

УДК 621.396.9

Галкин П. В., ассистент (Тел.: +380 (57) 702 14 94. E-mail: galkinletter@ukr.net)
(Харьковский национальный университет радиоэлектроники)

ОСОБЕННОСТИ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.15.4

Галкін П. В. Особливості імітаційного моделювання безпроводових сенсорних мереж стандарту IEEE 802.15.4. Розглянуті особливості проведення імітаційних експериментів з моделювання безпроводових сенсорних мереж (БСМ), побудованих на основі стандарту IEEE 802.15.4. Проведено аналіз протоколів ZigBee, WirelessHART, MiWi, Z-Wave з метою виявлення їх особливостей для імітаційного моделювання. Також проведений аналіз сучасних засобів імітаційного моделювання GloMoSim, Castalia, NS-2, NS-3, NetSim, OMNET ++, Open-ZB, OPNET Modeler, TOSSIM для проведення адекватних симуляційних експериментів.

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа, імітаційне моделювання, імітаційна модель, GloMoSim, Castalia, NS-2, NS-3, NetSim, OMNET ++, Open-ZB, OPNET Modeler, TOSSIM

Галкин П. В. Особенности имитационного моделирования беспроводных сенсорных сетей стандарта IEEE 802.15.4. Рассмотрены особенности проведения имитационных экспериментов по моделированию беспроводных сенсорных сетей (БСС), построенных на основе стандарта IEEE 802.15.4. Проведён анализ протоколов ZigBee, WirelessHART, MiWi, Z-Wave с целью выявления их особенностей для имитационного моделирования. Также проведён анализ современных средств имитационного моделирования GloMoSim, Castalia, NS-2, NS-3, NetSim, OMNET++, Open-ZB, OPNET Modeler, TOSSIM для проведения адекватных симуляционных экспериментов.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, имитационное моделирование, имитационная модель, GloMoSim, Castalia, NS-2, NS-3, NetSim, OMNET++, Open-ZB, OPNET Modeler, TOSSIM

1. Введение и постановка задачи. Беспроводные сенсорные сети (БСС) предназначены для использования в системах сбора данных и управления. В настоящее время стоимость компонентов сенсорных сетей достаточно велика, чтобы иметь возможность построить сеть значительных размеров для научных исследований. Для полноценной проверки работы беспроводной сенсорной сети с большим количеством узлов применяются средства имитационного моделирования. Реальное развертывание такой сети было бы связано с большими экономическими затратами.

При реализации имитационной модели БСС следует учитывать протоколы, которые основываются на стандарте IEEE 802.15.4. К таким протоколам относятся ZigBee, WirelessHART, MiWi, а также целесообразно отдельно рассмотреть протокол Z-Wave.

Имитационное моделирование (ИМ) строится на основе математической модели, которая аппроксимирует свойства и поведение исследуемой сети и, как следствие, позволяет решать задачи по оптимизации и ее управлению. Имитационной является математическая модель, реализованная как программное обеспечение для компьютера и использующая специальные или стандартные языки программирования.

При построении подобной модели сети связи могут использоваться как статические, так и динамические модели. Под статическими понимаются модели, используемые для исследования состояния сети в заданные моменты времени, например, аналитические методы расчета из теории массового обслуживания, а под динамическими – дискретные стохастические модели, например, процессы генерации заявок или процессы их обслуживания [1]. Однако имитационное моделирование не может учесть всех аспектов реальной моделируемой системы. Всегда вводятся предположения, позволяющие упростить и, как следствие, ускорить вычислительный расчёт. Но интуитивно понять, какие предположения не повлекут за собой расхождения модели и реальной системы, сложно [2].

Каждый узел БСС представляет собой устройство, которое состоит из пяти основных компонентов: датчики, процессоры, память, беспроводные передатчики и источники питания [3]. Энергопотребление узлов сети – ключевой параметр качества работы БСС [4], поэтому вопрос о его учёте при моделировании систем возникает одним из первых. Адекватность модели зависит от цели моделирования и принятых критериев. Проверку адекватности

модели необходимо проводить, если нет совпадения свойств и характеристик модели и соответствующих свойств реальной БСС, полученных в ходе натурального эксперимента [5].

Сегодня для решения задач имитационного моделирования сетей связи существует достаточно широкий спектр программных средств: от библиотек функций для стандартных компиляторов до специализированных языков программирования [1].

В статье [6] отмечено, что системы моделирования БСС, по уровню детализации можно разделить на три класса:

Первый – универсальные симуляторы, которые сосредоточены на моделировании высокоуровневых аспектов БСС.

Второй – представляет собой систему моделирования уровня кода, при этом, этот же код используется и в реальном сенсорном узле.

Третий – представляет собой систему моделирования уровня прошивки, которая использует эмуляцию аппаратного обеспечения для выполнения кода приложений и ОС, скомпилированных для целевой платформы.

Обобщенная структура системы дискретно-событийного моделирования, состоящая из менеджера событий узлов сети, моделей узла сети и канала связи, программной части сбора событий сети, состояния узлов и т.д., а также графической оболочки, приведена в статье [7].

Аналізу программних средств и методикам ИМ, а также различным аспектам функционирования БСС посвящено много работ, как в отечественных, так и зарубежных источниках [1-22]. Из разработанных на данный момент имитационных средств моделирования сетей можно выделить NS-2[1,8,9,13], NS-3, OMNET++ [6], Castalia [10], OPNET Modeler [14], Open-ZB [16], NetSim [17], GloMoSim [18], TOSSIM [20].

Однако в большинстве работ рассматривается одна или анализируются две системы ИМ. Особенности построения моделей БСС для различных протоколов и систем ИМ в научной литературе уделено не достаточно много внимания.

