

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Южно-Уральский государственный университет»  
(Национальный исследовательский университет)  
«Высшая школа электроники и компьютерных наук»  
Кафедра «Инфокоммуникационные технологии»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ Даровских С.Н

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 год

**Беспроводные сенсорные сети: принципы организации, алгоритмы выбора  
головного узла и кластеризации**

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ

ЮУрГУ – Д 11.03.02.2018.205.00 ПЗ ВКР

Руководитель работы:

Новиков В.В. \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 год

Автор работы:

студент группы КЭ -479

Рудаков К.А. \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 год

Нормоконтролер:

Спицына В.Д. \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2018 год

Челябинск  
2018

## РЕФЕРАТ

Рудаков К.А. Беспроводные сенсорные сети: принципы организации, алгоритмы выбора головного узла и кластеризации – Челябинск: ЮУрГУ, ВШЭКН, 2018, 9 илл., 46 с. – Библиографический список – 10 наименований, 2 плаката формата А1.

В данной выпускной квалификационной работе рассмотрены стандарты беспроводных сенсорных сетей, их архитектура, алгоритмы кластеризации и выбора головного узла.

В работе также представлена архитектура сенсоров и обзор средств моделирования беспроводных сенсорных сетей.

					<b>ЮУрГУ – Д 11.03.02.2018.205.00 ПЗ ВКР</b>				
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>					
<i>Разраб.</i>					Беспроводные сенсорные сети: принципы организации, алгоритмы выбора головного узла и кластеризации			<i>Лист</i>	
<i>Провер.</i>								3	46
<i>Н. Контр.</i>	<i>Спицына В.Д.</i>				ЮУрГУ Кафедра ИКТ				
<i>Утверд.</i>	<i>Даровских</i>								

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 История создания и стандарты беспроводных сенсорных сетей.....	6
1.1 История создания беспроводных сенсорных сетей.....	6
1.2 Беспроводные сенсорные сети и стандарты.....	8
1.2.1 Стандарт Wi-Fi.....	9
1.2.2 Стандарт WiMAX.....	11
1.2.3 Стандарт Bluetooth.....	14
1.2.4 Стандарт HomeRF.....	15
1.2.5 Стандарт ZigBee.....	16
2 Архитектура сенсорных сетей, алгоритмы маршрутизации и выбор головного узла кластера.....	18
2.1 Архитектура сенсорных сетей.....	19
2.2 Архитектура сенсоров.....	23
2.3 Алгоритмы маршрутизации USN.....	27
2.4 Алгоритмы выбора головного узла в кластере.....	32
2.4.1 Алгоритм случайного выбора головного узла LEACH.....	33
2.4.2 Алгоритм HEED с предопределенным выбором головного узла.....	34
2.4.3 Алгоритм ERA случайного выбора головного узла.....	35
2.4.4 Алгоритмы PEGASIS и иерархический PEGASIS.....	36
2.4.5 Алгоритм RRCH.....	37
3 Обзор средств моделирования беспроводных сенсорных сетей.....	38
3.1 Симулятор NS-2.....	38
3.2 Симулятор Cooja.....	39
3.3 Симулятор TOSSIM (TinyOS Simulator).....	41
3.4 Симулятор OMNeT++.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	45
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	46

## ВВЕДЕНИЕ

Беспроводные сенсорные сети представляют собой активно развивающиеся системы автоматизации и управления, мониторинга и контроля. Взаимодействуя с управляющими устройствами, датчики создают распределенную, самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации. Понятие «самоорганизующаяся сеть» определяется как система, в которой устройства «умеют» сами находить друг друга и формировать сеть, а случае выхода из строя какого-либо из узлов могут устанавливать новые маршруты для передачи сообщений.

Технология сенсорных сетей не требует для построения сети дорогостоящих кабелей вместе со вспомогательным оборудованием (кабельными каналами, клеммами, шкафами и т.д.). А так как сенсорная сеть поддерживает основные интерфейсы и протоколы, которые применяются в настоящее время, есть возможность интегрировать ее в существующую сеть без проведения масштабной реконструкции.

Миниатюрные и потому не требующие энергозатрат датчики (срок эксплуатации может достигать несколько лет) обеспечивают возможность их размещения в труднодоступных местах и на больших территориях. Беспроводные решения незаменимы, когда необходимо связать в сеть постоянно движущиеся или часто перемещаемые узлы. Однако же недостатком беспроводных решений оказывается их меньшая надежность, как в смысле гарантированной доставки данных за ограниченное время, так и в смысле защиты передаваемой информации от несанкционированного доступа.

Разработка и введение сенсорных сетей во все сферы жизни предоставит огромное количество преимуществ человечеству.

Цель данной дипломной работы заключается в исследовании стандартов, изучении архитектуры, алгоритмов кластеризации и выбора головного узла в кластере в беспроводных сенсорных сетях.

## 1 История создания и стандарты беспроводных сенсорных сетей

### 1.1 История создания беспроводных сенсорных сетей

История создания сенсорных сетей насчитывает более четырех десятков лет. Первые работы над сенсорами и сенсорными сетями были инициированы в оборонном секторе США. Как и в случае с другими технологиями, в том числе и телекоммуникационными (сеть Интернет). Естественно, подобные работы проводились и в СССР, однако до сих пор открытая информация об этом отсутствует.

В начале 50-х годов во время холодной войны с целью обнаружения и наблюдения за советскими малозумными подводными лодками была разработана и развернута система наблюдения SOSUS (Sound Surveillance System), состоящая из набора акустических сенсоров (гидрофонов), размещенных на дне океана. Позже система SOSUS была переориентирована на гражданский сектор и до сих пор используется национальной океанографической и атмосферной администрацией NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration) для мониторинга, например, сейсмической активности.

Во время холодной войны в оборонном комплексе был также разработан противовоздушный комплекс защиты континентальной части территорий США и Канады. Особенностью этого комплекса, позволяющей говорить о нем как о прототипе сенсорной сети, являлось использование аэростатов в качестве точек осуществления контроля и сбора информации. Позже эта система была дополнена самолетами воздушного предупреждения и управления AWACS (Airborne Warning and Control System).

Эти две военные системы служат хорошим примером построения сенсорных сетей на очень ранней стадии их развития, когда речь о повышении эффективности, оптимизации, автономии и снижении стоимости еще не шла, а человек играл одну из основных ролей в процессе работы этих систем – именно на человека возлагалась ответственность за функционирование, надежность, анализ данных и т.п.

Работы над сенсорными сетями в современном понимании начались в 1980 г. исследованиями в программе «Распределенные сенсорные сети» DSN (Distributed Sensor Networks), инициированной оборонным агентством по современным исследовательским проектам DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Сеть Интернет, разработанная также в рамках агентства DARPA, к этому моменту уже успешно функционировала в течение нескольких лет и объединяла более 200 компьютеров в университетах и научно-исследовательских центрах и институтах США. Разработчиками сети Интернет в рамках проекта DSN были применены усилия по реализации принципов пакетной коммутации и стека протоколов TCP/IP в распределенных сетях, состоящих из простых устройств, позже названных сенсорами. Аппаратная база для реализации сенсорных сетей в то время была достаточно слабой, и число уже разработанных технологий, которые могли бы быть применены, было сильно ограничено – модемы функционировали на скорости 9600 бод, а технология Ethernet только что вышла на рынок.

В связи с этим участники проекта DSN были вынуждены как определять концепцию сенсоров и сенсорных сетей, так и непосредственно осуществлять техническую разработку. Для поддержки проекта DSN агентство DARPA со своей стороны осуществляло руководство проектом, в связи с чем к этому проекту были также привлечены эксперты по искусственному интеллекту. Среди приоритетных областей исследований, с точки зрения проекта DSN, были определены распределенные вычисления, обработка сигналов и передача данных через беспроводный интерфейс.

В первой половине 80-х был создан ряд тестовых сенсорных сетей, среди которых можно отметить следующие:

- тестовая сенсорная сеть под управлением операционной системы Assent, Carnegie Mellon University (США), 1981 г.
- тестовая акустическая сенсорная сеть для наблюдения за маршрутами вертолетов, Massachusetts Institute of Technology (MIT) (США), 1984 г.

– тестовая сенсорная сеть, усложненная алгоритмами распределенных вычислений, Advanced Decision Systems (США), 1986 г.

Любая технология приносит успех и, соответственно, оправдывает капиталовложения и приносит прибыль лишь при выходе на общедоступный рынок. Как показывает опыт сети Интернет, технология, изначально разработанная для военных целей, может быть успешно применена в гражданском секторе. Выход сенсорных сетей на рынок в той концепции, в которой они были определены в 80-х годах, еще 7 – 8 лет назад был невозможен. Последние несколько лет стали решающими для сенсорных сетей – появились технологии, позволяющие производить сенсоры достаточно малого размера, оснащенные достаточным количеством процессорной мощности и памяти.

Оптимизация как различных алгоритмов и протоколов, так и архитектурных решений аппаратной части сенсора позволили существенно снизить объем потребляемой энергии и добиться непрерывного функционирования сенсора без смены источника питания на срок более чем 1 – 2 года. Немаловажным фактором успеха сенсорных сетей на широком рынке является их стоимость. Уже сегодня, при очень низком объеме производства по сравнению с целевыми объемами, можно наблюдать приемлемые цены, когда один сенсорный узел стоит около 50 долларов США. Как уже отмечалось выше, прогнозы развития беспроводных устройств рассматривают число в 7 триллионов на горизонте планирования до 2017 – 2020 годов. При этом стоимостные требования к сенсорным узлам должны быть в пределах десятков центов и единиц долларов в зависимости от приложений.

## 1.2 Беспроводные сенсорные сети и стандарты

Беспроводные сенсорные сети (БСС) – это одно из самых перспективных направлений в развитии телекоммуникационных систем настоящего времени которые создают новые возможности для проведения научных исследований. Миниатюрные размеры узлов (плата размером с один кубический дюйм), интегрированный радиointерфейс, низкое потребление энергии, довольно

невысокая стоимость делают данную сеть очень выгодной для использования в тех областях жизнедеятельности, где необходимо произвести построение систем контроля и управления или следить за безопасностью. Беспроводная сенсорная сеть необходима в первую очередь в таких областях, где вообще невозможна прокладка кабелей по техническим, экономическим или организационным причинам.

