



# РАЗРАБОТКА ОБЪЕКТНОЙ МОДЕЛИ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

УДК 004.75

**КУДР Латиф Абдзиад**

аспирант кафедры «Автоматизированные системы управления» Донецкого национального технического университета.

**Научные интересы:** беспроводные сенсорные сети.

## ВВЕДЕНИЕ

Беспроводная сенсорная сеть (БСС) — это распределённая, самоорганизующаяся сеть множества датчиков (сенсоров) и исполнительных устройств, объединённых между собой посредством радиоканала. Область покрытия подобной сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счет способности ретрансляции сообщений от одного элемента к другому. Объединённые в беспроводную сенсорную сеть датчики образуют территориально-распределённую самоорганизующуюся систему сбора, обработки и передачи информации. Основной областью применения БСС является контроль и мониторинг измеряемых параметров физических сред и объектов [1, 2, 3].

Ввиду значительной сложности БСС как объекта формального описания и проектирования, до настоящего времени оценки ожидаемого эффекта от тех или иных конструктивных решений а, значит и от капиталовложений, необходимых для их реализации, обычно базируются на общих рассуждениях, не подкреплённых расчетом, когда влияние отдельных факторов оценивается интуитивно. Поэтому разработка моделей и средств для анализа функционирования БСС, ее оптимизации имеет актуальное значение.

## 1. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ БСС

Беспроводная сенсорная сеть как объект моделирования представляет собой сложную динамическую систему. Для исследования таких систем используется системный анализ, основным средством которого является декомпозиция. В данной работе была выполнена декомпозиция БСС на основе объектно-ориентированного подхода [4, 5].

Беспроводная сенсорная сеть представляет собой распределённую сеть, состоящую из множества узлов, содержащих: микроконтроллер, трансивер, датчики (сенсоры) и элемент питания. Узлы объединены посредством радиоканала. Область покрытия сенсорной сети может составлять от нескольких метров до нескольких километров за счет ретрансляции сообщений от одного элемента к другому. На узлах БСС функционируют приложения, которые с определенной периодичностью производят опрос датчиков, передачу данных по сети и ретрансляцию пакетов с данными других узлов.

В результате проведенного системного анализа выделены следующие типовые компоненты БСС:

- узел;
- канал передачи данных;
- приложение;
- сетевой протокол;
- наблюдаемые явления.

Для моделирования выделенных типовых компонентов БСС разработаны соответствующие классы объектов. В следующем пункте представлены объектные модели типовых компонентов БСС, выделенных с помощью объектно-ориентированного анализа. Затем раскрывается внутренняя организация общей модели БСС.

## 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ТИПОВЫХ КОМПОНЕНТОВ БСС

*Узел БСС* — это устройство предназначенное для сбора и первичной обработки информации об окружающей среде и передачи этой информации по сети на другие узлы.

Для разработки объекта описывающего работу узла БСС рассмотрим подробнее что он из себя представляет.

Узлы БСС производятся уже несколько десятилетий и используются в различных областях – от мониторинга землетрясений до военного назначения. Современные миниатюрные узлы начали разрабатываться в 1998 году в проекте Smartdust университета Беркли при поддержке агентства DARPA [6] и проекте NASA Sensor Web [7]. Одной из целей проекта Smartdust было создание автономного измерительного и коммуникационного устройства объемом один кубический миллиметр. Несмотря на то что эта цель не была достигнута, проект дал старт многим исследовательским проектам в области БСС и оказал большое влияние на развитие этой технологии.

Основными компонентами узла БСС являются *микроконтроллер, трансивер, память, источник электропитания* и один или более *датчик*. Остановимся подробнее на рассмотрении этих элементов.

*Микроконтроллер* узла БСС предназначен для первичной обработки данных, получаемых от датчиков и управления всем остальными компонентами узла. Альтернативой использованию микроконтроллеров в узлах БСС могут служить микропроцессоры, цифровые сигнальные процессоры, FPGA или ASIC. Однако в подавляющем большинстве случаев используются именно микроконтроллеры из-за невысокой стоимости, наличия периферийных устройств, простоты программирования и небольшого потребления энергии. Микропроцессоры общего назначения имеют, как правило, большее потребление чем микроконтроллеры и, поэтому, в большинстве случаев не годятся для применения в узлах БСС. Цифровые сигнальные процессоры активно используются для широкополосной беспроводной коммуникации, но БСС обычно не требуют больших скоростей передачи данных. Поэтому преимущества цифровых сигнальных процессоров обычно не имеют большого значения для узлов беспроводной сенсорной сети. FPGA или ASIC могут быть сконфигурированы под требования БСС но это имеет гораздо большую трудоемкость чем при использовании микроконтроллеров.