Например, в работе [1] утверждается, что на 2001 год программный продукт NS-2 является оптимальным средством моделирования сетей связи. В работе [2] отмечается, что для детального моделирования протоколов необходимо использовать системный язык программирования, обеспечивающий высокую скорость выполнения и способный манипулировать достаточно большими объемами данных. С другой стороны, для удобства пользователя и быстроты реализации различных сценариев моделирования привлекательнее использовать язык программирования более высокого уровня. В NS-2 применяется C++ и OTcl. C++ позволяет обеспечить высокую производительность и возможность работы с пакетами на низком уровне абстракции. А OTcl позволяет обеспечить: простоту построения сценария моделирования, возможность соединения воедино блоков, выполненных на системных языках программирования, и простую манипуляцию ими. Также в работе [2] отмечено, что в рамках проекта NS-2 реализована возможность моделирования работы беспроводной сети на основе протокола ZigBee на трех уровнях: PHY, MAC, NWK. На физическом уровне (PHY) и уровне доступа к каналу (MAC) реализованы все существующие возможности стандарта IEEE 802.14.5.

Система ИМ OMNET++ рассматривается в работе [6], где отмечено, что система в основном поддерживает стандартные проводные и беспроводные сети IP коммуникаций, но существуют также некоторые расширения для БСС. Как отмечает автор, симулятор OMNET++ хорошо масштабируем для очень крупных сетевых топологий, где возможности ограничиваются лишь объемом памяти компьютера или рабочей станции. Однако в работе не рассмотрена реализация моделирования для БСС и ее отличительные особенности.

Особенностью симулятора Castalia [10] является то, что команда разработчиков ставила перед собой задачу реализовать модели не только уровней передачи данных, но и смоделировать физические процессы, данные о которых собираются в узлах. В результате получается, что беспроводные сенсоры связаны между собой не только беспроводными каналами связи, но и физическим процессом, параметры которого они измеряют.

OPNET Modeler рассматривался в работе [14], где отмечено, что это коммерческий симулятор содержит модели большого числа существующих протоколов, технологий и устройств, инструменты анализа статистики. Также подчеркивается, что моделирование БСС является сложной задачей из-за природы аппаратного обеспечения, ограничений емкости источников питания узлов и развертывания огромного числа узлов. В статье [14], подробно обсуждаются особенности моделирования протокола ZigBee.

Также для имитационного исследования протокола ZigBee, в работе [16] применяется Open-ZB, который реализует физический уровень и уровень доступа к среде, и соответствует стандарту IEEE 802.15.4. К недостаткам Open-ZB можно отнести то, что в его основе лежит очень дорогой коммерческий продукт OPNET Modeler 10.5 и выше, который бесплатно предоставляется только для университетов США.

NetSim [17] позволяет проводить моделирование сетей по различным протоколам, таким как Ethernet, Wireless LAN, TCP / IP, ATM и др. GloMoSim [18] в настоящее время поддерживает протоколы только для моделирования беспроводных сетей.

Как отмечено в работе [20] система имитационного моделирования TOSSIM является разработкой Калифорнийского университета, но, в отличие от семейства NS – TOSSIM работает за счет подмены компонентов Tiny-OS и, следовательно, позволяет проводить моделирование сетей только на базе TinyOS. Как отмечает автор, преимуществом TOSSIM является тесная интеграция с операционной системой, что позволяет моделировать не только передачу пакетов по сети, но и работу аппаратной части узла БСС. Для описания моделирования используется широко распространенный язык Python.

На основе анализа литературных источников можно сделать *следующие выводы, что* применение специализированных средств имитационного моделирования позволяет совершенствовать разрабатываемые модели, протоколы, стеки, маршруты и проводить их оптимизацию без реального развертывания сети. В то же время недостаточно раскрыт вопрос применения этих систем для БСС и их взаимосвязь с используемыми протоколами.

Интерес к исследованию особенностей ИМ БСС для стандарта IEEE 802.15.4 имеет не только теоретический, но и практический характер, так зная специфику средств моделирования можно исследовать БСС без проведения натуральных экспериментов. Таким образом, применяя средства ИМ, разработка новых технологий для БСС сначала проходит при помощи моделировании, а только потом на физических экспериментах.

Целью работы является выявление особенностей ИМ, присущих для БСС, построенных на основе стандарта IEEE 802.15.4, для необходимо решить следующие задачи: *провести* анализ протоколов, построенных на основе стандарта IEEE 802.15.4, а также близких к ним; *провести* анализ современных средств ИМ, применимых для БСС; *выделить* особенности построения моделей БСС для стандарта IEEE 802.15.4.

2. Анализ протоколов БСС стандарта IEEE 802.15.4 и близких к ним. Результатом работ по стандартизации БСС стало семейство стандартов IEEE 802.15.4, регламентирующих физический и канальный уровни, но оставляющих неопределенными сетевой и прикладной уровни. Для практической реализации на базе стандарта IEEE 802.15.4 были разработаны протоколы ISA-100.11a, ZigBee, WirelessHART, MiWi. Также отдельно целесообразно рассмотреть протокол Z-Wave.

2.1. Протокол WirelessHART. Одной из перспективных беспроводных сенсорных протоколов является Wireless-HART [23]. Его реализация имеет стек верхнего уровня, который совместим с промышленными протоколами HART, ModBus-RTU и Industrial Ethernet. По сути WirelessHART – это расширение стандарта, основанное на стандарте передачи данных по беспроводным сетям IEEE 802.15.4-2006 и использующее мультиплексирование с разделением по времени.

При использовании протокола Wireless-HART применяется узловая схема сети, которая позволяет добавлять и перемещать устройства. На Рис. 1. показан пример такой схемы сети с указанием избыточных каналов передачи. Устройство всегда остается на связи, когда оно

находится в зоне действия других устройств в сети. Узловая схема по сути является топологией типа «Звезда». Как видно из рисунка видно, чтобы пройти путь до шлюза с узла №1 пакеты могут пройти три альтернативных пути A1-A2-A3, B1-B2-B3 или C1-C2-C3-C4.

