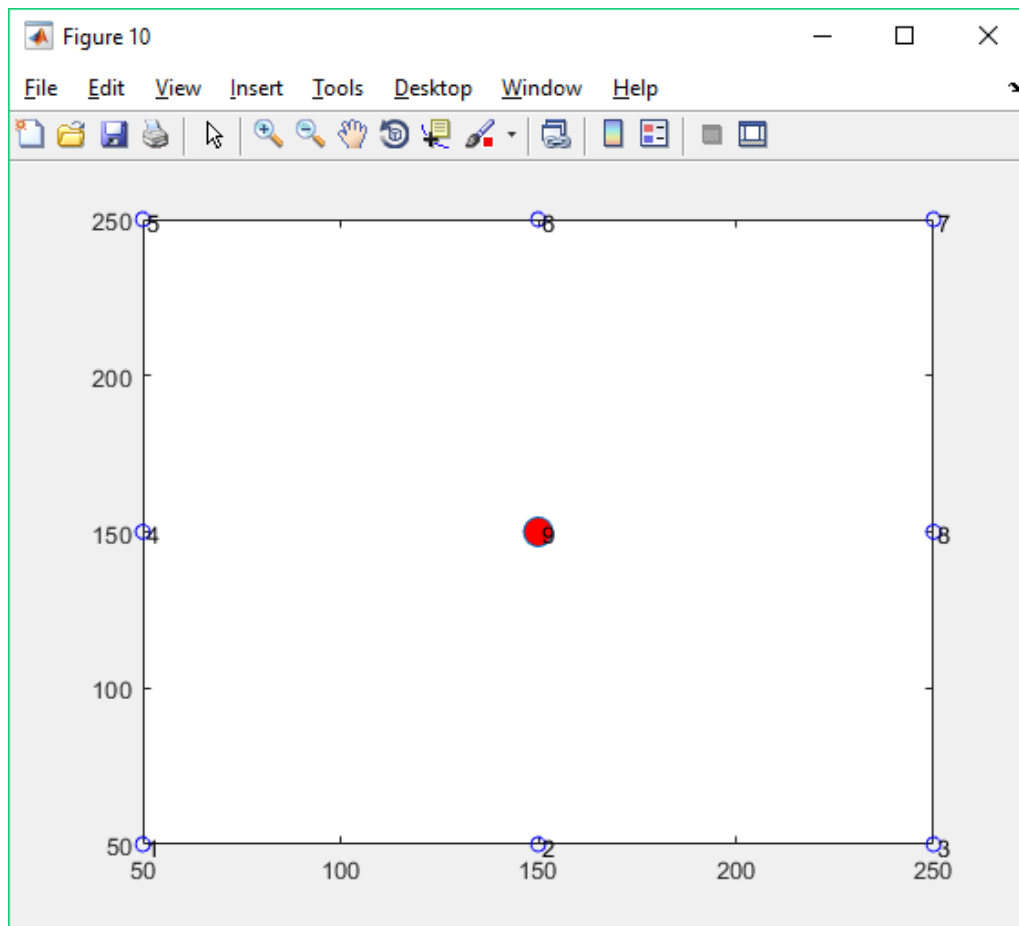


Рисунок 20.2 - Беспроводная сенсорная сеть модель первая в матлабе

Таблица 20.1 - Состояние датчиков

Номер узла	Координаты узла по x	Координаты узла по y	Расстояние от главного	Остаток энергии на 2000 циклов
1	50	50	141,42	4,79
2	150	50	100	7,37
3	250	50	141,42	4,79
4	50	150	100	7,37
5	50	250	141,42	4,78
6	150	250	100	7,37
7	250	250	141,42	4,79
8	250	150	100	7,37
Главный узел	150	150	[]	[]

Судя по таблице 20.1, полученной в матлабе, у нас для этой модели образуются две группы. Одна группа с расстоянием от центра в 141 м и остатком энергии 4,79 Дж. Вторая группа с расстоянием в 100 м и остатком энергии 7,37 Дж.