*Трансивер.* Узел БСС обычно использует так называемый свободный ISM диапазон (англ. Industrial, Scientific, Medical: индустриальный, научный и медицинский диапазон) который занимает полосу частот от 2400 до 2483,5 МГц

в США и Европе и от 2471 до 2497 МГц в Японии. В общем случае для беспроводной коммуникации могут использоваться такие среды как радиочастота, оптические сигналы и сигналы в инфракрасном диапазоне. Для оптической передачи требуется меньше энергии, однако требуется прямая видимость и она чувствительна к атмосферным условиям. Передача в инфракрасном диапазоне кроме этого характеризуется невысокой пропускной способностью. Использование радиоканала является наиболее подходящим для БСС. Обычно в узлах БСС используются трансмиттеры и ресиверы работающие на не лицензируемых частотах 173, 433, 868 или 915 МГц и 2.4 ГГц. В большинстве узлов используются трансиверы – устройства которые объединяют функциональность и передатчиков (трансмиттеров) и приемников (ресиверов). В модели этот компонент представлен свойствами «Потребление в режиме приема», «Потребление в режиме передачи», «Потребление в режиме ожидания». Все остальные свойства имеющие отношение к приему и передаче данных вынесены в класс «Канал передачи данных»

*Память.* Для цели энергосбережения узлы БСС обычно комплектуются энергонезависимой внешней памятью, выполненной по Флэш технологии. Эта память также обладает хорошим соотношением цены к объему. Требования к памяти сильно зависят от конкретного приложения для которого разрабатывается БСС.

*Источник электропитания.* Беспроводные сенсорные сети используются для тех задач где затруднительно или вообще невозможно использовать обычные проводные сети без автономного питания. Поэтому в них используются автономные источники питания в виде батарей или аккумуляторов. Кроме этого, узлы БСС часто располагаются в труднодоступных местах, где замена или подзарядка батарей является затратной операцией. Поэтому к источнику питания и энергопотреблению узла предъявляются высокие требования. Узел потребляет энергию для съема показаний с датчиков, передачи данных по сети и обработки данных. Наиболее затратной операцией является передача данных по сети. Затраты на передачу одного килобита на дистанцию 100 метров примерно равны затратам на выполнение трех миллионов инструкций микроконтроллером.

В качестве источника электроэнергии для узла БСС могут выступать как обычные батареи так и аккумуляторы. Они в свою очередь классифицируются по типу

используемых электрохимических материалов. Выделяют никель-кадмиевые (NiCd), никель-цинковые (NiZn), никель-металлгидридные (NiMH) и литий-ионные (Li-ion). Некоторые современные узлы БСС имеют возобновляемые источники энергии такие как солнечные батареи, вибрационные источники или источники работающие за счет разницы температур. Для сбережения энергии в узлах БСС применяются всевозможные техники.

Электропитание является одним из критических ресурсов, необходимых для работы БСС. Поэтому вопросам связанным с уменьшением потребления энергии и, в частности, моделирования энергопотребления, посвящено множество работ. Например, в работе [8] предлагаются математические модели расходования электроэнергии каждым из элементов сети, на основании которых строится общая модель.

*Датчики (Сенсоры).* Датчики — это элемент преобразующий наблюдаемую величину (например, температуру или давление) в удобный для использования сигнал. Для использования в узлах БСС используются датчики имеющие на выходе аналоговый либо цифровой электрический сигнал. Если используется непрерывный аналоговый сигнал, то он преобразуется в цифровой с помощью АЦП и далее поступает в контроллер для обработки. Современные микроконтроллеры используемые в узлах БСС имеют в своем составе несколько линий АЦП. Датчики используемые в БСС должны иметь небольшой размер, потреблять мало энергии и быть пригодными в соответствующих условиях окружающей среды.