Множество стандартов передачи данных такие как Wi-Fi, WiMAX, Bluetooth, HomeRF, ZigBee и так далее делят между собой диапазон 2,4 ГГц,

### 1.2.1 Стандарт Wi-Fi

Wi-Fi – торговая марка Wi-Fi Alliance для беспроводных сетей на базе стандарта IEEE 802.11. Ноутбук или коммуникатор без подключения к сети Интернет сегодня является практически бесполезным куском «железа». Благодаря широкому использованию Wi-Fi для решения проблемы подключения к Интернету этот термин стал хорошо известным. Несмотря на то, что поначалу в некоторых пресс-релизах WESA фигурировало словосочетание Wireless Fidelity (беспроводная точность), на данный момент от такой формулировки отказались, и термин Wi-Fi никак не расшифровывается. Продукты, предназначавшиеся изначально для систем кассового обслуживания, были выведены на рынок под маркой WaveLAN и обеспечивали скорость передачи данных от 1 до 2 Мбит/с. Создатель Wi-Fi – Вик Хейз (Vic Hayes) находился в команде, участвовавшей в разработке таких стандартов, как IEEE 802.11b, IEEE 802.11a и IEEE 802.11g. Обычно схема сети Wi-Fi содержит не менее одной точки доступа и не менее одного клиента.

Также возможно подключение двух клиентов в режиме точка-точка (Ad-hoc), когда точка доступа не используется, а клиенты соединяются посредством сетевых адаптеров напрямую. Точка доступа передает свой идентификатор сети (SSID) с помощью специальных сигнальных пакетов на скорости 0,1 Мбит/с каждые 100 мс. Поэтому 0,1 Мбит/с — наименьшая скорость передачи данных для Wi-Fi. Зная SSID сети, клиент может выяснить, возможно ли подключение к данной точке доступа.



При попадании в зону действия двух точек доступа с идентичными SSID приемник может выбирать между ними на основании данных об уровне сигнала.

Стандарт Wi-Fi дает клиенту полную свободу при выборе критериев для соединения. Устройства Wi-Fi широко распространены на современном рынке. Совместимость оборудования гарантируется благодаря обязательной его сертификации с логотипом Wi-Fi. Излучение от Wi-Fi-устройств в момент передачи данных на два порядка (в 100 раз) меньше, чем от сотового телефона. Технология позволяет развернуть сеть без прокладки кабеля, что может уменьшить стоимость развертывания и/или расширения сети. Места, где нельзя проложить кабель, например, вне помещений и в зданиях, имеющих историческую ценность, могут обслуживаться беспроводными сетями.

Технология позволяет мобильным устройствам иметь доступ к сети. Стандарт шифрования WEP может быть относительно легко взломан даже при правильной конфигурации (из-за слабой стойкости алгоритма). Несмотря на то, что новые устройства поддерживают более совершенный протокол шифрования данных WPA и WPA2, многие старые точки доступа не поддерживают его и требуют замены. Принятие стандарта IEEE 802.11i (WPA2) в июне 2004 года сделало доступной более эффективную схему аутентификации и шифрования, которая применяется в новом оборудовании. Для реализации протоколов WPA и WPA2 требуется более надёжный пароль, чем тот, который обычно назначается пользователем. Стандарт IEEE 802.11 определяет два режима работы сети – Ad-hoc (BSS – Basic Service Set) и инфраструктурный ESS – Extended Service Set. Режим Ad-hoc (иначе называемый «точка-точка») – это простая сеть, в которой связь между станциями (клиентами) устанавливается напрямую, без использования специальной точки доступа. В режиме инфраструктурный ESS беспроводная сеть состоит, как минимум, из одной точки доступа, подключенной к проводной сети, и некоторого набора беспроводных клиентских станций. Для организации беспроводной сети в замкнутом пространстве применяются передатчики со всенаправленными антеннами. Следует иметь в виду, что через стены с большим содержанием

металлической арматуры (в железобетонных зданиях таковыми являются несущие стены) радиоволны диапазона 2,4 ГГц иногда могут вообще не проходить, поэтому в комнатах, разделенных подобной стеной, придется ставить свои точки доступа.

Мощность, излучаемая передатчиком точки доступа или же клиентской станции, работающей по стандарту IEEE 802.11, не превышает 0,1 Вт, но многие производители беспроводных точек доступа ограничивают мощность лишь программным путем, и достаточно просто поднять мощность до 0,2...0,5 Вт. Для сравнения – мощность, излучаемая мобильным телефоном, на порядок больше (в момент звонка – до 2 Вт). Поскольку, в отличие от мобильного телефона, элементы сети расположены далеко от головы, в целом можно считать, что беспроводные компьютерные сети более безопасны с точки зрения здоровья, чем мобильные телефоны. Продукты для беспроводных сетей, соответствующие стандарту IEEE 802.11, предлагают четыре уровня средств безопасности: физический, идентификатор набора служб (SSID – Service Set Identifier), идентификатор управления доступом к среде (MAC ID – Media Access Control ID) и шифрование. Многие организации используют дополнительное шифрование (например, VPN) для защиты от вторжения. На данный момент основным методом взлома WPA2 является подбор пароля, поэтому рекомендуется использовать сложные цифро-буквенные пароли для того, чтобы максимально усложнить задачу подбора пароля.

### 1.2.2 Стандарт WiMAX

WiMAX (англ. Worldwide Interoperability for Microwave Access) – телекоммуникационная технология, разработанная с целью предоставления универсальной беспроводной связи на больших расстояниях для широкого спектра устройств (от рабочих станций и портативных компьютеров до мобильных телефонов). Основана на стандарте IEEE 802.16, который также называют Wireless MAN (WiMAX следует считать жаргонным названием, так как это не технология, а название форума, на котором Wireless MAN и был согласован).

WiMAX подходит для решения задачи соединения точек доступа Wi-Fi друг с другом и другими сегментами Интернета, а также обеспечения беспроводного широкополосного доступа как альтернативы выделенным линиям и xDSL. WiMAX позволяет осуществлять доступ в Интернет на высоких скоростях, с гораздо большим покрытием, чем у Wi-Fi-сетей. Это позволяет использовать технологию в качестве магистральных каналов, продолжением которых выступают традиционные выделенные и xDSL-линии, а также локальные сети. В результате подобный подход позволяет создавать масштабируемые высокоскоростные сети в рамках городов.

WiMAX – это система дальнего действия, покрывающая километры пространства, которая обычно использует лицензированные спектры частот (хотя возможно и использование нелицензированных частот) для предоставления соединения с интернетом типа точка-точка провайдером конечному пользователю. Разные стандарты семейства 802.16 обеспечивают разные виды доступа, от мобильного (схож с передачей данных у мобильных телефонов) до фиксированного (альтернатива проводному доступу, при котором беспроводное оборудование пользователя привязано к местоположению).

В отличие от WiMAX Wi-Fi – это система более короткого действия, обычно покрывающая десятки метров, которая использует нелицензированные диапазоны частот для обеспечения доступа к сети. Обычно Wi-Fi используется пользователями для доступа к их собственной локальной сети, которая может быть и не подключена к Интернету. Если WiMAX можно сравнить с мобильной связью, то Wi-Fi скорее похож на стационарный беспроводной телефон (радиотелефон). WiMAX и Wi-Fi имеют совершенно разный механизм Quality of Service (QoS). WiMAX использует механизм, основанный на установлении соединения между базовой станцией и устройством пользователя. Каждое соединение основано на специальном алгоритме планирования, который может гарантировать параметр QoS для каждого соединения. Wi-Fi, в свою очередь, использует механизм QoS подобный тому, что используется в Ethernet, при котором пакеты получают различный приоритет. Такой подход не гарантирует одинаковый QoS для каждого соединения. Набор

преимуществ присущ всему семейству WiMAX, однако его версии существенно отличаются друг от друга. Разработчики стандарта искали оптимальные решения как для фиксированного, так и для мобильного применения, но совместить все требования в рамках одного стандарта не удалось. Хотя ряд базовых требований совпадает, нацеленность технологий на разные рыночные ниши привела к созданию двух отдельных версий стандарта (вернее, их можно считать двумя разными стандартами).

Каждая из спецификаций WiMAX определяет свои рабочие диапазоны частот, ширину полосы пропускания, мощность излучения, методы передачи и доступа, способы кодирования и модуляции сигнала, принципы повторного использования радиочастот и прочие показатели. Поэтому WiMAX-системы, основанные на версиях стандарта IEEE 802.16 e и d, практически несовместимы. Основное различие двух технологий состоит в том, что фиксированный WiMAX позволяет обслуживать только статичных абонентов, а мобильный ориентирован на работу с пользователями, передвигающимися со скоростью до 150 км/ч. Мобильность означает наличие функций роуминга и "бесшовного" переключения между базовыми станциями при передвижении абонента (как происходит в сетях сотовой связи). В частном случае мобильный WiMAX может применяться и для обслуживания фиксированных пользователей.

С изобретением мобильного WiMAX все больший акцент делается на разработке мобильных устройств, в том числе, специальных телефонных трубок (похожих на обычный мобильный смартфон), и компьютерной периферии (USB-радиомодулей и PC card). Оборудование для использования сетей WiMAX поставляется несколькими производителями и может быть установлено как в помещении (устройства размером с обычный xDSL-модем), так и вне его. Следует заметить, что оборудование, рассчитанное на размещение внутри помещений и не требующее профессиональных навыков при установке, конечно, более удобно, однако способно работать на значительно меньших расстояниях от базовой станции, чем профессионально установленные внешние устройства. Поэтому оборудование,

установленное внутри помещений, требует намного больших инвестиций в развитие инфраструктуры сети.

В общем виде WiMAX сети состоят из следующих основных частей: базовых и абонентских станций, а также оборудования, связывающего базовые станции между собой, с поставщиком сервисов и с Интернетом. Структура сетей семейства стандартов IEEE 802.16 схожа с традиционными GSM-сетями (базовые станции действуют на расстояниях до десятков километров, для их установки не обязательно строить вышки – допускается установка на крышах домов при соблюдении условия прямой видимости между станциями).

WiMAX применяется как для решения проблемы "последней мили", так и для предоставления доступа в сеть офисным и районным сетям. Для соединения базовой станции с абонентской используется высокочастотный диапазон радиоволн от 1,5 до 11 ГГц. В идеальных условиях скорость обмена данными может достигать 70 Мбит/с, при этом не требуется обеспечения прямой видимости между базовой станцией и приемником. Между базовыми станциями устанавливаются соединения (прямой видимости), использующие диапазон частот от 10 до 66 ГГц, скорость обмена данными может достигать 140 Мбит/с. При этом по крайней мере одна базовая станция подключается к сети провайдера с использованием классических проводных соединений. Однако, чем большее число БС подключено к сетям провайдера, тем выше скорость передачи данных и надежность сети в целом.