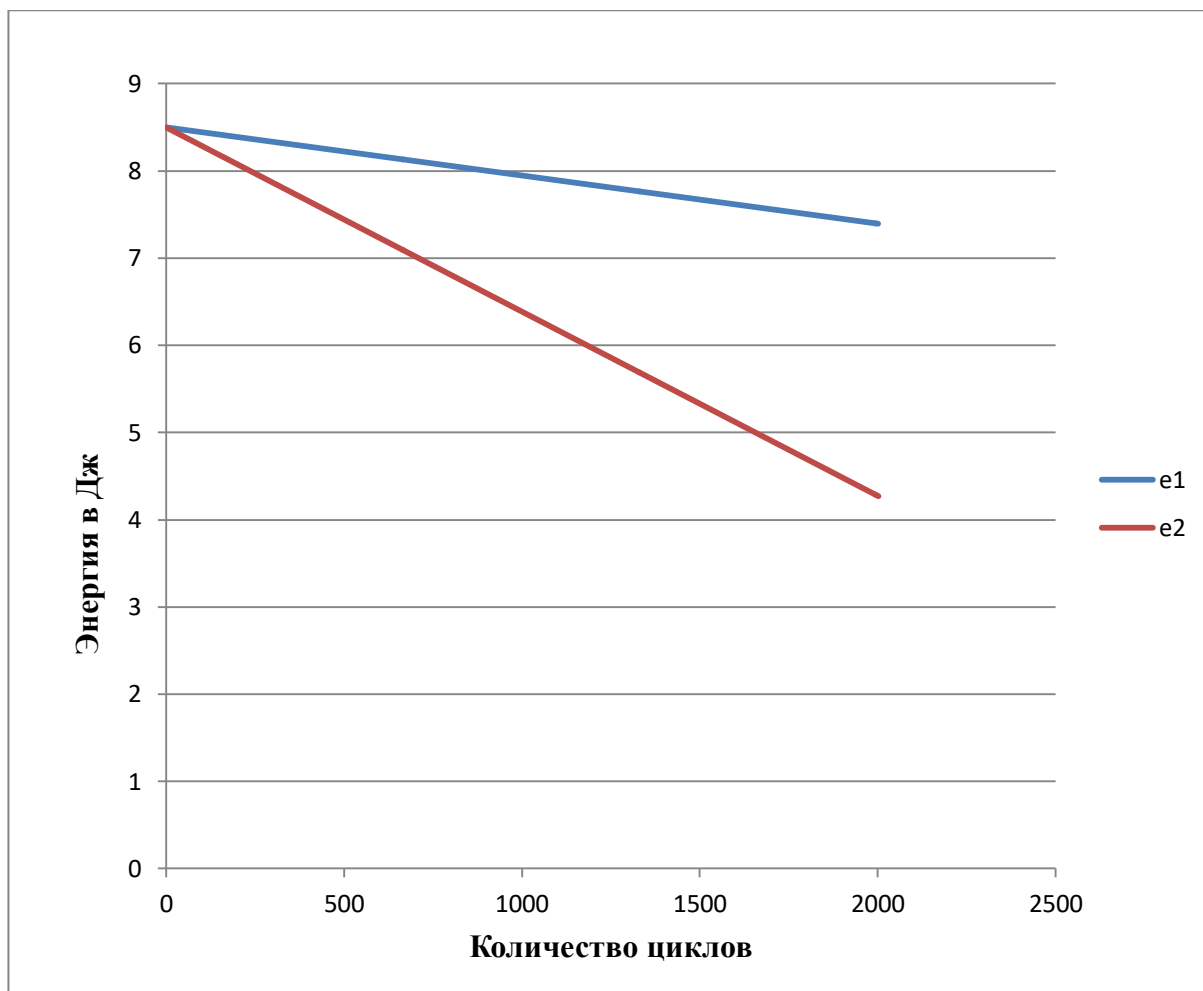


Рисунок 20.3 - Изменение энергии за 2000 циклов для двух групп датчиков

Во второй модели сенсорные узлы распределены случайно, удалено от центра и друг от друга на плоскости размером 250м\*250м. Число узлов в сети составляет девять, и базовая станция находится на границе сенсорного поля с координатами (150, 150) м (рисунок 20.4). Главный узел имеет постоянный источник энергии. Остальные узлы запитываются от кроны 9V с запасённой энергией в 8,5 Дж. Время жизни модели 2000 циклов.



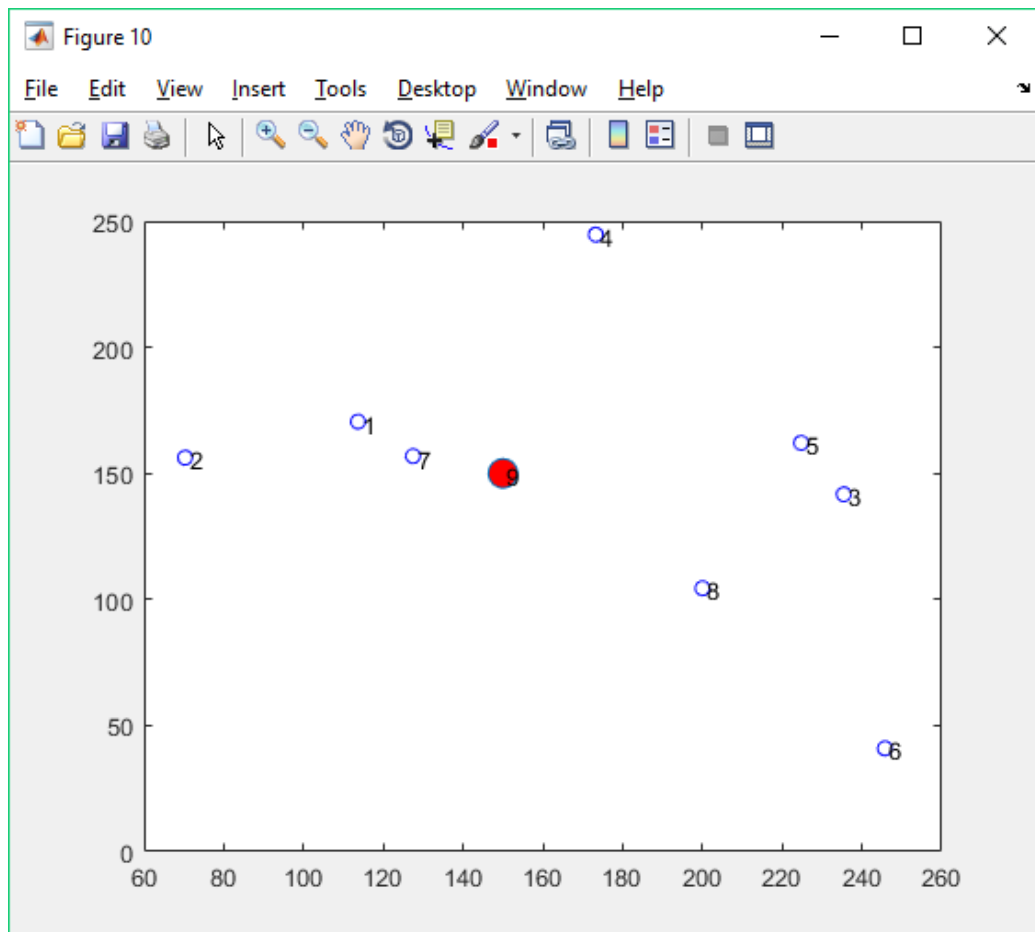


Рисунок 20.4 - Беспроводная сенсорная сеть модель вторая в матлабе

Таблица 20.2 - Состояние датчиков

Номер узла	Координаты узла по x	Координаты узла по y	Расстояние от главного	Остаток энергии на 2000 циклов
1	113,66	170,52	41,73	8,27
2	70,315	156,22	79,92	7,97
3	235,43	141,7	85,83	7,89
4	173,28	244,65	97,46	7,50
5	224,78	162,12	75,75	7,98
6	245,73	40,954	145,1	4,65
7	127,45	156,84	23,56	8,37
8	200	104,44	67,64	8,05
Главный узел	150	150	[]	[]