Датчики разделяют на три категории: пассивные всенаправленные, пассивные направленные и активные датчики. Пассивные датчики выполняют измерения без каких-либо манипуляций с окружающей средой во время измерения. В них расход электроэнергии вызван только необходимостью усиления аналогового сигнала. Активные датчики, напротив, активно взаимодействуют со средой во время измерений. Например, сонар или радар требуют постоянного расхода энергии. Направленные датчики выполняют измерения в определенном ограниченном направлении, например, как в видеокамере. Всенаправленные датчики не имеют направления и делают измерения во всех направлениях. Большинство теоретических работ в обла-

сти БСС выполнены для случая пассивных всенаправленных датчиков. Например, в работе [9] рассматривается задача нахождения оптимального покрытия датчиками определенной территории.

В нашей модели датчики представлены отдельным классом объектов «Датчик».

Таким образом, для моделирования узла БСС выделены три объекта: «Узел БСС», «Источник электропитания», «Датчик». Основные свойства классов этих объектов описаны в табл. 1-3.

Таблица 1 –

**Основные свойства класса  
“Узел БСС” (Node)**

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Идентификатор	Строка
2	Датчики	Вектор указателей на объекты класса “Датчик”
3	Приложение	Вектор указателей на объекты класса “Приложение”
4	Источники питания	Вектор указателей на объекты класса “Источник питания”
5	Связи	Вектор указателей на объекты класса “Канал”
6	Сетевой протокол	Указатель на объект класса “Сетевой протокол”
7	Объем памяти	Целое число
8	Потребление в режиме обработки	Вещественное число
9	Потребление в режиме приема	Вещественное число
10	Потребление в режиме передачи	Вещественное число
11	Потребление в ждущем режиме	Вещественное число

Таблица 2 –

**Основные свойства класса “Источник питания” (PowerSupply)**

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Название	Строка
2	Описание	Строка
3	Ёмкость	Вещественное число
4	Саморазряд	Вещественное число
5	Возобновление	Вещественное число

Таблица 3 –

**Основные свойства класса “Датчик”  
(Sensor)**

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Название	Строка
2	Описание	Строка
3	Наблюдаемое явление	Указатель на объект класса «Наблюдаемое явление»
4	Физическая величина	Строка
3	Длительность опроса	Вещественное число
4	Потребление в режиме опроса	Вещественное число
5	Потребление в режиме ожидания	Вещественное число
6	Объем результата опроса	Целое число

В качестве источника электропитания в узлах БСС обычно используется батарея гальванических элементов или аккумулятор. Максимально возможный полезный заряд аккумулятора называется зарядной ёмкостью, или просто ёмкостью. Ёмкость аккумулятора — это заряд, отдаваемый полностью заряженным аккумулятором при разряде до наименьшего допустимого напряжения. В системе СИ ёмкость аккумуляторов измеряют в кулонах, на практике часто используется внесистемная единица – ампер-час.  $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Кл}$ . Свойство «Ёмкость» нашего класса имеет тип – вещественное число и выражает емкость в ампер-часах.

Для количественной оценки саморазряда будем использовать величину потерянной за определенное время емкости, выраженную в процентах от номинальной емкости. За промежуток времени примем интервал времени, равный одному месяцу. Несмотря на то, что, например, для NiCd аккумуляторов считается допустимым саморазряд до 10% в течение первых 24 часов после окончания заряда, аккумуляторы такого типа не применяются для автономных узлов БСС. Для NiMH аккумуляторов саморазряд намного меньше, а для Li-ion пренебрежимо мал и оценивается за месяц. Саморазряд в герметизированных свинцово-кислотных аккумуляторах составляет 40% в год при 20 °С и 15% при 5 °С. При более высоких температурах хранения саморазряд увеличивается: при 40 °С батареи лишаются 40 % емкости за 4-5 месяцев [10].

Для количественной оценки возобновления емкости батареи при использовании возобновляемых источников энергии будем использовать величину полученной ими за определенное время емкости, выраженную в процентах от номинальной емкости. За промежуток времени, как и в случае саморазряда, примем интервал времени, равный одному месяцу.

За передачу данных между узлами отвечает *беспроводный канал*. При моделировании канала необходимо учитывать вероятности появления ошибки при передаче пакетов. Эта вероятность рассчитывается на основе величины SINR (Signal to Interference plus Noise Ratio) – отношения мощности сигнала к мощности помех и шума. Величина SINR рассчитывается на основе данных о мощности передатчика и потерь при распространении радиоволн между передатчиком и приемником.