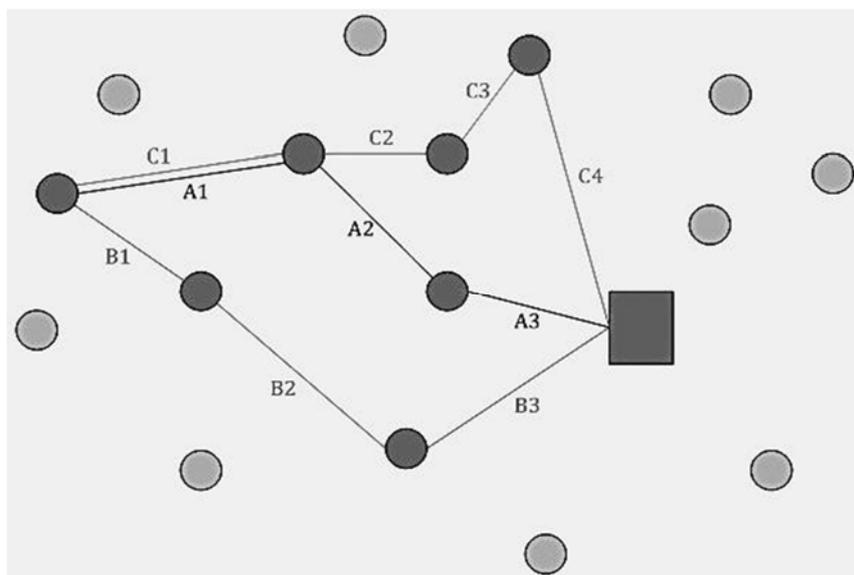


Рис. 1. Пример узловой схемы сети при использовании протокола Wireless-HART

Информация, переданная по сети WirelessHART, защищена 128-битным шифрованием, чередованием сетевых ключей, определяемым на стадии построения сети, и радиосигналами, передаваемыми в расширенном спектре со скачкообразной перестройкой частоты.

В заключении можно сделать вывод, что применение протокола Wireless-HART оправдано в системах мониторинга и контроля технологического оборудования, в то же время покрыть весь спектр задач, решаемых при помощи БСС, данный протокол не может. К особенностям моделирования стоит отнести, что узел в Wireless-HART всегда остается на связи, когда он находится в зоне действия других узлов сети.

2.2. Протокол ISA-100.11a. Протокол организации промышленных сенсорных сетей, сетей датчиков и приводов ISA-100.11a, разработки которого начались в 2005 году, а в сентябре 2011 года были одобрены МЭК в качестве общедоступной спецификации. Для передачи информации используется низкоскоростная беспроводная связь с использованием элементов с низким энергопотреблением.

Отличительная особенность ISA100.11a от других сенсорных сетей [24]:

- ориентированность на промышленное использование и, соответственно, специфические требования к прочности, помехозащищенности, надежности и безопасности;
- возможность эмуляции средствами технологии ISA100.11a протоколов уже существующих и проверенных проводных и беспроводных сенсорных сетей.

Обмен осуществляется на частоте в районе 2,4 ГГц и скорости порядка 250 Кбит/с, что соответствует стандарту IEEE 802.15.4.

Проблему энергоснабжения автономных элементов беспроводной сети следует относить к надежности передачи данных. Внезапно севшая батарея введенного в эксплуатацию беспроводного прибора – это недопустимая в условиях производства ситуация, которая может повлечь за собой аварийную остановку, незапланированный простой, а в крайних случаях – техногенную катастрофу и человеческие жертвы [25].

Протокол ISA-100.11a поддерживает различные типологии беспроводных сетей, такие как «звезда», «дерево», «ячейка», «кластер», Рис. 2.

Протокол ISA100.11a делает передачу разно-образных протоколов по беспроводной среде возможным, так как он поддерживает отображение атрибутов, простое и интеллектуальное туннелирование. Мэппирование протоколов и туннелирование

уменьшают затраты на оборудование благодаря поддержке старых протоколов и интеграции проводных и беспроводных устройств, разработанных ранее. Архитектура ISA-100.11a поддерживает много существующих протоколов, включая Foundation Fieldbus, HART, Profibus, Modbus и CIP. Поддержка мэппирования протоколов и туннелирования позволяют Foundation Fieldbus, HART и Profibus использовать стек ISA-100.11a для беспроводных коммуникаций.

Беспроводные сети потребительского класса используются, в основном, ради удобства, в то время как промышленные полевые беспроводные сети должны быть намного надежнее, и не должны мешать работе других беспроводных систем предприятия. Основная особенность при имитационном моделировании сетей по протоколу ISA100.11a от аналогичных – это его использование в промышленности, что накладывает требования на надёжность передачи данных, помехозащищенности и безопасности.

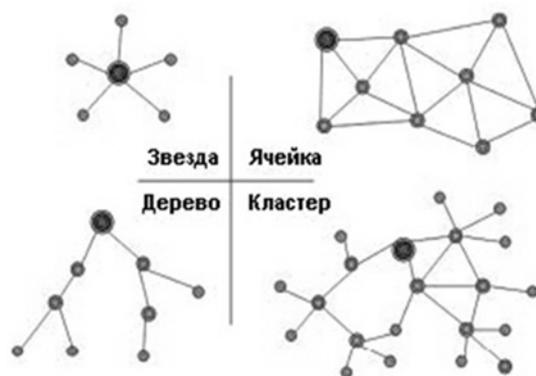


Рис. 2. Поддерживаемые топологии протоколом ISA-100.11a

2.3. Протокол MiWi. Протокол MiWi базируется также на спецификации стандарта IEEE 802.15.4 для уровней MAC и PHY и предназначен для построения простых беспроводных сетей диапазона 2,4 ГГц [26]. В рамках протокола производится формирование сети, подключение новых узлов, маршрутизация. Протокол не описывает такие специфические функции, как регистрация узла в определенной сети, определение обрыва соединения, не задает частоту обмена между узлами – сообщениями. При описании протокола MiWi используется два термина, заимствованные из стандартов IEEE. Кластер – группа узлов, формирующая сеть. В рамках протокола MiWi кластер может иметь 3 уровня иерархии. В верхнем уровне находится главный узел PAN-координатор. Сокет – виртуальное соединение между двумя узлами. В отличие от прямого соединения между двумя узлами с помощью проводов, здесь все узлы имеют виртуальные соединения с использованием одной физической среды передачи данных.