### 1.2.3 Стандарт Bluetooth

Bluetooth обеспечивает обмен информацией между такими устройствами как персональные компьютеры (настольные, карманные, ноутбуки), мобильные телефоны, принтеры, цифровые фотоаппараты, мышки, клавиатуры, джойстики, наушники, гарнитуры на надежной, недорогой, повсеместно доступной радиочастоте для ближней связи. Беспроводной канал позволяет этим устройствам общаться, когда они находятся в радиусе от 1 до 200 м друг от друга (дальность сильно зависит от преград и помех), даже в разных помещениях.

Стоит отметить, что компания AIRcable выпустила Bluetooth-адаптер Host XR с радиусом действия около 30 км. Для совместной работы Bluetooth-устройств необходимо, чтобы все они поддерживали общий профиль. Профиль – набор функций или возможностей, доступных для определенного устройства Bluetooth.

Технология Bluetooth опирается на нелицензируемый частотный диапазон 2,4...2,4835 ГГц. При этом используются широкие защитные полосы: нижняя граница частотного диапазона составляет 2 ГГц, а верхняя – 3,5 ГГц. Частота (положение центра спектра) задается с точностью  $\pm 75$  кГц. Дрейф частоты в этот интервал не входит. Кодирование сигнала осуществляется по двухуровневой схеме GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying). Логическому 0 и 1 соответствуют две разные частоты. В оговоренной частотной полосе выделяется 79 радиоканалов по 1 МГц каждый.

#### 1.2.4 Стандарт HomeRF

HomeRF – беспроводная технология, специально ориентированная на сети, создаваемые в домашних условиях. Главная идея HomeRF заключается в том, что у домашних пользователей нужды совершенно отличны от потребностей корпоративных пользователей. Это значит, что и решения, которые для них требуются, специально для них и разработаны.

HomeRF стремится работать в этой нише рынка, поставляя устройства, которые достаточно легко устанавливаются, просты в использовании и более доступны, чем современные беспроводные решения масштаба предприятия.

HomeRF основан на нескольких существующих стандартах передачи голоса и данных и объединяет их в единое решение. Оно работает в полосе частот ISM 2,4 ГГц с использованием FHSS. Скачки по частотам происходят со скоростью от 50 до 100 раз в секунду. Избавление от интерференции происходит посредством разнесения сигналов по времени и частоте. HomeRF использует радиопередатчики низкой мощности, которые подобные тем, что используются в персональных беспроводных сетях стандарта 802.15 на основе технологии Bluetooth.

Различие между двумя технологиями заключается в том, что HomeRF ориентирована только на рынок домашних пользователей, включая SWAP (Standard Wireless Access Protocol – стандартный протокол беспроводного доступа), который в рамках HomeRF дает возможность более эффективно обрабатывать мультимедиаприложения. Передатчики действуют на расстоянии 40-50 м от базовой станции и могут быть встроены в карточки типа Compact Flash.

### 1.2.5 Стандарт ZigBee

ZigBee – название набора сетевых протоколов верхнего уровня, использующих маленькие, маломощные радиопередатчики, основанные на стандарте IEEE 802.15.4. Этот стандарт описывает беспроводные персональные вычислительные сети (WPAN). ZigBee нацелена на приложения, которым требуется длительное время автономной работы от батарей и высокая безопасность передачи данных при небольших скоростях их передачи. Основная особенность технологии ZigBee заключается в том, что она при относительно невысоком энергопотреблении поддерживает не только простые топологии беспроводной связи («точка-точка» и «звезда»), но и сложные беспроводные сети с ячеистой топологией с ретрансляцией и маршрутизацией сообщений. Области применения данной технологии – это построение беспроводных сетей датчиков, автоматизация жилых и строящихся помещений, создание индивидуального диагностического медицинского оборудования, системы промышленного мониторинга и управления, а также при разработке бытовой электроники и персональных компьютеров.

Имя бренда происходит от поведения медовых пчел, после возвращения их в улей. Сети, образованные по протоколу ZigBee начали рассматриваться с 1998, когда возникла необходимость в самоорганизующихся системах связи. ZigBee нацелен на приложения, которым требуется длительное время автономной работы от батарей и высокая безопасность передачи данных, при небольших скоростях передачи. ZigBee работает в промышленных, научных и медицинских (ISM-диапазон) радиодиапазонах: 868 МГц в Европе, 915 МГц в США и в Австралии, и

2,4 ГГц в большинстве стран в мире (под большинством юрисдикций стран мира). Так как ZigBee-устройство большую часть времени находится в спящем режиме, уровень потребления энергии может быть очень низким, благодаря чему достигается длительная работа от батарей. ZigBee-устройство может активироваться (то есть переходить от спящего режима к активному) за 15 мс или меньше, задержка его отклика может быть очень малой, особенно по сравнению с Bluetooth, для которого задержка, образующаяся при переходе от спящего режима к активному, обычно достигает трех секунд. Принимая во внимание такие критерии, как цена чипов, дешевизна и скорость освоения технологии, низкое энергопотребление и помехоустойчивость, можно сказать, что ZigBee нередко является сейчас лучшим выбором.

Чипы для реализации ZigBee выпускают такие известные фирмы, как Texas Instruments, Freescale, Atmel, STMicroelectronics, OKI и т.д. Это гарантирует низкие цены на комплектующие для данной технологии. ZigBee – это технология, заполняющая нишу низкоскоростных беспроводных сетей с низким энергопотреблением, предназначенных для систем управления с большим количеством узлов, таких как системы освещения в зданиях, системы наблюдения за парком промышленного оборудования и т.д. В настоящее время достаточно доступными являются модули ZigBee: ETRX2, ETRX3, выпущенные фирмой Telegesis. Для ознакомления с ними существуют стартовые наборы, включающие в себя модуль-координатор, имеющий USB-разъем, и три других модуля, которые можно настроить на работу роутера или конечного устройства, располагающего датчиками температуры и освещенности, тестовыми кнопками и т.п. Приведем сравнительную таблицу основных стандартов (таблица 1).



Таблица 1 – Сравнительная характеристика стандартов беспроводных Сетей

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

## 2 Архитектура сенсорных сетей, алгоритмы маршрутизации и выбор головного узла кластера

### 2.1 Архитектура сенсорных сетей

Ad Hoc сети – самоорганизующиеся, в которых число элементов сети не является постоянным и, в общем случае, может изменяться в пределах от 0 до некоторого  $N_{max}$ . Беспроводные сенсорные сети являются как раз таким примером самоорганизующихся Ad Hoc сетей, в которых нет общей инфраструктуры за исключением шлюзов связи с другими сетями. Каждый из узлов сенсорной сети должен иметь возможность функционировать как конечный и как транзитный узел. Действительно, передача данных в сенсорных сетях осуществляется путем их перенаправления к ближайшему узлу шаг за шагом. Такие сети называются многошаговыми (multihop).

Следует отметить, что могут существовать и более сложные алгоритмы маршрутизации, когда следующий узел выбирается на основе анализа его характеристик, например, затрат энергии, надежности и т.д. При наличии мобильных сенсорных узлов архитектура самоорганизующейся сенсорной сети становится к тому же и динамической. Сенсорные сети определяются как «распределенные сети, состоящие из маленьких беспроводных узлов узкой специализации в большом количестве рассредоточенных (случайно) на некоторой поверхности или области» (рисунок 1).

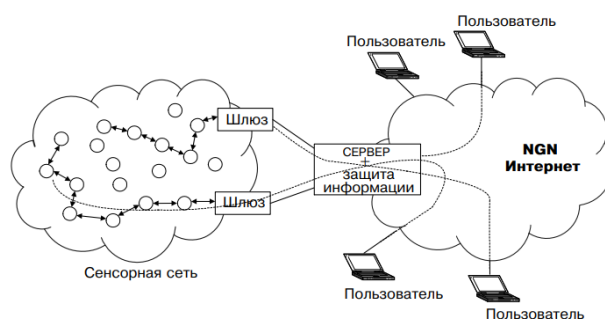


Рисунок 1 –Подсоединения сенсорной сети к сети связи общего пользования

Таким образом, сенсорная сеть представляет собой сравнительно большое множество беспроводных сенсоров, распределенных в некоторой области с достаточно высокой плотностью. В области покрытия радиосигнала каждого из сенсоров должен находиться как минимум еще один сенсор, в этом случае сенсор будет называться соседним. Чем больше «соседей» у каждого из сенсоров, тем более высокой точностью и надежностью обладает сенсорная сеть – очевидно, что отдельный сенсор имеет ограниченную область восприятия, вычислительную мощность, память и питание. Технологии радиодоступа, применяемые в сенсорах и основанные на стандарте IEEE 802.15.4, позволяют передавать данные на расстояние до нескольких десятков метров

Естественно, что чем выше количество соседних сенсоров у каждого из сенсоров, тем более высокой точностью и надежностью обладает сенсорная сеть – в связи с этим предполагается, что в некотором пространстве, где построена сенсорная сеть, сенсоры будут распределены с достаточно высокой плотностью и, соответственно, в большом количестве. Эта сеть, как правило, имеет присоединение к сети связи общего пользования для передачи полученных данных. Присоединение производится посредством некоторого шлюза, который может также реализовывать функции защиты. Отметим, что шлюз обычно не является сенсором, а представляет собой более стабильный сетевой узел (с точки зрения источника питания и ресурсов). Данные могут передаваться как для обработки на серверы, так и прямо заинтересованным пользователям. Очевидно, что сенсорная сеть, состоящая из большого количества сенсоров, должна быть структурирована, т.к. большой объем передаваемой информации может снизить надежность тех узлов, которые находятся в непосредственной близости к шлюзу – постоянная передача транзитных данных может привести к выходу из строя источника питания, а большой объем трафика – переполнить буферы приема. Кластерная организация является масштабируемой и считается эффективной для решения подобных задач (см. рисунок 2), но лишь при условии рационального выбора головного узла в кластерной сети и в подходящий момент времени.