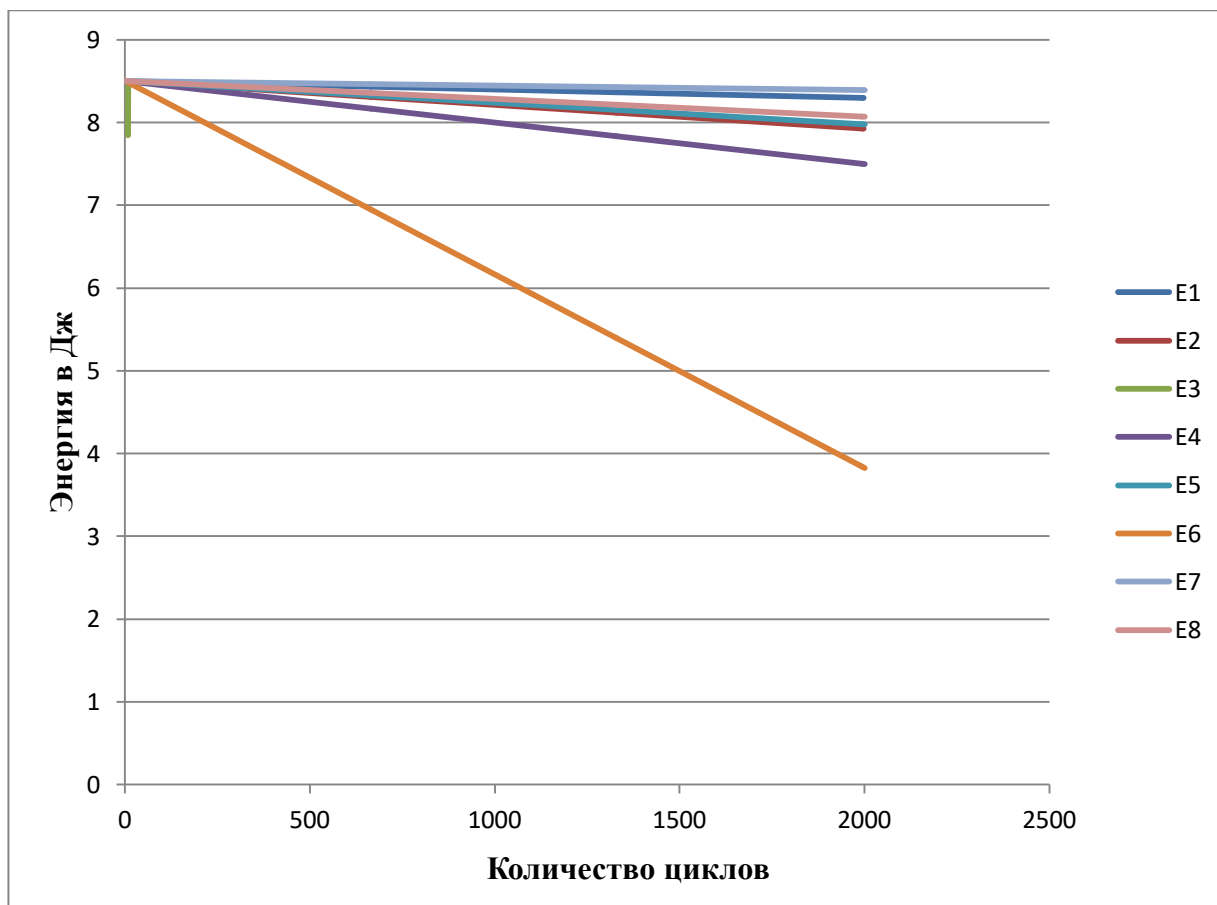


Рисунок 20.5 - Изменение энергии за 2000 циклов для восьми датчиков

Во второй модели нет определённых групп, потому что большой разброс. Он нам не подходит из-за не полного охвата охраняемой области. По таблице 19.2 видно, чем больше расстояние, тем меньше энергии.

В третьей модели сенсорные узлы распределены равноудалено от центра и друг от друга на плоскости размером 250м\*250м. Число узлов в сети составляет пять, и базовая станция находится на границе сенсорного поля с координатами (150, 150)м (рисунок 20.6). Главный узел имеет постоянный источник энергии. Остальные узлы запитываются от кроны 9V с запасённой энергией в 8,5 Дж. Время жизни модели 2000 циклов.