Протокол MiWi определяет три типа устройств с различной функциональностью: PAN-координатор, координатор и конечное устройство. В сети MiWi главным узлом всегда является PAN-координатор, он является образующим узлом сети. Сравнение протокола MiWi с протоколом Zigbee с учётом требований к аппаратной части приведено в Табл. 1.

Сравнение протокола MiWi с протоколом Zigbee

Табл. 1

Протокол	Координатор	Оконечное устройство (RFD)	Макс. число узлов, тыс.	Макс. число "прыжков"
Zigbee	46 Кб (с шифрацией)	26 Кб (с шифрацией)	64 узлов в одном PAN ID	неограниченно
MiWi	10 Кб (без шифрации)	4 Кб (без шифрации)	1	4

Протокол MiWi не требует дополнительных расходов на сертификацию и лицензионных отчислений разработчикам протокола. При имитационном моделировании следует учитывать, что спецификация MiWi не является заменой ZigBee, так как стек MiWi может использоваться для построения самодостаточных сетей с количеством устройств не более 1024.

2.4. Протокол Zigbee. При построении БСС на основе протокола ZigBee следует учитывать, что он регламентирует обмен данными на всех семи уровнях открытой модели взаимодействия систем OSI. При этом на двух нижних уровнях, на физическом и на уровне MAC, используется спецификация IEEE 802.15.4.

Фактически это означает, что стандарт IEEE 802.15.4 содержит описание радиочастотной части сети ZigBee: *типы модуляции* – BPSK и O-QFSK; *частотные диапазоны* – 868, 902 и 2400 МГц и соответствующие им *скорости передачи* – 20, 40 или 250 Кбит/с.

Для того, чтобы обеспечить полную совместимость устройств разных производителей и их способность взаимодействовать в рамках единого распределенного приложения введено понятие профилей, которые различаются в пакетах с помощью 16-битного идентификатора.

Профиль описывает ряд технических параметров, соглашений о структурах данных и форматах сообщений, которых жестко должны придерживаться производители чтобы изделия были совместимы по этому профилю.

Стек сетевых уровней Zigbee и IEEE 802.15.4 согласно модели OSI приведён на Рис. 3. В протоколе ZigBee используются фреймы подтверждения успешного приема и достоверности полученных данных или MAC-команды. Алгоритм работы состоит в том, что если принимающее устройство не смогло по каким-либо причинам получить данные, то ответное уведомление не посылается. Если инициатор отправки сообщения не получает подтверждения доставки, он снова повторяет передачу. Кроме этого для обеспечения надежности используется верификация данных, которая обеспечивается с помощью 16-и разрядных контрольных сумм CRC.



Рис. 3. Стек сетевых уровней Zigbee

Согласно протоколу ZigBee в сети существует три вида пересылки данных. Одна из них, это передача данных координатору, которому передает информацию сетевое устройство. Вторая пересылка связана с пересылкой данных от координатора к сетевому устройству. К третьему виду пересылок сообщений относится обмен данными непосредственно между сетевыми устройствами.

Механизм каждого типа обменов сообщениями зависит от того, поддерживает или нет БСС передачу так называемых маяков. Сети с поддержкой маяков используются в сетях, которые требуют синхронизации или поддерживают сетевые устройства, требующие малой задержки отклика. Если БСС не нуждается в синхронизации или малых задержках, она может не использовать кадры-маяки для стандартных обменов. Однако маяки нужны для возможности самоконфигурирования сети, т.е. ее восстановления в случае какого либо сбоя.

В сетях без маяков, когда узел хочет передать кадр данных и MAC-команду, он ждет в течение случайного периода времени. Если канал оказывается свободным, производится отсрочка передачи со случайной длительностью, после чего производится передача данных. Если канал оказывается занятым после случайной выдержки, устройство ждет в течение еще одного случайного периода времени, прежде чем совершит очередную попытку доступа к каналу. Кадры подтверждения посылаются без использования механизма CSMA-CA.

В сетях с маяками домены отсрочки приходятся на начало передачи маяка. Домены отсрочки всех устройств в пределах БСС выстраиваются координатором. Каждый раз, когда устройство хочет передать кадр данных во время CAP, оно определяет границу следующего домена отсрочки и затем ждет произвольное число доменов отсрочки. Если канал занят, следует очередная отсрочка, узел ждет очередное случайное число доменов отсрочки, прежде чем снова попытается осуществить попытку доступа к каналу. Если канал пассивен,

узел начинает передачу. Кадры подтверждения или меток также посылаются без привлечения механизма CSMA-CA.

Таким образом, к особенностям имитационного моделирования сетей построенных по протоколу ZigBee следует отнести использование или отсутствие маяков, учёт уровня стека, который необходимо смоделировать, а также необходимо дополнительно описывать профиль ZigBee, который выбран для моделирования.

2.5. Протокол Z-Wave. Протокол Z-Wave, разработанный датской компанией ZenSys AS используется в беспроводных сетях и системах домашней автоматизации [27].

В рамках протокола Z-Wave предусматривается обмен данными только по радиоканалу, что соответствует концепции БСС. Следует отметить, что протокол Z-Wave отправляет сообщения, используя алгоритмы SRA (Source Routing Algorithm- алгоритмы маршрутизации источника) [28]. Для работы этого алгоритма нужно, чтобы устройства, иницирующие сообщения, «знали» расположение других устройств сети с тем, чтобы могли рассчитывать наилучшие маршруты для передачи сообщений. Но техническая поддержка и распределение базы данных по топологии сети – это сложная задача, особенно учитывая то, что некоторые из устройств могут перемещаться в пространстве. Поэтому, для снижения стоимости сетевого решения, протокол Z-Wave определяет несколько различных видов приборов, некоторые из которых, для снижения стоимости лишены способности передавать сообщения и называются «слейв» (slave) устройствами.