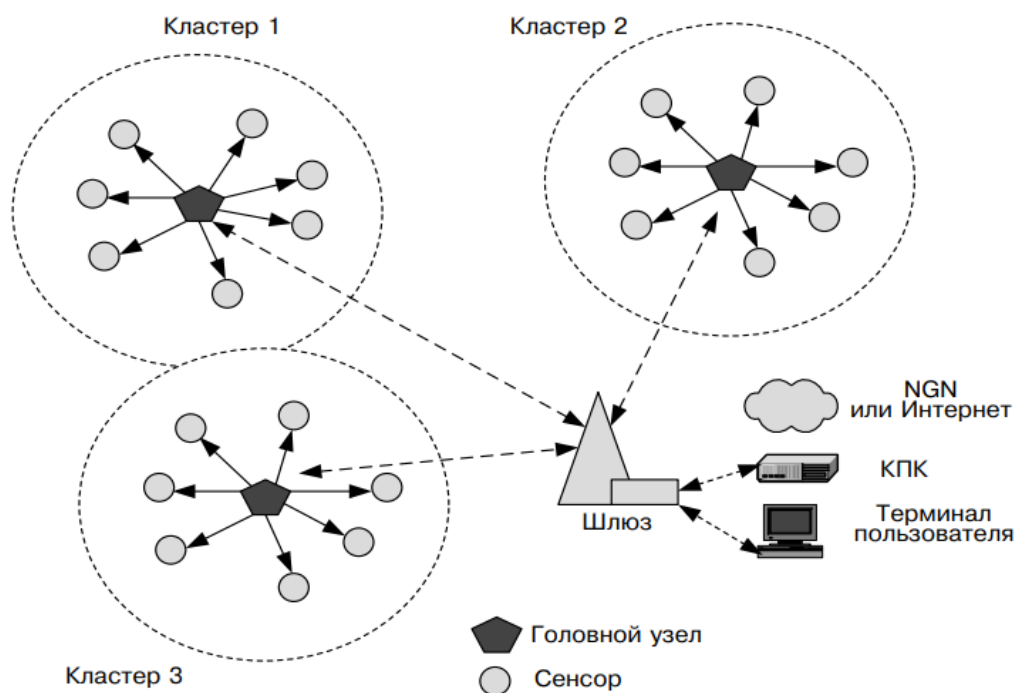


Рисунок 2 – Кластерная архитектура USN

Действительно, являющийся головным в момент времени  $t_1$  сенсорный узел не обязательно должен быть им же в другой момент времени, так как существующий головной узел уже может затратить достаточно большое количество энергии на передачу сообщений от всех сенсорных узлов кластера к моменту  $t_2$ . Поэтому, в момент времени  $t_2$  головным узлом в кластере может быть назначен и иной сенсорный узел, сохранивший к этому времени наибольший энергетический запас. Одним из самых известных механизмов, обеспечивающих функционирование сенсорных сетей и выбор головных узлов, является алгоритм LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy).

Алгоритм LEACH предусматривает вероятностный выбор сенсорного узла на роль головного в начале функционирования сенсорной сети, а впоследствии ротацию на основе энергетических характеристик других сенсорных узлов. Подобное решение, естественно, увеличивает длительность функционирования сенсорных узлов и сети в целом, но, как будет показано далее, не решает задачи обеспечения лучшего покрытия в течение достаточно длительного времени. И это, в общем-то, естественно, поскольку при создании LEACH такая задача и не ставилась.

Существует достаточно много алгоритмов, которые в той или иной степени пытаются улучшить LEACH. Это алгоритмы, использующие в качестве критерия количество остаточной энергии, местоположение узла-кандидата на головной кластерный узел по отношению к другим узлам, информацию о топологии сети в текущий момент времени. Например, алгоритм HEED (Hybrid Energy – Efficient Distribution) использует гибридный критерий для выбора головного узла на основе анализа остаточной энергии и расположения близлежащих узлов. Все эти алгоритмы направлены, как и LEACH, в первую очередь, на максимизацию длительности функционирования сенсорных узлов и сети в целом.

Однако с развитием сенсорных сетей появились и другие задачи, требующие пристального внимания. Например, задача о качестве обслуживания, которое является важнейшей метрикой для любой сети, в том числе и сенсорной. Действительно, очень важна проблема увеличения срока жизни сенсорной сети. Однако если эта сеть не будет выполнять свои функции в требуемом объеме, то и сама задача увеличения срока жизни сенсорной сети, не удовлетворяющей требованиям к качеству обслуживания, схоластична.

В системах мониторинга одним из важнейших требований является непрерывность, т.е. обеспечение мониторинга параметров на всем пространстве или на протяжении всего процесса. Исходя из сказанного, необходимо разработать такой алгоритм выбора головного узла кластера, который обеспечивал бы лучшее покрытие заданной для мониторинга области двумерного пространства (плоскости) в течение достаточно длительного периода времени. Этот подход означает как оптимизацию срока жизни сенсорной сети, так и оптимизацию выполнения сенсорной сетью своих функциональных задач с заданным качеством обслуживания в течение достаточно длительного периода времени.

Одним из важнейших параметров при построении сенсорных сетей является потребление энергии. Сенсорный узел в силу своего размера может быть оборудован источником питания со сравнительно небольшим ресурсом. В определенных приложениях сенсорных сетей, например, для решения тактических

задач в тылу врага, сенсорный узел является необслуживаемым устройством, и замена источника питания не представляется возможной.

Учитывая то, что сенсорный узел может выполнять роль как терминала, так и транзитного узла, увеличение срока действия источника питания является одной из приоритетных задач, которая решается не только путем увеличения времени жизни источника питания, но и путем эффективного его использования. Учитывая известное классическое соотношение потребления энергии мобильным узлом, говорящее о том, что соотношение потребления энергии при «передаче; приеме; ждущем режиме; спящем режиме» представляется соотношением «13: 9: 7: 1», усиленное внимание уделяется снижению времени передачи и приема информации и повышению доли времени, когда сенсор находится в ждущем или спящем режиме. Это необходимо учитывать при разработке алгоритмов маршрутизации.

## 2.2 Архитектура сенсоров

Сенсор, как и любой телекоммуникационный узел и/или терминал, состоит из аппаратной части и программного обеспечения. Как показано на рисунке 3, в общем случае сенсор состоит из следующих подсистем: мониторинга и восприятия, обработки данных, а также коммуникационной подсистемы и источника питания.

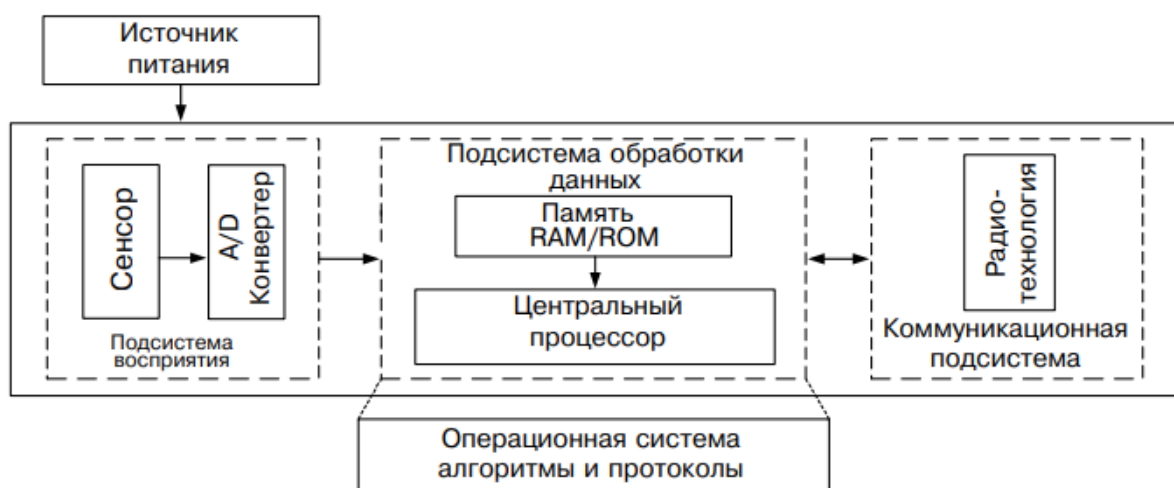


Рисунок 3 – Архитектура сенсорного узла

Подсистема мониторинга и восприятия позволяет сенсору собирать такие данные об окружающей среде как температура, сила света, вибрация, ускорение, магнитное поле, химический состав воздуха, акустика и т.п. Именно эта подсистема определяет ту область или приложение, в котором сенсор может быть использован. Сенсор опционально может быть дополнен и другими подсистемами, такими как, например, позиционирование, генератор электроэнергии и т.п. Подсистема мониторинга и восприятия содержит аналоговое устройство, непосредственно снимающее определенную статистику, и аналого-цифровой конвертор, преобразующий аналоговые данные в цифровые для последующей обработки.

Подсистема обработки данных включает в себя память и центральный процессор, позволяющие хранить и обрабатывать как генерируемые сенсором данные, так и служебные данные, необходимые для корректного и эффективного функционирования коммуникационной подсистемы. Важнейшими техническими аспектами реализации сенсора как малого размера телекоммуникационного устройства со сложными функциями, являются следующие:

- Архитектура. На сегодня требования к аппаратной части сенсора могут быть такими: частота центрального процессора не менее 20 МГц, объем оперативной памяти не менее 4 КБ, скорость передачи не менее 20 кбит/с. Оптимизация аппаратного обеспечения позволяет снизить размеры сенсора, однако, как правило, это влечет за собой повышение его цены.
- Операционная система. Оптимизация операционной системы (ОС) с учетом архитектуры применяемого центрального процессора является необходимой. На сегодня наиболее популярной является ОС с открытым кодом Tiny OS, позволяющая достаточно гибко управлять сенсорами разных производителей.
- Сетевое взаимодействие. Ограниченный источник питания накладывает существенные ограничения на радиотехнологию, которая может быть эффективно применена в сенсорных сетях. Более того, ограниченная производительность центрального процессора не позволяет применять стандартные протоколы маршрутизации IP-сетей – высокая сложность расчета

алгоритма оптимального пути перегрузит центральный процессор сенсора. Разработано большое количество специальных протоколов маршрутизации для сенсорных сетей.

Помимо рассмотренной классической архитектуры сенсорного узла возможны и другие, что связано, например, с необходимостью не только мониторинга или контроля измеряемых характеристик, но и воздействия на объект измерений. Такой элемент, имеющий возможность воздействия на объект, называется актором и его архитектура приведена на [рисунке 4](#).