При моделировании беспроводного канала передачи данных необходимо очень осторожно подходить к выбору уровня декомпозиции модели. Так как беспроводной канал является очень сложным объектом, для его точного моделирования необходимо учитывать очень много разнообразных факторов – таких как особенности распространения радиоволн в различных средах и ландшафт. Однако, включение в модель БСС модели ландшафта и модели распространения волн во многих случаях может быть избыточным. Поэтому, ввиду большой вычислительной сложности соответствующих алгоритмов моделирования, часто применяют упрощенные модели.

В существующих симуляторах можно встретить модели беспроводных каналов связи с совершенно различными уровнями детализации. Так в TOSSIM (Tiny Operating System Simulator) используется простая модель идеального приемника [11]. В ns-2 используются модели распространения радиоволн: модель свободного пространства и плоской земли. Это относительно простые модели, описывающие зависимость мощности сигнала от расстояния простыми функциями. В других моделях, например в модели Гавриленко и др. [12], используются более сложные зависимости учитывающие как характеристики приемника так и окружающей среды. В этой модели выделены два дополнительных модуля: модель ландшафта и модель распространения радиоволн. В модели ландшафта для представления

данных о поверхности используются массивы данных о высоте в каждой точке. На основе этих данных генерируются двумерные профили подстилающей поверхности на трассе между приемником и передатчиком. Далее эти данные используются в блоке расчета распространения радиоволн. Эта модель отвечает за вычисление потерь при помощи метода параболического уравнения и вычисления вероятности битовой ошибки в зависимости от значения SINR.

Выбранный нами объектно-ориентированный подход к построению модели БСС позволяет гибко выбирать уровень требуемой декомпозиции радиоканала. Там, где детали распространения радиоволн можно представить просто одним интегрированным показателем – вероятностью ошибки, необходимо выбрать именно этот подход, так как он обеспечивает наибольшую производительность симулятора. Там, где такая грубая модель неприемлема – ее можно заменить более сложной моделью радиоканала.

Основные свойства класса объектов “Канал” представлены в табл. 4.

Таблица 4 –

**Основные свойства класса “Канал” (Channel)**

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Название	Строка
2	Источник	Указатель на объект класса «Узел БСС»
3	Приемник	Указатель на объект класса «Узел БСС»
4	Вероятность возникновения ошибки при передаче пакета	Указатель на объект реализующий алгоритм вычисления вероятности возникновения ошибки при передаче пакета

При разработке программного обеспечения БСС обычно используется событийно-ориентированное программирование [13]. Это парадигма программирования, в которой выполнение программы определяется событиями — сообщениями других программ и потоков, событиями операционной системы (например, поступлением сетевого пакета).

Событийно-ориентированное программирование можно также определить, как способ построения компью-

терной программы, при котором в коде (как правило, в головной функции программы) явным образом выделяется главный цикл приложения, тело которого состоит из двух частей: выборки события и обработки события.

Причинами популярности данной парадигмы программирования в БСС является асинхронный режим коммуникаций в таких сетях и высокая вероятность отказа отдельных узлов (при этом общая надежность системы может быть достаточно высокой). Этот подход позволил решить несколько важных проблем существовавших в БСС: динамическая реконфигурация, многоадресная рассылка и устранение перекрестных связей между компонентами.

Прикладные программы БСС работают на специализированных операционных системах используя также возможности ПО промежуточного слоя (middleware). Несмотря на большое разнообразие видов программного обеспечения БСС, основных задач, которые оно выполняет, немного:

- периодический опрос датчиков;
- выбор соседнего узла для передачи сетевого пакета;
- передача сетевого пакета определенному соседнему узлу;
- передача сетевого пакета всем соседним узлам;
- прослушивание сети;
- прием сетевого пакета;
- предобработка данных (агрегация).

Для моделирования работы приложений разработаны два класса объектов: “Приложение” (Application) и “Сетевой протокол” (Protocol). Характеристики этих классов приведены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 –

**Основные свойства класса “Приложение” (Application)**

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Название	Строка
2	Наблюдаемое явление	Указатель на объект класса “Наблюдаемое явление”
3	Периодичность опроса датчиков	Вещественное число

Одной из основных частей системного программного обеспечения БСС являются *протоколы передачи данных*. В качестве основного протокола сетевого уровня в TinyOS 2.x. используется Collection Tree Protocol (СТР) [14]. СТР является дейтаграммным протоколом с адресацией любому устройству группы для передачи данных одному из корней дерева сети. Древоподобная структура сети образуется благодаря особенностям протокола СТР. Передача данных в шлюз, подключенный к базовой станции является общим требованием для любой БСС, поэтому корнями дерева сети являются шлюзы. Когда у узла есть данные, которые должны быть переданы, он посылает их вверх по дереву в направлении ближайшего шлюза. Кроме данных, которые узел получает от своих датчиков, он также ретранслирует данные, переданные ему другими узлами. Таким образом образуется дерево сети. Иногда, в зависимости от особенностей БСС, узлы должны быть в состоянии обработать пакеты, которые проходят через них для того, чтобы собрать статистику, вычислить агрегаты, или предотвратить избыточные передачи.