Для реализации самоорганизации узлы Z-Wave имеют программное обеспечение, которое обнаруживает соседей и сообщает о них контроллеру SUC (Static Update Controller). Алгоритм SRA, реализованный в устройствах, способен иницировать цепочки коммутаций для передачи сообщений и генерировать маршруты на основании базы данных топологии сети. Функция самовосстановления требует, чтобы программное обеспечение находило в динамическом режиме новые маршруты вокруг временно недоступных узлов. Мобильные узлы также должны входить в сферу действия программного обеспечения, которые в свою очередь может запрашивать новое сетевое окружение в автоматическом режиме. Такое программное обеспечение является частью стека протокола Z-Wave и записано в микросхеме памяти узла. Сравнение протоколов ZigBee и Z-Wave приведено в Табл. 2.

Сравнение протокола Z-Wave с протоколом ZigBee

Табл. 2

Параметр	IEEE 802.15.4/ZigBee			Z-Wave	
	Рабочая частота, МГц	860	908	2400	860
Скорость передачи данных, Кб	20	40	250	40	
Число каналов	1	10	16	1	
Число узлов	65535			до 232	
Доступ к среде	CSMA-CA			случайный	
Топология	“звезда” “многоячейковая” “дерево”			“многоячейковая”	
Макс. число скачков	не более 32			не более 4	
Кол-во производителей	Chipcon(TI), Freescale, Ember, Atmel, ZMD			Zensys	

Как можно увидеть из Табл. 2, сочетание стандарта IEEE 802.15.4 и протокола ZigBee обладает значительно большей гибкостью по сравнению с Z-Wave. К особенностям имитационного моделирования БСС, построенных по протоколу Z-Wave, следует отнести необходимость учёта алгоритма SRA, а также наличие нескольких различных видов узлов, которые были введены с целью снижения стоимости сети.

3. Анализ современных средств имитационного моделирования, применимых для беспроводных сенсорных сетей. Из разработанных на данный момент имитационных средств моделирования сетей можно выделить NS-2, NS-3, OMNET++, Castalia, OPNET Modeler, Open-ZB, NetSim, GloMoSim, TOSSIM.

3.1. Семейство сетевых симуляторов NS-2, NS-3. Для NS-2 существует модель LR-WPAN, реализующая стандарт IEEE 802.15.4, разработанная Джинлиан Женгом и др. Структура компонентов модели и основные её функции представлены на Рис. 3 [29].

В NS-2 можно использовать только существующие протоколы маршрутизации, которые не до конца учитывают особенности беспроводных сенсорных сетей. В то же время полную поддержку стандарта 802.15.4 планируется ввести с модификациями NS-3, начиная с версий 3.20 [30]. Таким образом, ИМ БСС в NS-3, NS-2 целесообразно с применением модели LR-WPAN которая реализует стандарт IEEE 802.15.4, и позволяет моделировать два нижних уровня модели OSI.

3.2. OPNET Modeler и OPEN-ZB. В версии OPNET Modeler 14.0 доступны модели узлов протокола ZigBee, разработанные самой компанией OPNET. При этом исходный код модели сетевого уровня и уровня приложений скрыт от пользователей. Для моделирования доступен только код модели нижнего уровня IEEE 802.15.4.

Также существует модель узлов-сенсоров с открытым исходным кодом, соответствующая стандарту IEEE 802.15.4, разработкой которой занимается сообщество OPEN-ZB. Разные версии данной модели работают с OPNET Modeler 10.5 и выше.

Модель OPEN-ZB реализует физический уровень и уровень доступа к среде, и соответствует стандарту IEEE 802.15.4. Версия модели 2.1 поддерживает только топологию звезда, где коммуникации происходят между конечными устройствами через центральное устройство, называемое координатором частной сети. К недостаткам модели Open-ZB, относят то что, OPNET Modeler бесплатно предоставляется только для университетов США.

3.3. OMNeT++ и Castalia. На базе среды моделирования OMNeT++ 4.1 построен симулятор различных протоколов беспроводных сенсорных сетей Castalia. В нём также реализована модель, соответствующая стандарту IEEE 802.15.4. Особенностью данного симулятора является то, что команда разработчиков ставила перед собой задачу реализовать модели не только уровней передачи данных, но и смоделировать физические процессы, данные о которых собираются в узлах.

Castalia распространяется по некоммерческой лицензии для использования в учебных заведениях или некоммерческих исследовательских организациях, а также под коммерческой лицензией. Этот симулятор поддерживает написание модулей пользователем. Работает в операционной системе Linux, Unix-подобных операционных системах. Castalia является популярной системой моделирования БСС. Большинство исходного кода может быть доступно в исходном виде. Castalia обеспечивает мощные средства трассировки и отладки. Поддерживаются многие MAC протоколы, широкие возможности работы с радиоканалом. Кроме того, Castalia может имитировать проблемы энергопотребления в БСС.

К недостаткам Castalia можно отнести малое количество доступных протоколов. В то же время внутренняя структура узла в Castalia (Рис. 4) довольно гибкая.

Узлы не соединяются друг с другом напрямую, а через модуль беспроводного канала. Стрелки означают передачу сообщений от одного модуля к другому. Когда узел имеет пакет для отправки, то он переходит в беспроводной канал, который затем решает, какие узлы должны получать пакет. Узлы также связаны через физические процессы, которые они контролируют. Для каждого физического процесса есть один модуль. Узлы взаимодействуют с физическим процессом в пространстве и времени (путем отправки сообщения на соответствующий модуль), чтобы получить показания датчиков.



Рис. 3. Модель LR-WPAN

Описание модулей осуществляется на языке OMNeT++ NED. С помощью этого языка можно определить модули, т. е. определить имя модуля, параметры модуля и модуля интерфейса и возможную структуру подмодуля. Сам код модуля пишется на языке C++.