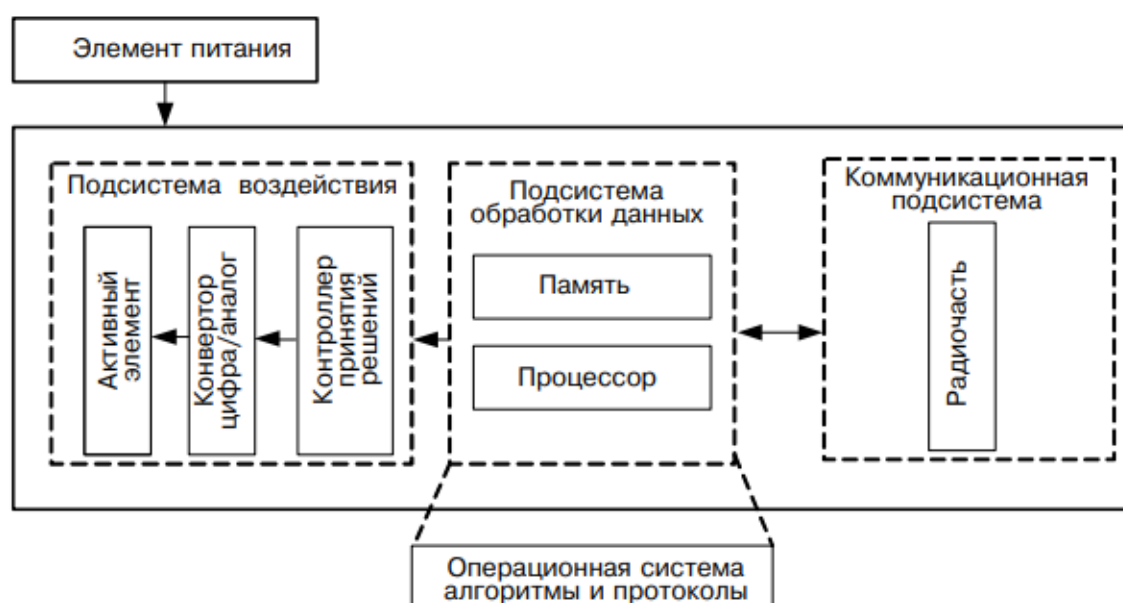


Рисунок 4 – Архитектура акторного узла

Архитектура актора подобна архитектуре сенсорного узла и отличается тем, что с внешней средой взаимодействует активный элемент, например, устройство ввода инсулина больному диабетом. Кроме того, в архитектуре актора отдельно выделяется контроллер принятия решения о воздействии на внешнюю среду.

Естественным выглядит возможность объединения актора и сенсора в один узел, архитектура которого представлена на рисунке 5. Помимо сенсоров и акторов среди беспроводных технических средств мониторинга и контроля целесообразно рассмотреть также радиоидентификаторы RFID (Radio Frequency Identification), которые не имеют измерительной части, но могут широко использоваться и



используются, например, в системах позиционирования. RFID классифицируются на активные и пассивные. Архитектура активного RFID практически не отличается от архитектуры сенсорного узла.

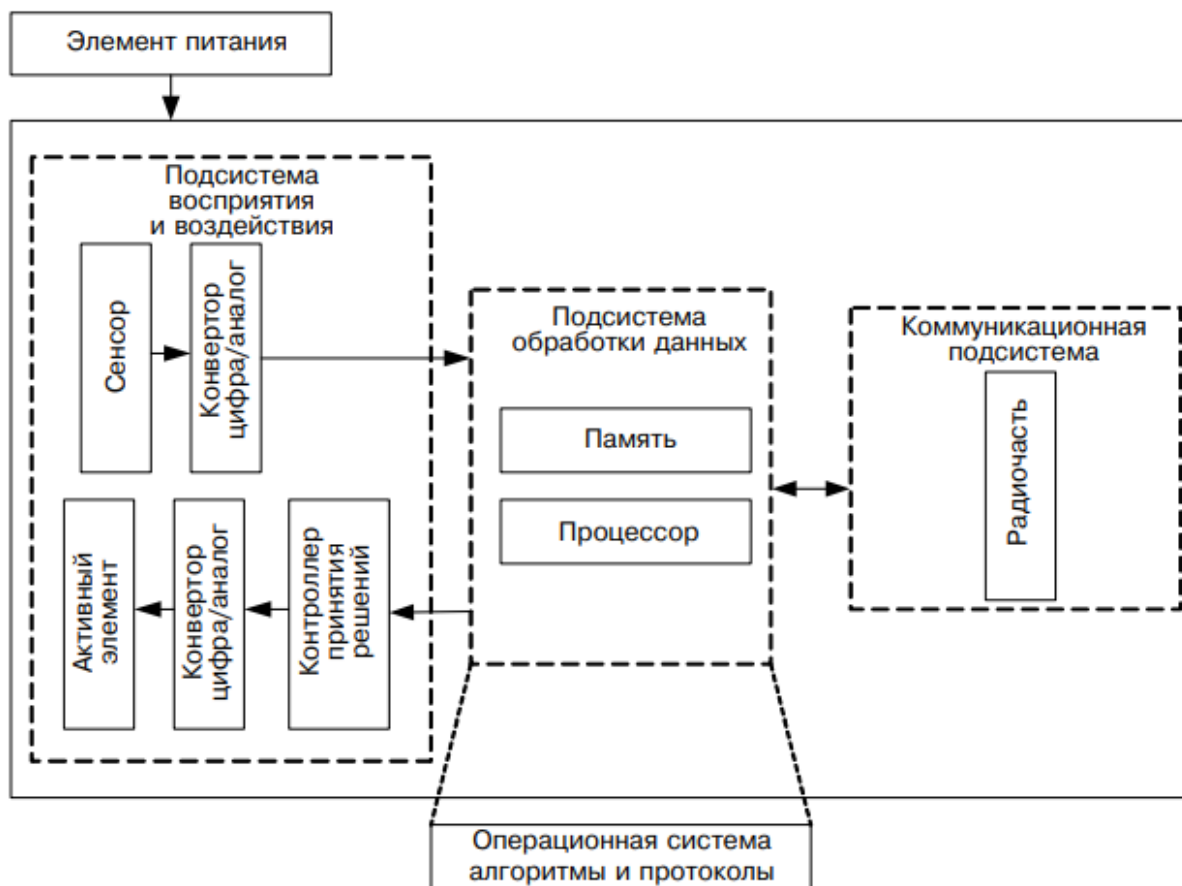


Рисунок 5 – Архитектура комбинированного сенсорно-акторного узла

Существенно более простую архитектуру имеет пассивный RFID, характеризуемый отсутствием элемента питания и необходимостью специального технического устройства – ридера – для считывания информации с него. Архитектура пассивного RFID приведена на рисунке 6.



Рисунок 6 – Архитектура пассивного RFID

Как видим, существует достаточно большое разнообразие технических средств, из которых можно конструировать сенсорные сети. Выбор конкретных решений для сенсорных узлов при создании беспроводной сенсорной сети в первую очередь зависит от функциональных возможностей, размера, затрат, энергетических характеристик, а в настоящее время, с учетом начала довольно широкого внедрения сенсорных сетей – от обеспечения требуемого качества обслуживания.

### 2.3 Алгоритмы маршрутизации USN

Поскольку сенсорная сеть может не иметь постоянной инфраструктуры, вряд ли возможно использовать классические алгоритмы маршрутизации для сенсорных сетей. Кроме того, в USN трафик данных может быть сгенерирован так, что одна и та же информация будет получена от разных сенсорных узлов, функционирующих в какой-либо зоне. Кроме того, размеры сенсоров и затраты на них лимитированы так же, как и их ресурсы: энергия, память, вычислительные возможности.

Поэтому, передавать одну и ту же информацию по сети от многих сенсорных узлов нецелесообразно. Исходя из сказанного, при разработке алгоритмов маршрутизации в беспроводных сенсорных сетях должны учитываться следующие факторы:

- Самоорганизация. Сенсорные сети должны иметь возможность самоорганизации. Исходя из этого, вычислительные возможности, возможности обеспечения связи и управления должны быть достаточными для обеспечения автономного существования.
- Энергетическая эффективность. Наблюдая прогресс в области производства процессоров, памяти и т.п., можно отметить, что в производстве источников питания, к сожалению, этот прогресс не так заметен. Сенсорные узлы проектируются, как правило, с обеспечением питания от батарей и, соответственно, срок их жизни в первую очередь определяется системой электропитания. Достаточно часто источник энергии не может быть

восполнен, поскольку сенсорные узлы могут быть размещены в недоступных для человека местах.

- Минимизация энергопотребления – одна из важнейших исследовательских задач в области беспроводных сенсорных сетей.
- Гибкость. Алгоритмы в сенсорных сетях должны обладать достаточной гибкостью для того, чтобы они могли адаптироваться к различным приложениям USN. Условия функционирования различных приложений, окружающая среда и возможности самого сенсорного узла изменяются в широких пределах. Хотя некоторые условия и могут быть предварительно спрогнозированы или даже определены перед созданием сети, топология сети может многократно изменяться в процессе функционирования USN вследствие введения новых узлов, отказов существующих, критических изменений внешней среды. Все эти возможности должны быть учтены при разработке алгоритмов для беспроводных сенсорных сетей.
- Масштабируемость. В беспроводных сенсорных сетях число сенсорных узлов в зависимости от решаемой задачи может изменяться от нескольких сотен до тысяч. Не случайно, в спецификациях Zig Bee число сенсорных узлов, расположенных в одной зоне, может достигать 64000. Сети большого масштаба и высокой плотности с лимитированной полосой пропускания должны, к тому же, предоставлять услуги с определенным уровнем качества обслуживания.
- Толерантность к отказам. В отличие от традиционных сетей беспроводные сенсорные сети организуются случайным образом, и взаимосвязи сенсорных узлов в них также случайны во времени. Сенсорные узлы могут выходить из строя вследствие недостаточного уровня электропитания, возникновения критических условий во внешней среде, выхода из строя аппаратной части и т.д. Если вышло из строя несколько сенсорных узлов, это не должно вызывать существенных последствий как для сенсорной сети в целом, так и для ее фрагментов. Другими словами, USN должна быть нечувствительна к отказу

какого-либо сенсорного узла и должна продолжать поддерживать далее требуемый уровень качества обслуживания.

- Точность и качество. Обеспечение достаточной точности и актуализация информации в реальном времени – одна из важнейших задач для множества приложений USN. Алгоритмы должны гарантировать, что данные будут переданы через беспроводную сенсорную сеть в соответствии с требуемым временем и точностью. Идеальный алгоритм должен обеспечить своевременную передачу информации с заданной точностью и минимальными энергозатратами.