Рассмотрим процесс формирования дерева ретрансляций протокола СТР. Каждый узел в СТР содержит таблицу соседей, в которой хранится ID узла и его стоимость передачи. В качестве метрики для стоимости передачи используется значение ETX.

Беспроводные сенсорные сети под управлением данного протокола образуют древоподобную структуру, в которой шлюзы являются корнями, а сенсорные узлы – листьями. Для генерации маршрутов узлы используют градиент маршрутизации – ETX. Корень имеет значение ETX равное 0. ETX узла рассчитывается как сумма ETX его родительского узла и ETX связи с ним. При выборе родительского узла предпочтение отдается тому, где значение ETX меньше.

Принципы выбора ретранслирующего узла в СТР можно описать следующими пунктами:

- каждый узел независимо определяет минимальную суммарную стоимость передачи;
- каждый узел периодически рассылает рассчитанную им минимальную суммарную стоимость своим соседним узлам;
- получая минимальную общую стоимость от соседних узлов, узел обновляет информацию о своей минимальной стоимости, если обнаруживается

лучший путь и рассылает это новое значение соседям.

На этапе инициализации каждый узел устанавливает значение «неопределенное» для своей суммарной стоимости передачи к базовому узлу ETX. Базовый узел устанавливает свое ETX в 0. Когда соседи получают сообщение от базового узла, они обновляют свои стоимости передачи. Узлы, обновившие свое значение распространяют эту информацию дальше по сети. Шаг за шагом каждый узел определяет минимальное расстояние к базовому узлу. На рис. 1 изображена диаграмма последовательности процесса инициализации.

Для моделирования процесса передачи пакетов в БСС был разработан класс «Сетевой протокол». Его свойства представлены в табл. 6.

Таблица 6 –

Основные свойства класса «Сетевой протокол» (Protocol)

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Длительность интервала времени прослушивания сети	Вещественное число
2	Длительность интервала времени между передачами пакетов	Вещественное число
3	Длительность интервала времени между прослушиваниями сети	Вещественное число
4	Алгоритм определения узла передачи	Указатель на объект реализующий алгоритм

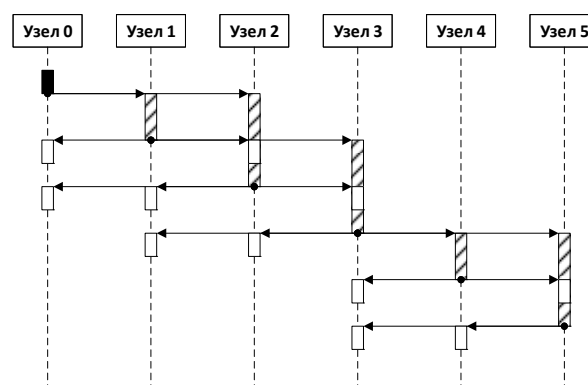


Рисунок 1 – Диаграмма последовательности процесса формирования дерева ретрансляции

Таблиця 7 –

**Основные свойства класса “Наблюдаемое явление” (Phenomena)**

№ п/п	Наименование свойства	Тип
1	Название явления	Строка
2	Физическая величина	Строка
3	Единицы измерения	Строка
4	Точность	Целое число
5	Разрядность данных	Целое число
6	Модель случайного процесса	Указатель на объект реализующий алгоритм вычисления значений СП

Для моделирования процесса снятия показаний датчиков, их обработки и передачи нами была разработана модель наблюдаемого явления. Эта модель является источником данных для моделей датчиков.

Узлы БСС работают с показаниями датчиков в цифровой форме. Датчик подключенный к микроконтроллеру может быть аналоговым, однако для передачи, хранения и обработки показания всегда преобразовываются в цифровую форму. Поэтому выходной информацией модели исследуемого явления являются временные ряды. Исходя из этого можно утверждать, что построение модели исследуемого явления сводится к построению моделей случайных процессов.