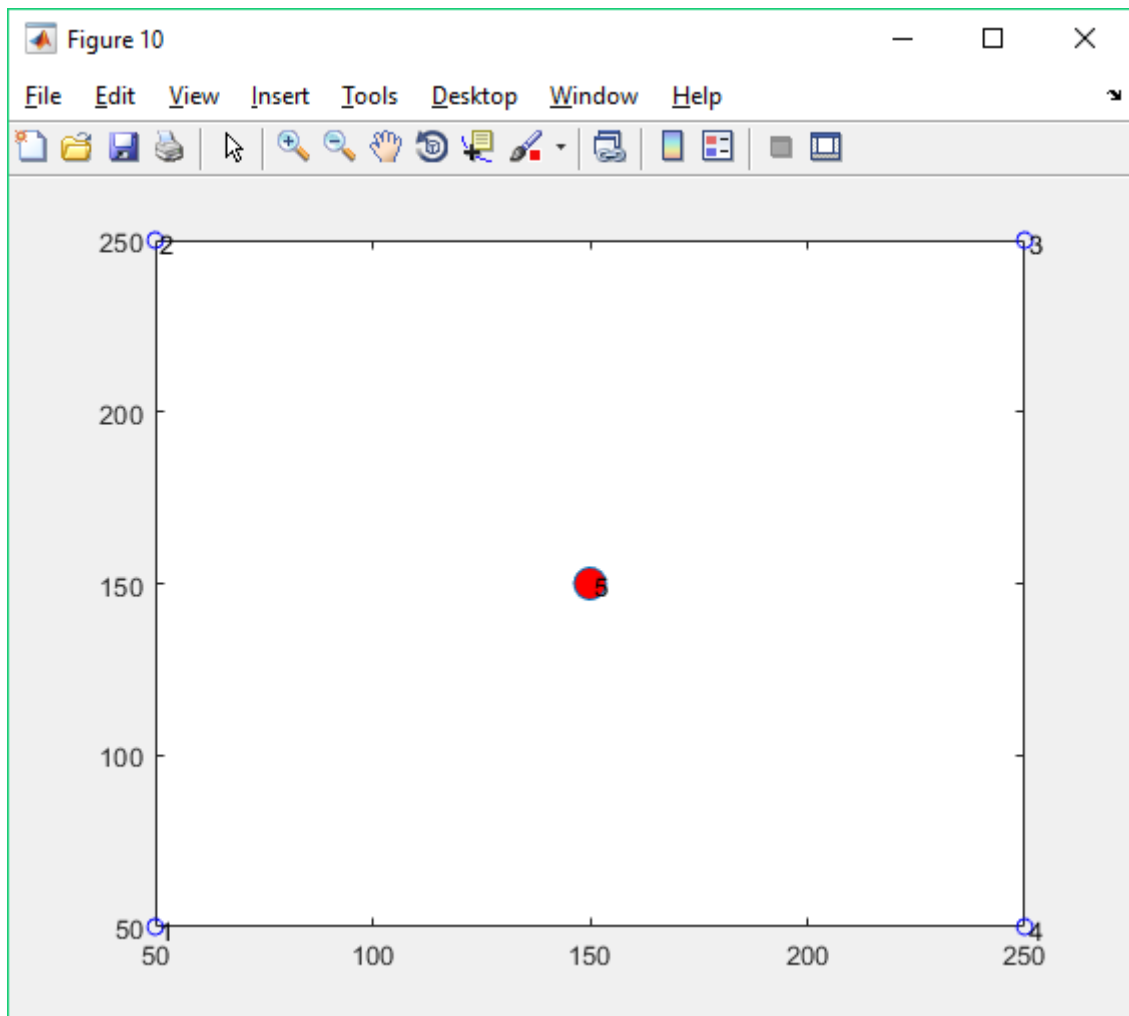


Рисунок 20.6 - Беспроводная сенсорная сеть модель третья в матлабе

Таблица 20.3 – Состояние датчиков

Номер узла	Координаты узла по x	Координаты узла по y	Расстояние от главного	Остаток энергии на 2000 циклов
1	50	50	141,42	4,30
2	50	250	141,42	4,30
3	250	250	141,42	4,30
4	250	50	141,42	4,30
Главный узел	150	150	[]	[]

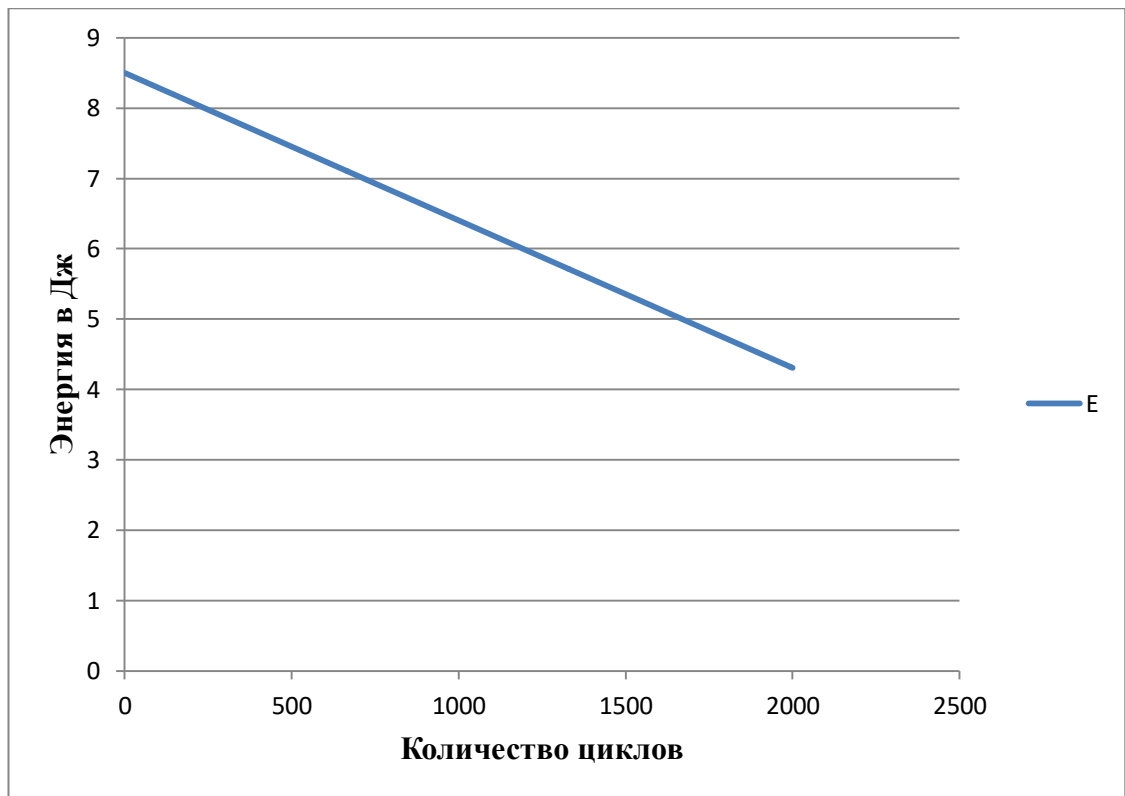


Рисунок 20.7- Изменение энергии за 2000 циклов для 1 группы датчиков

В третьей модели одна группа датчиков, так как они равноудалены от центра.

В четвертой модели сенсорные узлы распределены случайно, удалено от центра и друг от друга на плоскости размером 250м\*250м. Число узлов в сети составляет пять, и базовая станция находится на границе сенсорного поля с координатами (150, 150) м (рисунок 20.8). Главный узел имеет постоянный источник энергии. Остальные узлы запитываются от кроны 9V с запасённой энергией в 8,5 Дж. Время жизни модели 2000 циклов.