### ***Классификация алгоритмов маршрутизации в USN***

Многие исследователи предлагали разные решения по алгоритмам маршрутизации для USN с учетом требуемых особенностей, изложенных выше. Предложенные алгоритмы маршрутизации в USN могут быть объединены в различные группы в соответствии с критериями. В таблице 2 показана простая классификация алгоритмов маршрутизации в USN с использованием типового подхода.

В фокусе интересов нашего исследования далее рассмотрим более подробно схемы одноуровневой и иерархической маршрутизации для сети USN. В одноуровневой сети все узлы играют одинаковую роль и имеют одинаковые функциональные возможности. Собранные данные передаются в сеть посредством многогранговой маршрутизации.

Таблица 2 - Простая классификация алгоритмов маршрутизации

Критерий	Категория	Примеры
Сетевая структура	Одноуровневая	SPAN
	Иерархическая	LEACH
Знание о ресурсах	На основе остаточной энергии	HEED
	На основе точности расположения	Directed Diffusion

## Продолжение таблицы 2

Критерий	Категория	Примеры
Управление протоколами	Централизованное	SPAN
	Географическое	GFG
	На основе QoS	SAR
	На основе теории очередей	COUGAR

Алгоритмы в одноуровневой сети должны обеспечить передачу большого объема транзитной информации через сеть и, естественно, они ориентированы на приложения. В основном, алгоритмы для одноуровневой сети являются централизованными, поскольку их основная задача состоит в обеспечении транзита данных через однородную сенсорную сеть.

Во многих случаях алгоритмы для одноуровневой сети довольно сложны, поскольку существуют как масштабирование, так и динамическое изменение топологии USN.

Алгоритмы SPIN (Sensor Protocols for Information via Negotiation) и DD (Direct Diffusion) являются базовыми для одноуровневой беспроводной сенсорной сети, и на их основе разработаны все последующие одноуровневые алгоритмы. В иерархических сетях сенсорные узлы играют разную роль, и появляются две категории сенсорных узлов: головной кластерный узел CH (Cluster Head) и члены кластера. Более высокий уровень сенсорных узлов собирает информацию от членов кластера и управляет более низким уровнем. После агрегации данных, узлы более высокого уровня при необходимости направляют ее на следующий уровень.

Рассмотрим для примера трехуровневую иерархическую беспроводную сенсорную сеть. Головные узлы кластеров взаимодействуют с узлами сети связи общего пользования. Каждый головной узел собирает данные с узлов своего кластера, агрегирует их и передает далее. Все иерархические алгоритмы маршрутизации должны обеспечивать выбор наилучшего **CH**. Поскольку головные узлы кластера ответственны за сбор, агрегацию и передачу данных на достаточно

большие расстояния, они должны быть в большей степени энергетически независимыми, чем просто члены кластера.

Алгоритмы выбора головного кластерного узла предусматривают ротацию и переназначение головного узла кластера периодически в зависимости от распределения нагрузки в целом по беспроводной сенсорной сети и других факторов, таких как энергопотребление, покрытие и т.д.

Сравнивая одноуровневые и иерархические алгоритмы маршрутизации, можно отметить, что иерархические алгоритмы предоставляют больше возможностей продвижения разных приложений USN.

Иерархическая маршрутизация в сети является эффективным путем снижения энергозатрат. Действительно, управление членами кластера со стороны головного узла кластера снижает нагрузку на членов кластера (в каждый момент времени энергию затрачивают только активные узлы, транзит обеспечивается СН). За счет агрегации данных головной узел кластера уменьшает поток заявок во внешнюю сеть.

Иерархическая маршрутизация позволяет гибко решать различные задачи с учетом возможностей сенсорных узлов. Иерархическая маршрутизация позволяет балансировать нагрузку сети. При этом узлы с высокой энергоемкостью (возможно с постоянным энергоснабжением) могут агрегировать данные и передавать их в сеть связи общего пользования, в то время как узлы с низкой энергоемкостью могут использоваться исключительно для сбора данных.

Иерархическая маршрутизация позволяет достаточно просто реализовать расписание и избежать коллизий. Члены кластера под управлением головного узла могут следовать вполне определенному расписанию передачи, приема и чтения информации. Следовательно, сенсорные узлы могут расходовать меньше энергии, находясь в состоянии покоя и активизируясь только во временные интервалы передачи, приема и чтения.

В результате, естественно, снижаются коллизии в кластере, и сеть может обслужить более высокую нагрузку. Иерархическая маршрутизация в связи с этим

часто используется для крупномасштабных беспроводных сенсорных сетей, состоящих из сотен и тысяч узлов.

Иерархическая маршрутизация проста в реализации. Хотя одноуровневая маршрутизация может использовать оптимальные маршруты, ее реализация, как правило, достаточно сложна. Ограниченные возможности сенсорных узлов при этом могут стать проблемой для реализации сложных алгоритмов и схем.

Иерархическая маршрутизация предполагает разделение соединений на внутрикластерные и внешние. Только головной узел кластера отвечает за внешние соединения, в то время как члены кластера взаимодействуют лишь на внутрикластерном уровне. Такая простая маршрутизация уменьшает число сообщений в кластере.

Иерархическая маршрутизация позволяет упростить рассылку запросов по сравнению с одноуровневой. Когда, например, из внешней сети или со стороны шлюза, необходимо разослать запрос, этот запрос направляется только к головным узлам кластеров. Головной же узел каждого кластера рассылает далее запрос членам кластера с учетом возможностей и необходимости. Такой подход также позволяет уменьшить число сообщений. Хотя иерархическая маршрутизация обладает и недостатками, такими, к примеру, как дополнительные затраты времени на синхронизацию и большой заголовок для кластерного управления, тем не менее, с учетом изложенного выше, иерархическая маршрутизация является предпочтительной для построения USN, особенно крупномасштабных.

#### 2.4 Алгоритмы выбора головного узла в кластере

Далее, в соответствии с вышеизложенным, будут рассмотрены алгоритмы для иерархических беспроводных сенсорных сетей. Основной проблемой при создании алгоритмов для таких сетей является выбор головного узла кластера. Существует два подхода к выбору головного узла кластера: случайный выбор и предопределенный выбор. Рассмотрим далее алгоритм случайного выбора головного узла, при использовании которого ротация головных узлов может

производиться между всеми членами кластера с учетом их характеристик в текущий момент времени.

#### 2.4.1. Алгоритм случайного выбора головного узла LEACH

Иерархический алгоритм адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) предполагает обеспечение баланса расхода энергии в беспроводной сенсорной сети. Алгоритм LEACH является базовым, существует множество алгоритмов, основанных на нем. Базовая идея LEACH состоит в следующем: сенсорные узлы могут быть случайным образом выбраны как головные на основе информации об их функционировании в предыдущий момент времени. При этом в кластере каждый сенсорный узел генерирует случайное число из интервала  $[0, 1]$ . Каждый сенсорный узел имеет порог  $T_h$  (LEACH), который соответствует предварительно определенному числу головных сенсорных узлов в сети. Если интегрированное случайное число меньше, чем  $T_h$  (LEACH), то сенсорный узел может стать головным; в противном случае этот узел остается только членом кластера. Вычисление  $T_h$  (LEACH) является ключевой задачей при реализации алгоритма LEACH.

$$T_h(LEACH) = \begin{cases} \frac{p}{1 - p \cdot \left(r \cdot \text{mod} \frac{1}{p}\right)} & \text{если } h \in G; \\ 0 & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (1)$$

В формуле (1) величина  $P$  – предопределенный процент головных узлов среди всех сенсорных узлов. Оптимальное значение  $P$  оценивается в 5% от общего числа сенсорных узлов. Текущий интервал функционирования сенсорной сети определяется как  $r$ ,  $G$  – число сенсорных узлов, которые не были выбраны головными за последние  $1/p$  интервалов.

Это уравнение определяет тот факт, что узел, который был головным в последних интервалах функционирования сенсорной сети, не имеет шансов вовсе или имеет минимальные шансы снова стать головным в рассматриваемом



интервале. В результате, такой выбор головного узла способствует оптимизации энергетических затрат каждого из сенсорных узлов сети.

Кроме того, при выборе головного узла другие сенсорные узлы выбирают одного из членов кластера для контроля мощности получаемого сигнала RSS (Received Signal Strength) от головного узла. После того, как кластер сформирован, головной узел рассылает расписание передачи и запрашивает у членов своего кластера передачу данных на основе известного TDMA подхода. В последующих фазах головной узел является ответственным за агрегирование данных и передачу их на шлюз и в сеть связи общего пользования. Весь сбор данных локализуется в кластере. После определенного времени нахождения в стабильной фазе, сеть снова переходит в стадию формирования.

При этом следует отметить, что стадия формирования существенно короче, чем стабильная. В связи с этим LEACH имеет довольно короткий заголовок. LEACH является очень эффективным алгоритмом. С его помощью достигается снижение энергозатрат в 7 и более раз по сравнению с прямым взаимодействием сенсорных узлов и от 4 до 8 раз по сравнению с другими алгоритмами маршрутизации.

В то же время LEACH не дает гарантии выбора «хорошего» сенсорного узла в качестве головного узла кластера. Поскольку в алгоритме LEACH нет предположения о текущем энергетическом состоянии сенсорного узла, то в качестве головного может быть выбран давно не избиравшийся член кластера с неудовлетворительными энергетическими характеристиками.

#### 2.4.2 Алгоритм HEED с предопределенным выбором головного узла

Гибридный распределенный энергоэффективный алгоритм кластеризации HEED (Hybrid Energy – Efficient Distributed) является развитием алгоритма LEACH. Для преодоления проблемы выбора «плохого» члена кластера в качестве головного узла в LEACH, алгоритм HEED предлагает использовать предопределенный выбор головного узла. Алгоритм HEED ставит вероятность выбора узла головным в

зависимость от его существующей энергоспособности, и решение принимается в зависимости от энергетических затрат.

Кроме того, алгоритм HEED учитывает многогранговую природу взаимосвязей в беспроводных сенсорных сетях для дальнейшего энергосбережения. HEED использует информацию о текущей энергоемкости сенсорного узла как основной параметр для выбора члена кластера в качестве головного узла.