Требования к точности модели исследуемых явлений для большинства задач, возникающих при проектировании и оптимизации БСС, невысокие. Например, для моделирования сетевого обмена нам необходимо знать только разрядность данных. Однако, если на узлах применяются какие-либо методы сжатия данных с потерей или без потери качества, то требования к точности модели достаточно высоки. В этом случае необходимо учитывать и тренд, и сезонные составляющие и случайные возмущения. Поэтому разрабатываемая модель исследуемого явления должна быть достаточно гибкой.

Модели можно строить по выборочным данным полученным от реальных датчиков. Однако выборочные данные могут удовлетворять сразу нескольким плотностям распределения вероятностей, в связи с чем принятие того или иного конкретного закона распределения в качестве вероятностной модели изучаемого природного явления почти всегда гипотетично. Наиболее точными имитационными моделями являются те, которые создаются с учетом теоретических предпосылок, характеризующих физическую природу изучаемого явления.

Основные свойства класса объектов «Наблюдаемое явление» представлены в табл. 7

Объект «Наблюдаемое явление» реализуется с использованием шаблона объектного программирования «Стратегия» который позволяет гибко менять выбранный алгоритм моделирования СП независимо от остальных объектов модели.

**3. ПОСТРОЕНИЕ ОБЩЕЙ МОДЕЛИ БСС**

Общая объектная модель БСС построена как система взаимодействующих объектов ее типовых компонентов. Схема взаимосвязей классов объектов модели БСС изображена на рис. 4.

Каждый узел БСС взаимодействует с моделью канала, моделью источника питания, моделями программного обеспечения и моделью датчика. В модели исследуемого явления описываются законы изменения параметров окружающей среды, соответствующих этому явлению. Например, законы изменения температуры или уровня химического загрязнения.

При моделировании реальные параметры объекта заменяются модельными. Это касается и реального времени: в ходе моделирования оно представляется искусственным (системным) временем, которое называют модельным временем.

В качестве способа продвижения модельного времени выбран принцип [15].

Принцип реализует механизм продвижения модельного времени для модели ориентированной на события, которая функционирует в неравномерной шкале времени, перепрыгивая от одного события к другому. При этом счетчик модельного времени перемещается от текущего события к ближайшему будущему, не останавливаясь в промежутках между ними.

Так как в моделируемом объекте происходят параллельные процессы, чтобы не нарушалась хронологическая последовательность событий, надо использовать механизм имитации параллельных процессов,

который называется псевдопараллельной обработкой. При этом модельное время останавливается до тех пор, пока одно за другим не будут обработаны все одновременные события.

Реализация принципа для модели распределенной БСС выглядит следующим образом. Прежде всего, составляется календарь (очередь) будущих событий – моментов инициации опросов датчиков, в котором они сортируются в хронологическом порядке. Счетчик модельного времени устанавливается в "0". Из очереди

будущих событий выбирается ближайшее, и модельное время устанавливается на время свершения выбранного события. Затем моделируется реакция системы на это событие. При этом появляются новые события, которые включаются в календарь событий, соблюдая хронологический порядок. Эти события также пересортировываются в хронологическом порядке. После этого модельное время передвигается на ближайшее следующее событие.



Рисунок 4 – Схема взаимосвязей элементов модели БСС

#### 4. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА МОДЕЛИРОВАНИЯ БСС

Исходной информацией для алгоритма моделирования БСС являются:

1. Множество узлов.
2. Множество связей.
3. Множество приложений.
6. Множество шлюзов.
5. Время моделирования.

Выходные данные алгоритма моделирования – множество оригинальных пакетов данных и множество

ретрансляций порожденных функционированием системы за время моделирования  $T_{\text{мод}}$ .

Моделирование БСС начинается с ввода исходной информации об узлах, связях, приложениях и датчиках. По информации о приложениях, интенсивности опросов для каждого опроса вычисляются моменты их появления в БСС. Эти опросы инициируют передачу пакетов данных с результатами опроса. Моменты появления этих пакетов добавляются в таблицу событий. Таблица событий представляет собой структуру, в которой хра-





нятся тип события, код пакета и время наступления события.

Счетчик времени устанавливается в начальное положение, и начинается основной цикл моделирования, в котором происходит выбор ближайшего события из таблицы событий, установка счетчика времени на время наступления ближайшего события, обработка события, во время которой могут формироваться новые события. После обработки события оно удаляется из таблицы событий.