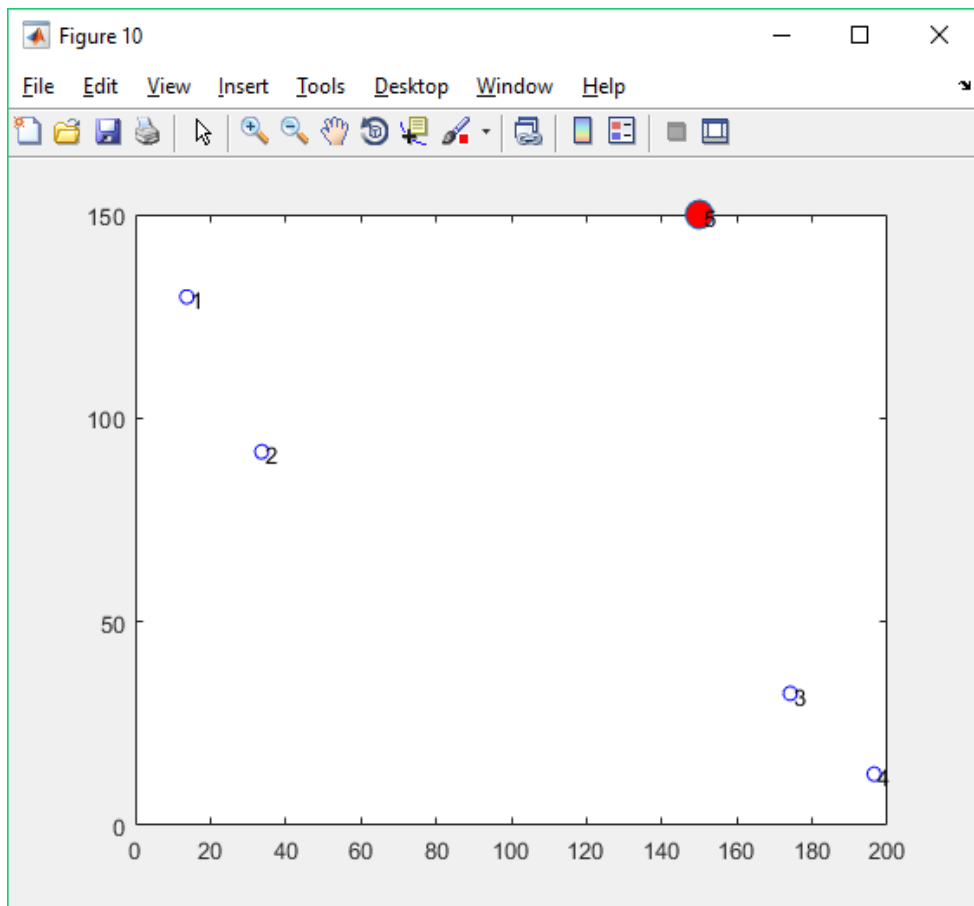


Рисунок 20.8 - Беспроводная сенсорная сеть модель четвертая в матлабе

Таблица 20.4 - Состояние датчиков

Номер узла	Координаты узла по x	Координаты узла по y	Расстояние от главного	Остаток энергии на 2000 циклов
1	13,71	129,78	137,78	5,04
2	33,63	91,743	130,13	5,73
3	174,15	32,39	120,05	6,48
4	196,46	12,57	145,06	4,25
Главный узел	150	150	[]	[]

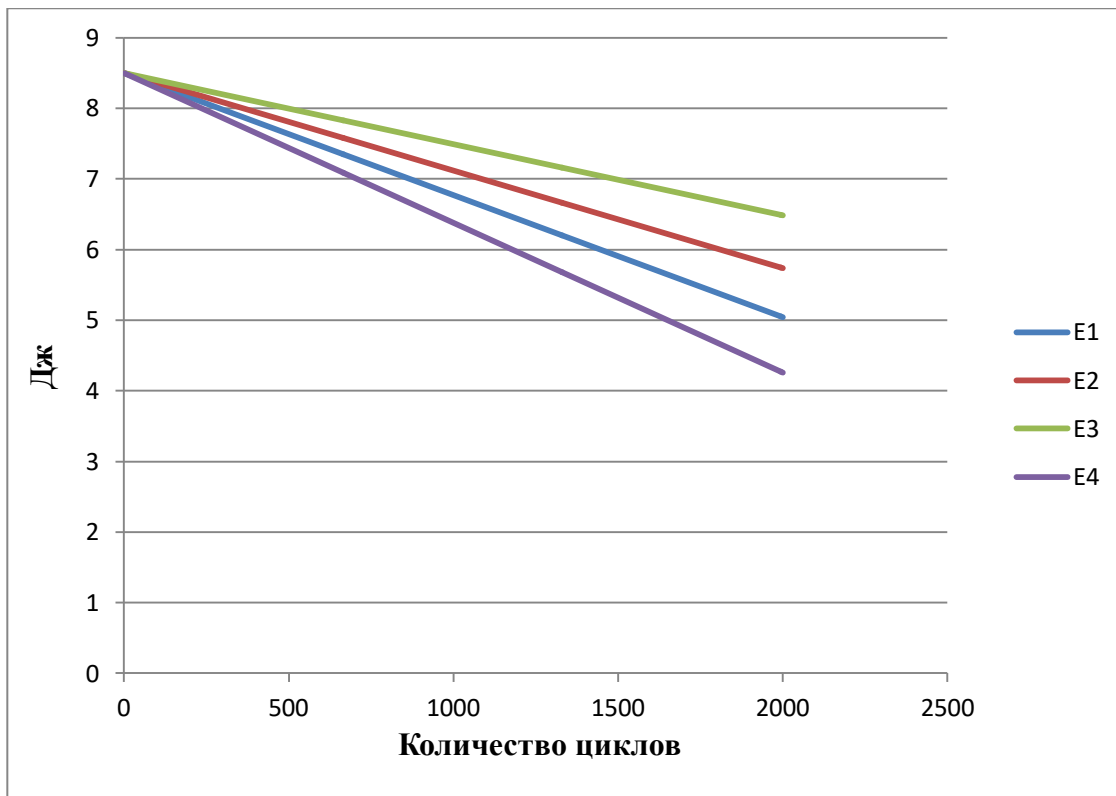


Рисунок 20.9 - Изменение энергии за 2000 циклов для четырех датчиков

## 21 Промежуточные выводы

Из анализа моделей видим, что при таком количестве датчиков в нашем случае лучшее детерминированный способ расстановки датчиков. Он лучше подходит для размещения на конкретной охраняемой области, так как датчики равномерно покрывают охраняемый периметр. При случайном распределении видно, где датчики даже не покрывают охраняемый периметр, а более того сгруппировались в одной области. По расстоянию в детерминированном способе расстановки две группы датчиков были равноудалены от центра. Что сказалось положительно на остатке электроэнергии, и на предсказание выхода из строя датчиков из-за недостатка её, так у нас образовалось две группы одна из которых выходит из строя чуть быстрее. У второй модели расстояние от центра для каждого разное. Это также отразилось на энергии, где остаток у каждого датчика на конец моделирования разный.