Выбранный в качестве головного узел информирует близлежащие узлы о том, что он стал головным. Эти сообщения от головных узлов используются сенсорными узлами для выбора себе наилучшего головного узла и, соответственно, кластера. В случае, если головной узел кластера находится далеко от шлюза с сетью связи общего пользования, он может передать агрегированную информацию через головной узел другого кластера.

#### 2.4.3 Алгоритм ERA случайного выбора головного узла

Алгоритм осведомленности об остаточной энергии ERA (Energy Residue Aware) представляет собой еще один алгоритм иерархической маршрутизации.

Алгоритм ERA тоже является развитием алгоритма LEACH и включает в анализ вопроса выбора головного узла в кластере затраты на осуществление взаимодействия. Затраты на осуществление взаимодействия включают в себя остаточную энергию головного узла кластера (ECH-rem), затраты энергии на взаимодействие головного узла с базовой станцией (EtoBS), затраты энергии на взаимодействие членов кластера с головным узлом (EtoCH). В этом состоит принципиальная разница с алгоритмом HEED: алгоритм ERA использует ту же схему выбора головного узла, что и LEACH (случайный выбор), но обеспечивает лучший выбор головного узла за счет использования дополнительных параметров, определенных выше.

Уравнения (2) помогают определять затраты кластера при выборе того или иного узла в качестве головного и найти головной узел кластера с максимальной

остаточной энергоемкостью. В (2) множестве  $S_C$  является множеством для головных узлов, множество  $S_N$  является множеством для членов кластера.

$$\left\{ \begin{array}{ll} (E_{CH-res})_i = (E_{CH-rem})_i - (E_{toBS})_i & i \in S_C; \\ (E_{CH-res})_i = (E_{CH-rem})_i - (E_{toBS})_i & j \in S_N, \forall i \in S_C; \\ \max\{(E_{CH-res})_i + (E_{nonCH-res})_j / \forall i \in S_C\} & j \in S_N. \end{array} \right. \quad (2)$$

Алгоритм ERA может использоваться как для внутрикластерных, так и для межкластерных соединений.

#### 2.4.4 Алгоритмы PEGASIS и иерархический PEGASIS

Алгоритм PEGASIS (Power-Efficient Gathering Sensor Information Systems) – эффективная по мощности система сбора информации от сенсоров – не имеет прямого отношения к кластерной организации беспроводных сенсорных сетей, но будет рассмотрена далее для полноты анализа основных алгоритмов маршрутизации в USN. Алгоритм PEGASIS предусматривает основанный на LEACH алгоритм организации сенсорных узлов в последовательную цепочку и периодическое обновление первого узла в цепочке так же, как это предусмотрено в кластерных USN.

В алгоритме PEGASIS цепочка формируется так, чтобы сенсорные узлы взаимодействовали только с ближайшими и только один из узлов являлся бы передающим информацию на базовую станцию в каждом из интервалов функционирования сенсорной сети.

Для определения ближайших узлов каждый узел использует значение RSS для оценки расстояния до узла и затем выбирает значение мощности сигнала так, чтобы взаимодействовать только с ближайшими узлами. Построение цепочки позволяет минимизировать расстояние, на которое передается информация, а ротация первого сенсора в цепочке увеличивает длительность функционирования отдельных сенсорных узлов. Такой подход позволяет снизить общее энергопотребление для беспроводных сенсорных сетей и увеличить длительность функционирования USN в целом.

Цепочки алгоритма PEGASIS создают дополнительные задержки при передаче информации. Кроме того, динамическое изменение топологии в алгоритме PEGASIS требует, чтобы каждый сенсорный узел знал об энергетических возможностях своих ближайших соседних узлов для вычисления маршрута передачи данных. Последнее существенно усложняет заголовок и помимо этого приводит к проблемам при функционировании сенсорной сети в условиях большой нагрузки. Для снижения задержки был предложен иерархический алгоритм PEGASIS.

Алгоритм иерархический PEGASIS использует CDMA для кодирования сигналов и пространственное разделение сенсорных узлов. Алгоритм строится в виде иерархического дерева, причем каждый выбранный узел какого-либо уровня передает данные на узел верхнего уровня иерархии. Этот метод позволяет обеспечить параллельную передачу данных и уменьшить задержки сигналов до значений  $O(\lg N)$ , где  $N$  – число узлов.

#### 2.4.5 Алгоритм RRCH

Алгоритм циклической очередности выбора головного узла в кластере RRCH (Round-Robin Cluster Head) предполагает формирование кластера только одновременно. После фиксации кластера для выбора головного узла в нем на протяжении его функционирования используется известный метод циклической очередности. Так же, как и в LEACH, каждый из членов кластера может стать головным узлом, головной узел задает расписание для членов кластера и т.д.

С учетом простоты процесса формирования кластера, RRCH избегает потерь энергии при рекластеризации. Естественно, что с точки зрения энергетических параметров RRCH имеет при этом лучшие результаты, чем LEACH. Однако жесткая фиксация кластера приводит к тому, что один из кластеров может перестать выполнять свои функции с надлежащим качеством обслуживания быстрее, чем в LEACH, в котором рекластеризация приводит к возможности распределить ресурсы равномерно между всеми кластерами одной сенсорной сети.

### 3 Обзор средств моделирования беспроводных сенсорных сетей

Наиболее эффективным средством для оценки показателей качества инфокоммуникационных систем является имитационное моделирование. Для этой цели в настоящее время разработано большое количество сетевых симуляторов. Рассмотрим наиболее распространённые из них.

#### 3.1 Симулятор NS-2

NS-2 является программным обеспечением (ПО) с открытым кодом (Open Source software), предназначенным для дискретно-событийного моделирования проводных и беспроводных (мобильных) систем связи). Основными языками в составе симулятора являются C++ и Tcl (Tool Command Language). Для создания симуляций используется OTCL (Object Tcl). Программа находится в свободном доступе, ее можно скачать на сайте программы и использовать в академических целях.

Симулятор поддерживает большое количество протоколов, типов сетей, элементов сети, моделей передачи данных. Для моделирования ad-hoc сетей поддерживаются протоколы маршрутизации AODV, DSDV, DSR и TORA, требующие дополнительной доработки для обеспечения возможности работы с мобильными узлами. В симуляторе NS-2 существует модель, которая реализует стандарт IEEE 802.15.4. Структура компонентов модели LR-WPAN (Low-Rate Wireless Personal Area) и основные её функции представлены на [рисунке 7](#).



Рисунок 7 – Структура компонентов модели LR-WPAN NS-2

Следует упомянуть, что в первых версиях модели были реализованы базовые функции сетевого уровня ZigBee, но позднее они были исключены из общего доступа, поскольку не в полной мере соответствовали данному стандарту. В связи с этим на текущий момент можно использовать только существующие в NS-2 протоколы маршрутизации, которые не до конца учитывают особенности беспроводных сенсорных сетей. Документации по применению симулятора немного, мало обучающей литературы. Предлагается обращаться к списку часто задаваемых вопросов и анализировать исходный код модели.

### 3.2 Симулятор Cooja

Симулятор сети, для операционной системы (ОС) Contiki, специально разработанный для беспроводных сенсорных сетей, позволяющий оценить возможности разрабатываемой сети до ее непосредственной реализации. Contiki – портативная ОС для устройств с низким энергопотреблением, таких как сенсорные узлы.

Библиотеки Contiki загружаются и компилируются симулятором, и с помощью определенных функций происходит контроль и анализ сети. Несмотря на то, что симулятор разработан для беспроводных сенсорных сетей, он также поддерживает стек протоколов TCP/IP. На [рисунке 8](#) показано рабочее окно симулятора Сооја,

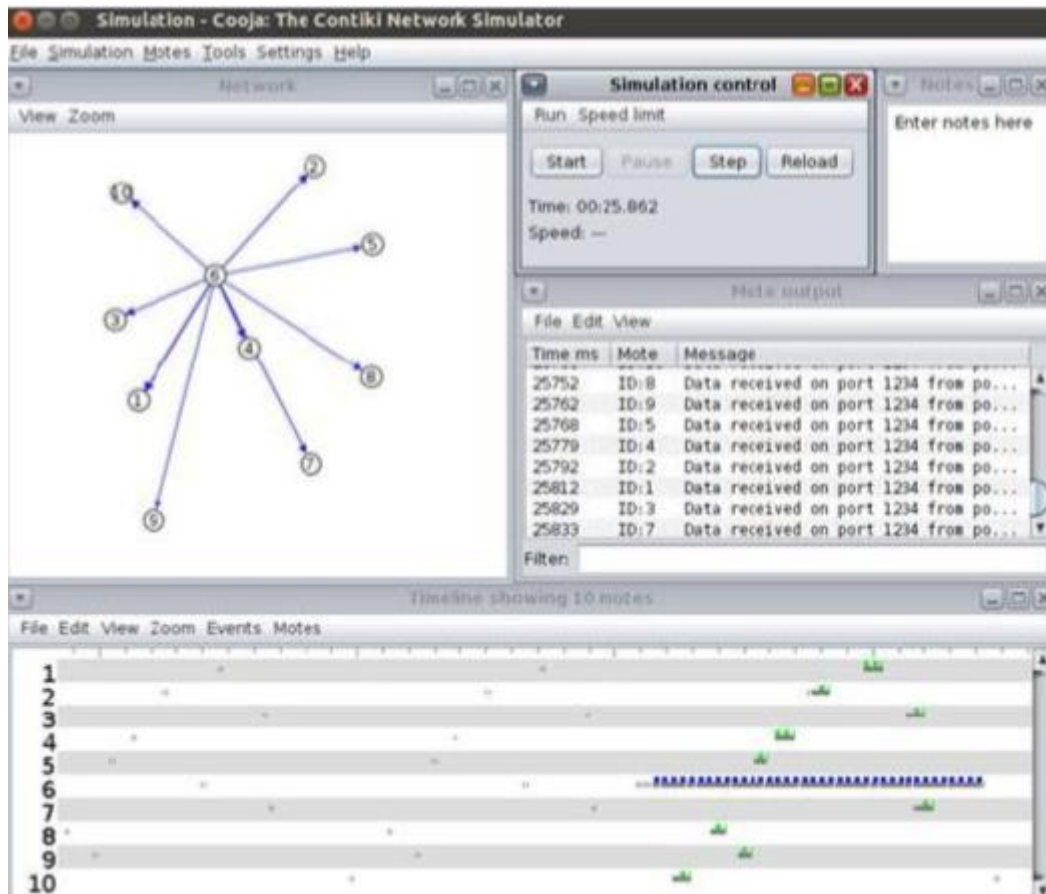


Рисунок 8 – Окно симулятора Сооја

Симулятор для создания моделей использует язык Java, однако позволяет писать программы для сетевых устройств на языке C. Сооја является расширяемым симулятором, для этой цели используются дополнительные плагины и интерфейсы. Интерфейс описывает свойства сенсорного узла, плагины позволяют формировать симуляцию, например, контролировать скорость симуляции или наблюдать и контролировать трафик между сенсорными узлами. Симулятор поддерживает одновременное моделирование нескольких сетей.