### ВЫВОДЫ

1. БСС представляет собой сложную систему, для анализа и моделирования которой применен системный подход, позволивший получить ее декомпозицию в пространстве объектов. Выделены типовые компоненты БСС: узел, канал передачи данных, источник

питания, программное обеспечение, сетевой протокол, датчик, наблюдаемое явление.

2. Разработаны объектные модели типовых компонентов БСС, разработаны классы соответствующих объектов, определены их свойства с использованием объектно-ориентированного подхода и унифицированного языка моделирования UML.

3. Разработана новая модель БСС, построенная на основе объектных моделей ее типовых компонентов, которая в отличие от известных учитывает возможные изменения конфигурации сети и динамические процессы ретрансляции пакетов, позволяет производить анализ работы БСС с различной конфигурацией.

4. Разработан алгоритм моделирования БСС позволяющий получать численные оценки параметров функционирования БСС на основе исходных данных о моделируемой системе: множестве узлов, каналов передачи данных, датчиков, источников питания и ПО.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Intellektual'nye sistemy na baze sensoryh setej //Institut tochnoj mehaniki i vychislitel'noj tehniki im. S.A. Lebedeva RAN. – 2009. – [http://www.ipmce.ru/img/release/is\\_sensor.pdf](http://www.ipmce.ru/img/release/is_sensor.pdf).
2. Dargie W., Poellabauer C. Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice. – John Wiley and Sons, 2010. – 330 p.
3. Hart J.K., Martinez K. Environmental Sensor Networks: A revolution in the earth system science? //Earth-Science Reviews. – 2006. – 78. – P.177-191.
4. Kolesov Ju.B., Senichenkov Ju.B. Modelirovanie sistem. Ob#ektno-orientirovannyj podhod. – SPb.: BHV-Peterburg, 2006. – 192 c.
5. Gradi Buch, Robert A. Maksimchuk, Majkl U. Jengl Ob#ektno-orientirovannyj analiz i proektirovanie s primerami prilozhenij na UML 2. – M.: VIL'JaMS, 2010. – Т.3-е издание: 720 с.
6. J.M. Kahn, R.H. Katz, K.S.J. Pister Mobile Networking for Smart Dust //ACM/IEEE Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99). – Seattle, WA, 1999.
7. Torres-Martinez Eduardo, Granville Paules, Schoeberl Mark, Kalb Mike A Web of Sensors: Enabling the Earth Science Vision //Acta Astronautica. – 2003. – Vol. 53, 4-10. – P.423-428.
8. Kamyabpour Najmeh, Hoang Doan B. Modeling overall energy consumption in Wireless Sensor Networks //CoRR. – 2011.
9. Safar Maytham, Taha Mohammad, Habib Sami Modeling the Communication Problem in Wireless Sensor Networks as a Vertex Cover //2007 IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA 2007). – Amman, Jordan, 2007. – C.592-598.
10. Taganova A.A., Bubnov Ju.I., Orlov S.B. Germetichnye himicheskie istochniki toka. Jelementy i akkumuljatory. Oborudovanie dlja ispytanij i jekspluatacii. – SPb: Himizdat, 2005. – 262 c.
11. Zuniga M., Krishnamachari B. Analyzing the transitional region in low power wireless links //Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, IEEE SECON 2004. – Los Angeles, CA, USA, 2004. – P.517-526.
12. Gavrilenko V.G., El'cov A.Ju., Kirjushin A.A., Lobanov S.V., Sadkov A.N. Detal'noe modelirovanie fizicheskogo urovnja v simuljatore besprovodnyh sensoryh setej //RADIOTEHNIKA I JeLEKTRONIKA. – 2009. – Т.54, 4. – С.465-475.
13. Nepejvoda N.N. Stili i metody programmirovanija. kurs lekcij. uchebnoe posobie. – M.: Internet-universitet informacionnyh tehnologij, 2005. – 316 c.
14. Fonseca R., Gnawali O., Jamieson K., Kim S., Levis P., Woo A. The collection tree protocol (CTP). Technical Report TinyOS: TEP 123. – TinyOS Core Working Group, 2007.
15. Sovetov B.Ja., Jakovlev S.A. Modelirovanie sistem: Ucheb. dlja vuzov – 3-е изд. – M.: Vyssh. shk., 2001. – 343 с.

**Рецензент:** *д.т.н., проф. Скобцов Ю.А., Донецкий национальный технический университет, Донецк.*