## Заключение

Сама технология беспроводных сенсорных сетей довольно интересная и разносторонняя, так как применить её можно практически во всех сферах жизни человеческого общества. Характерными плюсами её перед другими технологиями является дешевизна, нетребовательность к энергии, возможность применения на любой местности и многое другое. К минусам могу отнести только, то, что необычные требования к применению сенсорных сетей делают выбор среды передачи сложной. В труднодоступной местности или во время военных действий могут возникнуть ошибки и большие помехи, или может оказаться что, антенны узлов не обладают нужной высотой и мощностью излучения для связи с другими устройствами. Следовательно, выбор передающей среды должен сопровождаться надежными схемами модуляции и кодирования, это напрямую зависит от характеристик передающего канала.

В магистерской диссертации описан алгоритм работы, сравнения мощностей улавливаемого будет выполнять функцию детектора дронов БСС. На качество работы алгоритма будет влиять расположение датчиков согласно схеме и радиус обнаружения, электромагнитное излучение, которое было рассчитано в таблице 18.1.

Доказано, что чем лучше чувствительность датчиков, тем на наибольшем расстоянии они могут улавливать электромагнитное излучение. Для чувствительности приемника в -90 ДБ, и минимальной мощности электромагнитного излучение квадрокоптера он составил 995 м, а для чувствительности в -105 Дб - 5596 м притом же излучении. Данное исследование проводилось с целью выявить возможность уменьшения количества мотов, используя более чувствительные датчики действительно можно уменьшить их количество, так как они будут покрывать большую зону, и с целью оценки эффективности работы данной БСС. Из-за протокола Zig Bee расстояние между мотами БСС должно быть меньше 627 м. Отсюда протокол Zig Bee не подходит для такого типа БСС, если расстояние между мотами большее 627 м без учета препятствий.

В результате данной работы получена сравнительная характеристика случайного и детерминированного методов размещения узлов сенсорной сети с целью обеспечения покрытия зоны обслуживания. Было доказано, что детерминированный способ размещения узлов, при условии достаточно точного размещения узлов обеспечивает большую эффективность.

Результаты проведенного анализа показали, что при ограниченной точности размещения узлов, а также при менее жестких требованиях к доле покрытия, случайное размещение узлов может быть сопоставимо по эффективности с детерминированным.

Разработан метод организации беспроводной сенсорной сети при детерминированном размещении узлов для выполнения операций сбора данных.

Предложенный метод кластерной организации сети позволяет существенно снизить энергозатраты сети на работу по сбору данных.

В дальнейших исследованиях, предполагается исследовать модели случайного размещения сенсорных узлов, обеспечивающие покрытие заданной области большим количеством узлов и методы минимизации расхода энергии в таких сетях.

Полученные результаты могут быть использованы в охранных системах безопасности, в защите военных объектов и объектов государственной важности не допускающих на свою территорию проникновение дронов и т.д.



## Список сокращений

АМ - Агентное моделирование.  
АЦП - Аналого-цифровой преобразователь.  
БСС - Беспроводная сенсорная сеть.  
БС - Базовые станции.  
ГИ - Графический интерфейс.  
ИМ - Имитационное моделирование.  
ОС - Операционная система.  
ТАУ - Теория автоматического управления.  
ЦМ - Центр маршрутизации.  
ЯП - Язык программирования.  
AMQP -Advanced Message Queuing Protocol.  
DSSC - Dye-sensitized solar cells.  
CoAP - Constrained Application Protocol.  
GPSS - General Purpose Simulation System.  
IN - Идентификационный номер.  
Internet IETF - Internet Engineering Task Force.  
Matlab - Пакет прикладных программ для решения задач.  
MQTT - Message Queue Telemetry Transport.  
REST- Representational State Transfer.  
Python-Это быстро развивающийся язык программирования.  
WSN -Wireless sensor network.

## Список литературы

1. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN. - СПб.: БХВ-Петербург, 2013. -160 с.
2. Гольдштейн Б.С., Соколов Н.А., Яновский Г.Г. Сети связи. –СПб.: БХВ-Петербург, 2010. – 400 с.
3. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи.- М.: Высшая школа, 2009.
4. Немировский М.С., Шорин О.А., Бабин А.И., Сартаков А.Л. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма. – М.: Эко-Трендз, 2009. – 400 с.
5. Кучерявый Е.А. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей/ Е,А. Кучерявый, В.В. Кондратьев и другие// Электросвязь, 2006-№6- с10-15.
6. Технология Zig Bee /URL [http: www. spektron-video. ru/ zig\\_bee.html](http://www.spektron-video.ru/zig_bee.html).
7. G.D. Abowd, J.P.G. Sterbenz, Final report on the interagency workshop on research issues for smart environments, IEEE Personal Communications (October 2000) 36-40.
8. Agre, L. Clare, An integrated architecture for cooperative sensing networks, IEEE Computer Magazine (May 2000) 106-108.
9. I.F. Akyildiz, W. Su, A power aware enhanced routing (PAER) protocol for sensor networks, Georgia Tech Technical Report, January 2002, submitted for publication.
10. A. Bakre, B.R. Badrinath, I-TCP: indirect TCP for mobile hosts, Proceedings of the 15th International Conference on Distributed Computing Systems, Vancouver, BC, May 1995, pp. 136-143.
11. P. Bauer, M. Sichitiu, R. Istepanian, K. Premaratne, The mobile patient: wireless distributed sensor networks for patient monitoring and care, Proceedings 2000 IEEE EMBS International Conference on Information Technology Applications in Biomedicine, 2000, pp. 17-21.
12. M. Bhardwaj, T. Garnett, A.P. Chandrakasan, Upper bounds on the lifetime of sensor networks, IEEE International Conference on Communications ICC'01, Helsinki, Finland, June 2001.
13. P. Bonnet, J. Gehrke, P. Seshadri, Querying the physical world, IEEE Personal Communications (October 2000) 10-15.
14. Haenselmann T. (2006-04-05) Sensor networks, GFDL Wireless Sensor Network textbook, [http://pi4.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn\\_book](http://pi4.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book), retrieved 2006-08-29.
15. Jangra A., Richa, Swati, Priyanka (2010) International Journal on Computer Science and Engineering, Vol. 2(9):3089–3094.
16. Статья Беспроводные сенсорные сети: обзор Акулдиз И.Ф.
17. Статья: Сергиевский М. Беспроводные сенсорные сети.
18. Сайт: <http://www.podavitel.ru/na-kakikh-chastotakh-rabotayut-kvadrokopty-i-drony.html>