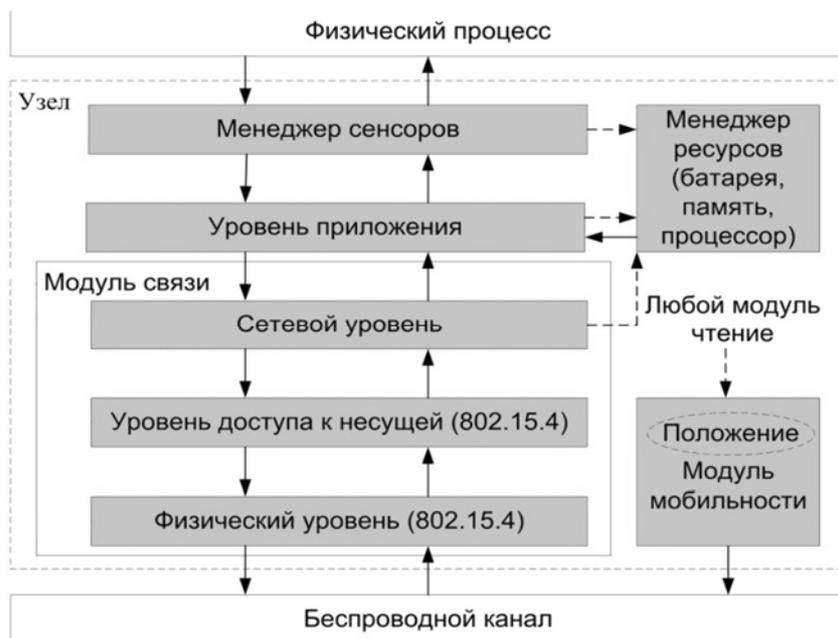


Рис. 4. Внутренняя структура узла БСС в Castalia

Особенности OMNeT++ – это усовершенствованная модель канала на основе эмпирических данных измерений: *модель системы* учитывает потери в канале передачи данных, а не просто соединений между узлами; *комплексная модель* для изменения потерь в канале; *полностью* поддерживается подвижность узлов; *помехи* учитываются уже на уровне принимаемого сигнала, а не в виде отдельной функции.

Сравнение средств ИМ OPNET, NS-2 и OMNET++ приведен в Табл. 3.

Также к особенностям OMNeT++ относится усовершенствованная модель радиоканала: *несколько* уровней мощности передачи с индивидуальными вариациями могут задаваться; *состояния* с различным энергопотреблением и задержками переключения между ними поддерживаются; *реалистичное* моделирование RSSI несущей; *расширенное* моделирование измерительных устройств; *поддержка* шумов, смещений и потребления энергии для измерительного устройства.

3.4. NetSim и GloMoSim. NetSim – коммерческий симулятор, по причине низкой стоимости при достаточном функционале использующийся в более чем 250 университетах мира. NetSim [17] позволяет проводить моделирование сетей по различным протоколам, таким как Ethernet, Wireless LAN, TCP / IP, ATM и др. В NetSim реализована модель IEEE 802.15.4 на уровне MAC и PHY и следовательно позволяет моделировать два нижних уровня модели OSI, кроме этого также есть возможность работы с алгоритмом маршрутизации LEACH, а также реализована функции слотов CSMA/CA, безслотовый CSMA/CA, передача суперкадра и передача маяков.

GloMoSim [18] в настоящее время поддерживает протоколы только для моделирования беспроводных сетей. GloMoSim основан на среде симуляции Parsec, GloMoSim был популярен в 1998-99 гг. Модели в нем описываются на PARSEC C. Разработка остановилась в 2000 г. Таким образом, стандарт IEEE 802.15.4 и протоколы на его основе в нём необходимо реализовывать самостоятельно.

Следовательно, сравнивая NetSim и GloMoSim, для ИМ более приемлемый NetSim.

Сравнение средств имитационного моделирования OPNET, NS-2 и OMNET++ Табл. 3

Параметры моделирования	OPNET		NS-2	OMNET++
	OPNET Modeler 14.0	OPEN-ZB 3.0 (beta)	Zheng	Castalia
Задачи физического уровня (IEEE 802.15.4)				
Вкл/выкл приемопередатчика	-	+	-	+
Определение энергии в текущем канале	+	+	+	+
Индикация качества соединения для полученных пакетов (LQD)	+	+	+	+
Оценка чистоты канала (CCA) для механизма CSMA-CA	+	+	+	+
Выбор частотного канала	+	-	+	-
Поддержка частотных диапазонов 868/915/2450	+ / + / +	- / - / +	+ / + / +	+ / + / +
Задачи уровня доступа к среде (IEEE 802.15.4)				
Координатором	-	+	+	+
Синхронизация маркерами сети	-	+	+	+
Режим работы без маркеров	+	-	+	-
Поддержка ассоциации и дисассоциации с частной сетью (PAN)	+	+	+	+
Поддержка топологий звезда/точка-точка	+ / +	+ / +	+ / +	+ / +
Поддержка безопасности устройств	-	-	-	-
Реализация механизма slotted CSMA-CA	-	+	+	+
Реализация механизма unslotted CSMA-CA	+	-	+	-
Управление и поддержка механизма GTS	-	+	-	+
Поддержка надежного соединения между двумя уровнями MAC	+	+	+	+
Режим прямых передач	+	-	+	+
Режим косвенных передач	-	+	+	-
Сетевой уровень				
Наличие протоколов маршрутизации	+	+	-	+
Соответствие спецификации ZigBee	+	-	-	+
Дополнительные возможности модели				
Мобильность узлов	+	-	-	+
Расчет потребляемой узлами энергии	-	+	-	+

3.5. TOSSIM. Система TOSSIM является эмулятором, специально предназначенным для БСС, работающих на TinyOS, который распространяется с открытым исходным кодом. Разработан в 2003 году. Написан на языке Python и C++. Работает в операционной системе Linux. TOSSIM также распространяется в исходном коде.

К достоинствам относится, скорость эмуляции. Кроме того, TOSSIM имеет графический интерфейс – TinyViz. Кроме того, TOSSIM является очень простым, но мощным эмулятором для БСС. Каждый узел может быть оценен в идеальных условиях передачи, и с помощью этого эмулятора можно исследовать скрытые проблемы. Может поддерживать тысячи узлов.

Тем не менее, этот эмулятор имеет некоторые ограничения. Во-первых, TOSSIM предназначен для моделирования поведения и применения TinyOS, и он не предназначен для имитации показателей других новых протоколов. Поэтому TOSSIM не может правильно моделировать вопросы энергопотребления в БСС. Для этих целей можно использовать PowerTOSSIM, другой симулятор TinyOS. Также каждый узел должен работать на Nesc коде, языке программирования, который управляется событиями на основе компонентов и реализован на TinyOS. В-третьих, TOSSIM разработан специально только для моделирования узлов.