Одной из особенностей симулятора Cooja является одновременное моделирование на трех разных уровнях - сетевом уровне, уровне операционной системы и уровне инструкций машинного кода. Изначально Cooja разработан для Linux и Windows/Cygwin, но позже появилась версия и под MacOS.

### 3.3 Симулятор TOSSIM (TinyOS Simulator)

TinyOS - система, специально разработанная для сенсорных сетей. Она имеет компонентную программную модель, описанную на языке nesC. TinyOS не является операционной системой в традиционном понимании. Это программная среда для встроенных систем и набор компонентов, которые позволяют создавать имитационные модели конкретным приложением, например, таким как TOSSIM.

Симулятор TOSSIM может моделировать сети размерностью до нескольких тысяч узлов, и анализируя их, предсказывать поведение сети с высокой точностью. Моделируя сети с возможными помехами и ошибками, симулятор создает простую, но вместе с тем эффективную модель всевозможных взаимодействий узлов в сети.

Описывая маломощную модель устройств TinyOS, симулятор моделирует поведение сенсорного узла с большой достоверностью, описывая его характеристики и проводя большое количество экспериментов. Для удобства разработчиков, TOSSIM поддерживает графический интерфейс пользователя, обеспечивая детальную визуализацию и воспроизведение действий запущенной имитационной модели.

Приведем общие характеристики эмулятора TOSSIM:

- масштабируемость – симулятор поддерживает модель сети, состоящую из большого количества узлов, с различной конфигурацией. Самая большая из всех разработанных сетей TinyOS состоит приблизительно из 850 узлов, симулятор способен поддерживать такие модели; -
- достоверность - симулятор описывает различные взаимодействия узлов, которые могут возникнуть в реальной сети;



- связанность – симулятор связывает алгоритм построения с его графическим представлением, позволяя разработчикам тестировать программный код, который требует запуска на реальном устройстве, а также производить визуализации сети.

Архитектура TOSSIM (рисунок 9) состоит из следующих элементов:

- дискретный поток событий;
- набор программных компонентов, которые заменяют соответствующие аппаратные компоненты реальных мотов;
- средства связи, предоставляющие возможность внешним программам взаимодействовать с эмулятором.

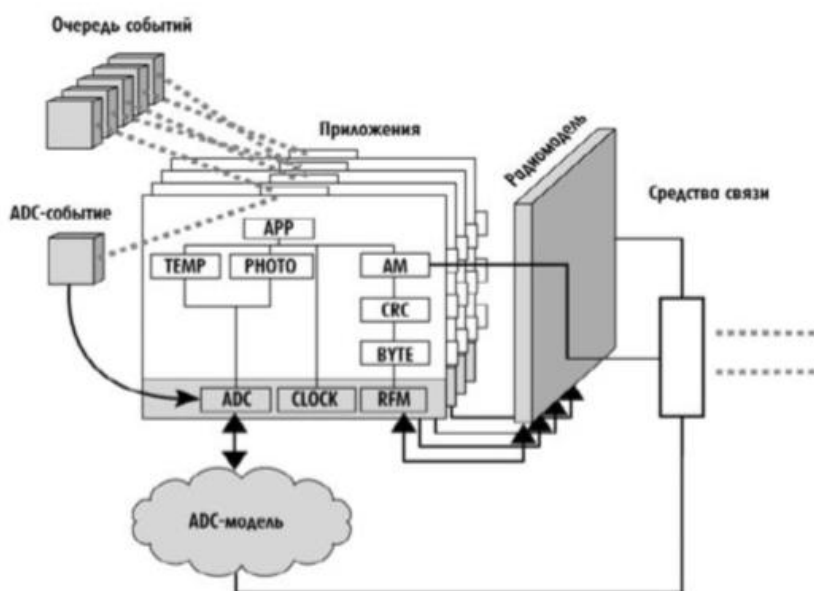


Рисунок 9 – Архитектура эмулятора TOSSIM

### 3.4 Симулятор OMNeT++

Данный симулятор представляет собой систему моделирования на основе дискретных событий которая может быть использована для таких задач как: - моделирование проводных и беспроводных коммуникационных систем; - протоколов моделирования; - моделирование сетей массового обслуживания.

Программа OMNeT++ подходит для моделирования любой сети, основой которой является дискретное событие. Процесс удобно отображается в виде объектов, обменивающимися сообщениями. OMNeT++ использует язык C++ для имитационных моделей. Имитационные модели в совокупности с языком высокого уровня NED собираются в крупные компоненты и представляют собой большие системы.

Симулятор имеет графические инструменты для создания моделей и оценки результатов в режиме реального времени. Модели программы собираются из компонентов множественного использования, называемых модулями. Модули можно использовать много раз и объединять по принципу блоков LEGO.

Модули соединяются между собой с помощью портов, и объединяются в составные модули с использованием высокоуровневого языка программирования NED . Количество вводимых модулей неограниченно. Модули связываются посредством передачи сообщений, которые содержат произвольные структуры данных.

Модули могут передавать сообщения по определенным портам и соединениям серверу или непосредственно друг другу. Последнее, к примеру, полезно для моделирования беспроводных сетей.

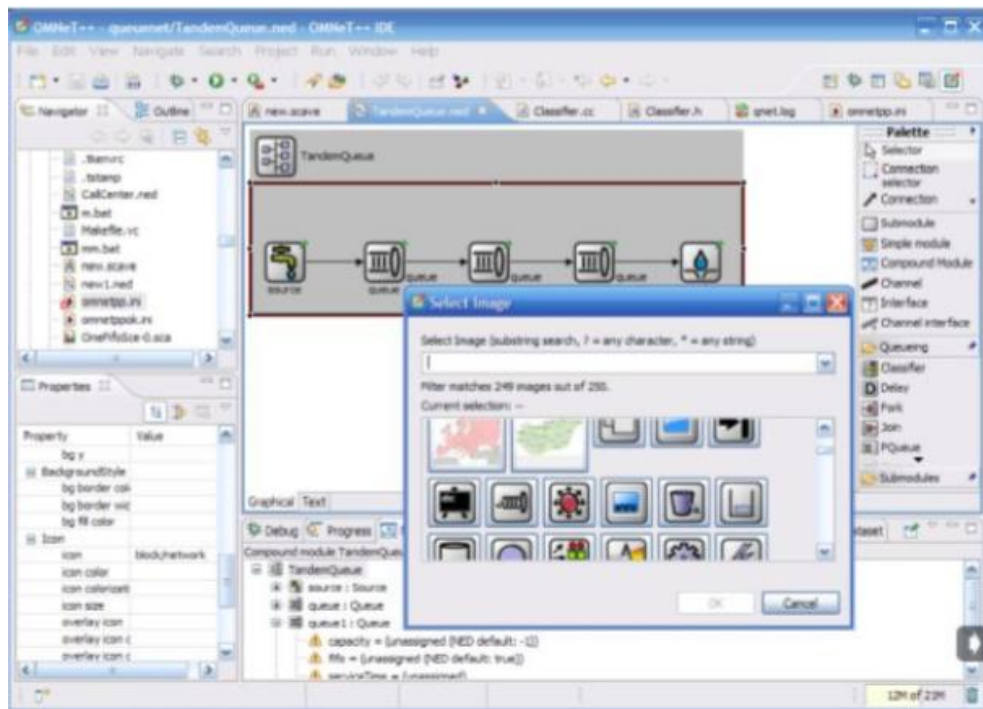


Рисунок 10 – Графический NED редактор

Процесс моделирования может работать в различных пользовательских интерфейсах. Графически анимированный пользовательский интерфейс удобен для демонстрации и отладки сети, а интерфейс командной строки удобен для внесения изменений.

Компоненты OMNeT++:

- корневая библиотека моделирования;
- OMNeT ++ IDE на базе платформы Eclipse;
- графический интерфейс выполняемого моделирования, ссылки на исполняемый файл (Tkenv);
- пользовательский интерфейс командной строки для выполнения моделирования (Cmdenv);
- документация, примеры.
- OMNeT++ работает на базе самых распространенных операционных систем: (Linux, Mac OS/X, Windows).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог исследованию, касающемуся беспроводных сенсорных сетей, нами сделан вывод о том, что наиболее подходящим стандартом является ZigBee, так как обладает большим максимальным количеством узлов в сети, лучшими энергетическими характеристиками

В ходе нашей работы были исследованы архитектура сенсорных сетей, архитектура сенсоров. Были исследованы алгоритмы выбора головного узла в кластере и приведен обзор средств моделирования беспроводных сенсорных сетей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агафонов Н. Технологии беспроводной передачи данных, // Беспроводные технологии. 2014. №1.
2. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN // БХВ-Петербург. 2014. С 94-116.
3. Варгаузин В.А. Радиосети для сбора данных от сенсоров, мониторинга и управления на основе стандарта IEEE 802.15.4 // ТелеМультиМедиа. 2015. № 6. – С. 23-27.
4. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Беспроводные персональные сети на основе ZigBee. Учебное пособие. // СПб: ГУАП, 2015. – 58 с.
5. Пушкарев О.И. Построение сети ZigBee // Беспроводные технологии. 2013. № 1. – С. 34-38.
6. Соколов М.А. Программноаппаратное обеспечение беспроводных сетей на основе технологии ZIGBEE/802.15.4 // Электронные компоненты. 2014. № 12. С. 80-87.
7. Солодунов С. Средства разработки Ember для быстрой реализации проектов ZigBee // Беспроводные технологии 2014. № 3. – С. 55-61
8. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю. Интернет вещей // Самара: ПГУТИ, 2015. С. 46-66.
9. Вишневский А.М., Ляхов А.И. Широкополосные беспроводные сети передачи информации // Москва: Техносфера, 2005.
10. Шахнович И.В., Персональные беспроводные сети стандартов IEEE 802.15.3 и 802.15.4 // Электроника: НТБ., 2004. №6. С 32-36