19. Милютин Е.Р., Василенко Г.О., Сиверс М.А. и др. Методы расчета поля в системах связи дециметрового диапазона.
20. Выходная мощность сигнала передатчика-сайт: <http://digteh.ru/UGFSvSPS/power/>
21. Беспроводные сенсорные сети: обзор Акулдиз И.Ф. Перевод с английского: Левжинский А.С. сайт: <http://masters.donntu.org/2011/fknt/levzhinsky/library/translate.html>.
22. Анализ работоспособности беспроводной сети - Источник: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=650761#text>.
23. E. Egea-López, J. Vales-Alonso, A. S. Martínez-Sala, P. Pavón-Mariño, J. García-Haro Simulation Tools for Wireless Sensor Networks // Summer Simulation Multiconference - SPECTS 2005 // - 2005. - P. 2 - 9.
24. Ezio Biglieri Coding for Wireless Channels (Information Technology: Transmission, Processing and Storage) -2005. - P. 428.
25. Garay J.A., Perry K.J. A continuum of failure models for distributed computing. // Proc. 6nd Int. Workshop on Distributed Algorithms (Haifa, 1992) / S. Zaks, A. Segall (eds.). P. 153-156.
26. IEEE Standards 802.15.4. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs). - IEEE Computer Society, 2003.
27. Luis Javier García Villalba , Ana Lucila Sandoval Orozco, Alicia Triviño Cabrera, Cláudia Jacy Barenco Abbas Routing Protocols in Wireless Sensor Networks // Sensors // - 2009 - 9 - P. 399 - 421.
28. Pease M., Shostak R., Lamport L. Reaching agreement in the presence of faults. // J. ACM. 1984. V. 27. P. 228-234.
29. Royo N., Gub T., Das S.K. Supporting pervasive computing applications with active context fusion and semantic context delivery. // Pervasive and Mobile Computing - 2010. - 6. - P. 21 - 42.
30. Zhang M., Chan M.C., Ananda A.L. Connectivity monitoring in wireless sensor networks. // Pervasive and Mobile Computing - 2010. - 6. - P. 112 - 127.
31. Акимов Е.В., Кузнецов М.Н. Вероятностные математические модели для оценки надежности беспроводных сенсорных сетей // Электронный журнал «Труды МАИ». Выпуск № 40// URL: [#"justify">.Ахо А., Хопкрофт Д., Ульман Д. Структуры данных и алгоритмы. - М.: Вильямс, 2000. - 384 с.](#)

## Приложение А

```
xm=250;
ym=250;
sink.x=0.5*(xm+50);
sink.y=0.5*(ym+50);
n=8;
p=0.1;
Eo=8.5;
ETX=n*0.000000001;
ERX=n*0.000000001;
Efs=10e-12;
Emp=0.0013e-12;
EDA=5*0.000000001;
rmax=2000;
do=sqrt(Efs/Emp);
Et=0;
for h=1:1 %1
S(n+1).xd=sink.x;
S(n+1).yd=sink.y;
Et=0;
for i=1:1:n %2
S(1).xd=50;
S(2).xd=(xm+50)/2;
S(3).xd=xm;
S(4).xd=50;
S(5).xd=50;
S(6).xd=(xm+50)/2;
S(7).xd=xm;
S(8).xd=xm;
S(1).yd=50;
S(2).yd=50;
S(3).yd=50;
S(4).yd=(ym+50)/2;
S(5).yd=ym;
S(6).yd=ym;
S(7).yd=ym;
S(8).yd=(ym+50)/2;
YR(i)=S(i).yd;
XR(i)=S(i).xd;
dist=sqrt( (S(i).xd-(S(n+1).xd) )^2 + (S(i).yd-(S(n+1).yd) )^2 );
S(i).distance=dist;
S(i).G=0;
S(i).type='N';
```

```

S(i).E=Eo;
  Et=Et+S(i).E;
figure(h*10);
plot(S(i).xd,S(i).yd,'bo');
text(S(i).xd+1,S(i).yd-0.5,num2str(i));
hold on;
end %2
plot(S(n+1).xd,S(n+1).yd,'o', 'MarkerSize', 12, 'MarkerFaceColor', 'r');
text(S(n+1).xd+1,S(n+1).yd-0.5,num2str(n+1));
hold off;
for r=0:1:rmax %3.1
  packets_TO_BS_per_round=0;
  if(mod(r, round(1/p) )==0)
  for i=1:1:n %3.2
    S(i).G=0;
    S(i).cl=0;
  end %3.2
  end %3.1
  dead=0;
  for i=1:1:n %4
  if (S(i).E<=0)
  %plot(S(i).xd,S(i).yd,'red .');
  dead=dead+1;
  if (dead==1)
  if(flag_first_dead==0)
  first_dead=r;
  flag_first_dead=1;
  end
  end
  if(dead==0.5*n)
  if(flag_half_dead==0)
  half_dead=r;
  flag_half_dead=1;
  end
  end
  if(dead==n)
  if(flag_all_dead==0)
  all_dead=r;
  flag_all_dead=1;
  end
  end
  end
  if S(i).E>0
  S(i).type='N';