3.6 Emstar, J-Sim, АТЕМУ. Система Emstar является эмулятором, специально предназначенным для БСС, построенным на языке C. Работает в ОС Linux.

Достоинством Emstar является модульная модель программирования, что позволяет пользователям запускать каждый модуль отдельно без ущерба для повторного использования программного обеспечения. Emstar имеет графический интерфейс. Тем не

менее, этот эмулятор не может поддерживать большое количество узлов и датчиков. Кроме того, Emstar может работать только в режиме реального времени.

Система J-Sim является дискретно-событийным симулятором (ДСС). Написан на Java. Есть графический интерфейс. Распространяется в исходном коде. Обычно используется в физиологии и биомедицине, но может быть использована для моделирования БСС. Кроме того, J-Sim может имитировать процессы в реальном времени. В J-Sim есть возможность повторного использования и взаимозаменяемости компонентов, а также содержит большое количество протоколов. Также как и Emstar, J-Sim предоставляет графический интерфейс.

К недостаткам J-Sim можно отнести время выполнения, которое гораздо больше, чем у NS-2. Поскольку J-Sim изначально не предназначены для моделирования БСС.

Система АТЕМУ построена на С и имеет графический интерфейс. Работает в операционных системах Solaris и Linux. Распространяется в исходном коде. К достоинствам можно отнести, что АТЕМУ может имитировать несколько датчиков на узле БСС. Также АТЕМУ имеет большую библиотеку готовых устройств.

Тем не менее, этот эмулятор также имеет некоторые ограничения. Например, хотя АТЕМУ может дать высокую точность результатов, время моделирования гораздо дольше, чем других инструментов моделирования. Кроме того, АТЕМУ имеет меньше функций для моделирования маршрутизации.

Сравнение систем моделирования NS-2, TOSSIM, Emstar, Castalia J-Sim, АТЕМУ, приведено в Табл. 4.

Сравнение систем моделирования

Табл. 4

Система	ДСС, иначе на трассировке	Графический интерфейс	Распространяется в исходном коде	Специально для БСС, иначе общий
NS-2	+	-	+	-
TOSSIM	+	+	+	+
Emstar	-	+	+	+
Castalia	+	+	+	+
J-Sim	+	+	+	-
АТЕМУ	+	+	+	+

4. Особенности моделирования БСС. Моделирование начинается с описания реальной системы. Такое описание представляет собой имитационную модель, построенную на основе понимания величин, атрибутов, событий, каналов и т. д. Поэтому, разработчик модели описывает эти структуры моделирования в терминах сущностей и их отношений и реализует поведение этих субъектов и реакцию на события.

Таким образом, система моделирования обычно состоит из базовой библиотеки для моделирования, библиотеки вспомогательных средств, и системы описания и конфигурации моделей. Сама форма развертывания пакета зависит от реализации. Некоторые пакеты предоставляют средства, которые переводят описания моделей в объекты языка реализации моделирования. Другие обеспечивают визуальный интерфейс.

Анализ средств имитационного моделирования показал, что в основном большинство средств реализуют только стандарт IEEE 802.15.4 на уровне MAC и PHY и следовательно позволяет моделировать только два нижних уровня модели OSI. Особое внимание необходимо обратить на модель Castalia, поскольку команда разработчиков изначально ставила перед собой задачу смоделировать все аспекты работы беспроводных сенсорных сетей, её исходный код является открытым и, что особенно важно, среда моделирования, на основе которой она построена, имеет также открытый исходный код и распространяется бесплатно для некоммерческого использования. Тем ни менее можно использовать и другие средства, что были рассмотрены.

Выводы. В данной статье сделан анализ средств имитационного моделирования и приведены особенности проведения имитационных экспериментов по моделированию

беспроводных сенсорных сетей, построенных на основе стандарта IEEE 802.15.4. Проведён анализ протоколов ZigBee, WirelessHART, MiWi, Z-Wave. Также проведён анализ современных средств имитационного моделирования. Анализ средств имитационного моделирования показал, что в основном большинство средств реализуют только стандарт IEEE 802.15.4 на уровне MAC и PHY и следовательно позволяет моделировать только два нижних уровня модели OSI. Протоколы, основанные на IEEE 802.15.4, необходимо реализовывать часто самостоятельно.

Литература

1. Кучерявый Е. А. NS2 как универсальное средство имитационного моделирования сетей связи / Е. А. Кучерявый // Tampere University of Technology, Telecommunications Laboratory, Tampere, Finland. – 2001. – С. 1-6.
2. Трифонова С. В., Исследование и оптимизация работы беспроводной сенсорной сети на основе протокола ZigBee / С. В. Трифонова, Я. А. Холодов // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 4. – С. 855-869.
3. Горбенко О. Н., О моделировании сенсорных сетей / О. Н. Горбенко, А. А. Рожкова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2014. – № 4 (7). С. 1-6.
4. Галкин П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей / П. В. Галкин // Science Rise. – 2014. – № 2 (2). – С. 55-61. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/2313-8416.2014.27246>
5. Борисенко А. С. Адекватность моделей беспроводных сенсорных сетей в средах имитационного моделирования / А. С. Борисенко, П. В. Галкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, № 9(64). – С. 52-55.
6. Махров С. С. Использование систем моделирования беспроводных сенсорных сетей NS 2 и OMNET++ / С. С. Махров // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2013. – Т. 7, № 10. – С. 67-69.
7. Дядюнов А. Н. Моделирование беспроводных сенсорных сетей / А. Н. Дядюнов, К. Н. Кузнецов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2009. – № 139. – С. 63-69.
8. Yunjiao Xue Performance Evaluation of NS-2 Simulator for Wireless Sensor Networks / Yunjiao Xue, Ho Sung Lee, Ming Yang, P. Kumarawadu, H. H. Ghenniwa, Weiming Shen // Electrical and Computer Engineering, 2007. CCECE 2007. Canadian Conference on. – Vancouver, BC: 22-26 April 2007, IEEE. – P. 1372-1375. – doi: 10.1109/CCECE.2007.345
9. Vieira D. A. Simulating sensor networks. – 2010. – Dissertation, 62 p.
10. Rastegarnia, A. Performance evaluation of Castalia Wireless Sensor Network simulator / A. Rastegarnia, V. Solouk // Telecommunications and Signal Processing (TSP), 2011. 34th International Conference on. – Budapest: 18-20 Aug. 2011, IEEE. – P. 111-115. – doi: 10.1109/TSP.2011.6043761
11. Кудр Л. А. Разработка объектной модели беспроводной сенсорной сети / Л. А. Кудр, // Проблемы інформаційних технологій. – 2013. – № 1 (13). – С. 90-98.
12. Галкин П. В. Алгоритм управления и оптимизации информационных потоков в беспроводной сенсорной сети / П. В. Галкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 6, № 3(72). – С. 53-63. – doi: 10.15587/1729-4061.2014.30419.
13. Saha B. K. A web-based integrated environment for simulation and analysis with NS-2 / B. K. Saha, S. Misra, M. S.Obaidat // Wireless Communications, IEEE. – 2013. – Vol. 20, Issue 4. – P. 109-115. – doi: 10.1109/MWC.2013.6590057
14. Hammoodi I. S. A Comprehensive Performance Study of OPNET Modeler for ZigBee Wireless Sensor Networks / I. S. Hammoodi, B. G. Stewart, A. Kocian, S. G. McMeekin // Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2009. NGMAST '09. Third International Conference on. – Cardiff, Wales: 15-18 Sept. 2009, IEEE. – P. 357-362. – doi: 10.1109/NGMAST.2009.12