```

```

end
end
countCHs=0;
cluster=1;
for i=1:1:n
if(S(i).E>0)
temp_rand=rand;
if ( (S(i).G)<=0)
if ( temp_rand<= ( p/ ( 1 - p * mod(r,round(1/p)) ) ) )
countCHs=countCHs+1;
S(i).type='C';
S(i).G=round(1/p)-1;
C(cluster).xd=S(i).xd;
C(cluster).yd=S(i).yd;
dist=sqrt( (S(i).xd-(S(n+1).xd) )^2 + (S(i).yd-(S(n+1).yd) )^2 );
C(cluster).distance=dist;
C(cluster).id=i; X(cluster)=S(i).xd;
Y(cluster)=S(i).yd; cluster=cluster+1;
dist;
if (dist>do)
S(i).E=S(i).E-( (ETX+EDA)*(4000) + Emp*4000*( dist*dist*dist*dist ));
end
if (dist<=do)
S(i).E=S(i).E- ( (ETX+EDA)*(4000) + Efs*4000*( dist * dist ));
end
end
end
end
end
end
STATISTICS.COUNTCHS(h,r+1)=countCHs;
for i=1:1:n
if ( S(i).type=='N'&& S(i).E>0 )
if(cluster-1>=1)
min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
min_dis_cluster=0;
for c=1:1:cluster-1
temp=min(min_dis,sqrt( (S(i).xd-C(c).xd)^2 + (S(i).yd-C(c).yd)^2 ) );
if ( temp<min_dis )
min_dis=temp;
min_dis_cluster=c;
end
end
if(min_dis_cluster~=0)
min_dis;

```

```

        if (min_dis>do)
            S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis * min_dis * min_dis *
min_dis));
        end
        if (min_dis<=do)
            S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis * min_dis));
        end
            S(C(min_dis_cluster).id).E = S(C(min_dis_cluster).id).E- ( (ERX +
EDA)*4000 );
        else
            min_dis;
            if (min_dis>do)
                S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis * min_dis * min_dis *
min_dis));
            end
            if (min_dis<=do)
                S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis * min_dis));
            end
        end
        S(i).min_dis=min_dis;
        S(i).min_dis_cluster=min_dis_cluster;
        else
            min_dis=sqrt( (S(i).xd-S(n+1).xd)^2 + (S(i).yd-S(n+1).yd)^2 );
            if (min_dis>do)
                S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Emp*4000*( min_dis * min_dis * min_dis *
min_dis));
            end
            if (min_dis<=do)
                S(i).E=S(i).E- ( ETX*(4000) + Efs*4000*( min_dis * min_dis));
            end
            Enrg1(r).E=S(1).E;
            Enrg2(r).E=S(2).E;
        end
    end
end
En=0;
for i=1:n
    if S(i).E<=0
        continue;
    end
    En=En+S(i).E;
end
ENERGY(r+1)=En;
STATISTICS.ENERGY(h,r+1)=En;

```

end  
end

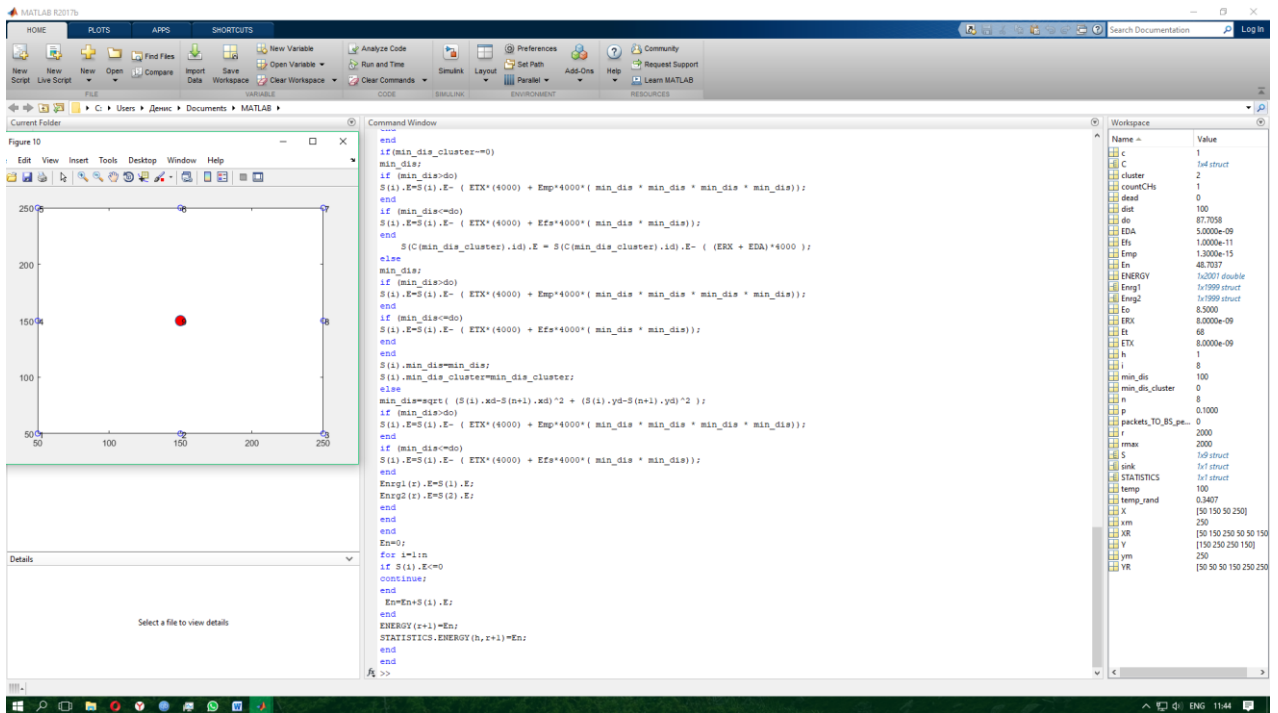


Рисунок 20.10- Работа модели