15. Mozumdar M. A Model-Based Approach for Bridging Virtual and Physical Sensor Nodes in a Hybrid Simulation Framework / M. Mozumdar, Zhen Yu Song, Luciano Lavagno, Alberto L. Sangiovanni-Vincentelli // *Sensors*. – 2014. – Т. 14, №. 6. – С. 11070-11096. – doi: 10.3390/s140611070
16. Cunha A. Open-ZB: an open-source implementation of the IEEE 802.15.4/ZigBee protocol stack on TinyOS / A. Cunha, A. Koubaa, R. Severino, M. Alves // *Mobile Adhoc and Sensor Systems, 2007. MASS 2007. IEEE International Conference on.* – Pisa: 8-11 Oct. 2007, IEEE. – P. 1-12. – doi: 10.1109/МОВНОС.2007.4428602
17. NetSim [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <http://tetcos.com/> (10.12.2014 р.).
18. Zeng X. GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks / X. Zeng, R. Bagrodia, M. Gerla // *Parallel and Distributed Simulation, 1998. PADS 98. Proceedings. Twelfth Workshop on.* – Banff, Alta: 26-29 May 1998, IEEE. – P. 154-161. – doi: 10.1109/PADS.1998.685281
19. Kim-Yung Lu A Data Simulator for ZigBee-Base Wireless Sensor Network System / Kim-Yung Lu // *Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), 2011 IEEE 10th International Conference on.* – Changsha: 16-18 Nov. 2011, IEEE. – P. 1699-1703. – doi: 10.1109/TrustCom.2011.236
20. Тараканов Е. В. Экспериментальные исследования протокола передачи данных с приоритетами в беспроводной сенсорной сети в системе TOSSIM / Е. В. Тараканов // *Известия Томского политехнического университета.* – 2012. – Т. 321, № 5. – С. 223-227.
21. Zanella A. Internet of Things for Smart Cities / A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, M. Zorzi // *Internet of Things Journal, IEEE.* – 2014. – Vol. 1, Issue 1. – P. 22-32. doi: 10.1109/IIOT.2014.2306328
22. Шуваев Я. В. Разработка структуры комплекса имитационного моделирования для проведения сравнительного исследования алгоритмов построения адресного пространства в беспроводных сенсорных сетях стандарта ZigBee / Я. В. Шуваев // *T-Comm - Телекоммуникации и Транспорт.* – 2011. – № 7. – С. 164-167.
23. Deji C. WirelessHART and IEEE 802.15.4e / C. Deji, M. Nixon, Song Han, A. K. Mok, Xiuming Zhu // *Industrial Technology (ICIT), 2014 IEEE International Conference on.* – 2014. Busan, Feb. 26 2014-March 1 2014, IEEE. – P. 760-765. – doi: 10.1109/ICIT.2014.6895027.
24. Mark Nixon. A Comparison of WirelessHART and ISA100.11a // *White Paper: Revision 1.0, Preliminary A, Release Date: July 1, 2012.* – P. 1-36.
25. Резник В. А. Инновации в мире беспроводных технологий: промышленный стандарт ISA100.11a / В. А. Резник // *Автоматизация в промышленности.* – 2011. – №6. – С. 21-26.
26. Сафронов А. Стек протоколов MiWi для беспроводных сетей / А. Сафронов // *Новости Электроники.* – 2007. – №13. – С. 24-27.
27. Gomez C. Wireless home automation networks: a survey of architectures and technologies / C. Gomez, J. Paradells // *IEEE Communications Magazine.* – 2010. – Vol. 48, Issue 6. – P. 92-101. – doi: 10.1109/MCOM.2010.5473869.
28. Протоколы бывают разные... [Електронний ресурс] / Z-Wave Russia .– Режим доступу: \www/ URL: <http://www.z-wave.ru/o-z-wave/smi/161-protokoly-byvajut-raznye.html> – Загол. з екран. (17.01.2013)
29. Feng Chen. Simulation study of IEEE 802.15.4 LR-WPAN for industrial applications / Feng Chen, Nan Wang, Reinhard German, Falko Dressler // *Wireless communications and mobile computing.* –2010. – №10. – P. 609-621. – doi: 10.1002/wcm.736.
30. NS-3 [Електронний ресурс] / NS-3 Consortium.– Режим доступу: \www/ URL: <http://www.nsnam.org/> – Загол. з екрану. (10.02.2015)

Дата надходження в редакцію: 10.04.2015 р. Рецензент: д.т.н., проф. В. В. Поповський