

А.Ю.СКОБЛИКОВ, мл.науч.сотр., НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ»;
С.Ю.СКОБЛИКОВ, студент, НТУ «ХПИ»

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ФИЗИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Наведено спосіб збільшення точності фізичної моделі бездротової сенсорної мережі, за рахунок заміни ПК на реальні мікроконтролерні системи. Розглянуто реалізацію запропонованого способу за допомогою стенду XBee Microlab. Описано основні можливості та технічні характеристики розробленого стенда.

The method of increasing wireless sensor network physical model accuracy by replacing PC with real microcontroller systems is offered. Implementation of the offered method with the help of XBee Microlab board is considered. The main features and characteristics of the developed board are described.

Постановка проблемы. Проектируемые беспроводные сенсорные сети (БСС) имеют многочисленные различия, как в области применения, так и в использованных технических решениях. В такой ситуации на передний план выходит проблема эффективного моделирования БСС. Традиционным подходом при моделировании процесса функционирования БСС является использование программных средств высокого уровня. Это позволяет эффективно представить БСС на всех уровнях модели OSI, кроме физического.

Существующие методы физического моделирования предполагают использование ПК в связке с отладочными комплектами для радиомодулей в качестве узлов БСС. В таком случае весьма затруднительным является определение энергопотребления узла, тогда как данная характеристика является одной из определяющих при разработке БСС.

Анализ литературы. Обзор существующих стандартов и технологий БСС, приведенный в [1], описывает модели беспроводного канала связи, и физический уровень стандарта IEEE 802.15.4. Однако при этом не учитывают мобильность узлов и динамику объектов окружения. Предполагают, что соединения считаются симметричными.

Типовые примеры, приведенные в работах [2-4], показывают возможность использования БСС для решения различных задач науки, техники и быта. Причем, методы моделирования БСС [5] зачастую используют средства программирования высокого уровня.

Цель статьи – разработка способа повышения точности физической модели БСС за счет замены ПК в ней на реальные микроконтроллерные системы (МС).

1. БСС стандарта Zigbee. Методы моделирования БСС. В последнее время беспроводные технологии связи активно развиваются в различных на-

правлениях. Одним из наиболее новых и перспективных направлений являются беспроводные сенсорные (датчиковые) сети. Обычно под беспроводной сенсорной сетью (БСС) понимается беспроводная многочечковая (mesh) сеть (рис. 1) с низкой скоростью передачи данных и сверхнизким энергопотреблением. [1]

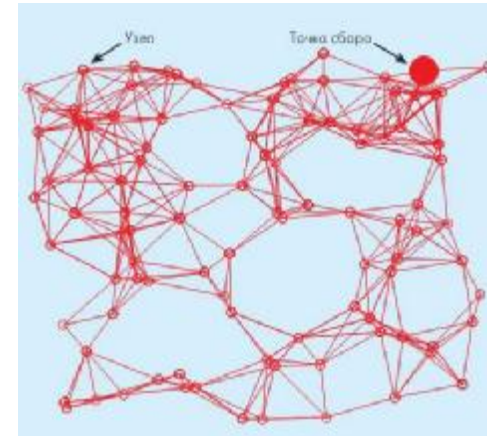


Рисунок 1 – Пример многочечковой топологии беспроводной сенсорной сети

Развитие полупроводниковых технологий позволяет создавать малогабаритные устройства, совмещающие функции измерения определенных параметров окружающей среды, предварительной обработки результатов и пересылки данных для дальнейшей обработки. Такие устройства могут иметь низкую стоимость и работают длительное время (до 10 лет) от встроенного источника питания. Эти особенности позволяют использовать сенсорные сети для различных научных и прикладных целей. Исследовательские проекты показывают возможность применения сенсорных сетей для исследования движения ледников [2], обнаружения радиоактивных веществ [3], локализации снайперов в городских условиях [4].

В области БСС единственным установившимся стандартом сегодня является Zigbee [1]. Он основан на международном стандарте IEEE 802.15.4, который описывает физический и канальный уровни семиуровневой модели OSI, то есть все, что же касается непосредственно передачи данных по радиоканалу, а также доступа к нему [6]. Приняв стандарт IEEE 802.15.4 за основу, Zigbee описывает верхние уровни модели OSI для БСС, четко описывая процессы маршрутизации пакетов в сети, шифрования передаваемых данных и даже поддержку стандартных профилей (шаблонов) функционирования БСС в целом.

Архитектура стека протоколов ZigBee/802.15.4 [7] приведена на рис. 2. За прием и передачу данных по радиоканалу отвечает РНУ (физический) уровень, где определяются:

- рабочий частотный диапазон;

- тип модуляции;
- максимальная пропускная способность;
- число каналов.



Рисунок 2 – Архитектура стека Zigbee/IEEE 802.15.4

В соответствии со спецификацией стандарта ZigBee/802.15.4, поддерживается работа в двух частотных диапазонах: 868/915 и 2400 МГц. Физические параметры БСС (см. табл.) при работе в различных частотных диапазонах также варьируются

Физические параметры БСС стандарта Zigbee/IEEE 802.15.4

Рабочая частота, МГц	868/915	2400
Тип модуляции:	BPSK	O-QPSK
Число каналов	10	16
Пропускная способность на канал, кБит/с	40	250

В настоящий момент первый частотный диапазон является лицензируемым (в нем функционируют сети стандарта GSM), в то время, как второй является открытым. Поскольку механизма получения лицензии для операторов БСС на сегодняшний день не предусмотрено, то при проектировании БСС выбор зачастую падает на рабочую частоту 2,4 ГГц.

- На физический уровень в сетях Zigbee возлагаются следующие функции:
- Активация/деактивация приемопередатчика;
 - Детектирование энергии принимаемого сигнала;
 - Выбор рабочего канала в пределах рабочего частотного диапазона;
 - Индикация качества связи;
 - Прослушивание рабочего канала для реализации MAC-уровнем техно-

логии CSMA-CA.

Проектируемые сенсорные сети имеют многочисленные различия, как в области применения, так и в использованных технических решениях. В такой ситуации на передний план выходит проблема эффективного моделирования БСС. Традиционным подходом при моделировании процесса функционирования БСС является использование программных средств высокого уровня [1,5].

Основным различием между локальными беспроводными сетями (например, WiFi) и БСС является реализация именно нижних уровней (физического и канального), что и дает возможность обеспечить низкое энергопотребление узлами БСС. Существующие способы моделирования БСС с помощью средств высокого уровня позволяют эффективно представить БСС на всех уровнях модели OSI, кроме физического. Причиной тому является большая сложность и трудоемкость моделирования, а также наличие больших погрешностей в модели по сравнению с реальными физическими процессами.

Так, наиболее распространенной моделью беспроводного канала является модель логарифмически-нормального распределения потерь в тракте:

$$PL(d) = PL(d_0) + 10\alpha \lg\left(\frac{d}{d_0}\right) + N(0, s_{ch}^2) = \overline{PL}(d) + N(0, s_{ch}^2), \quad (1)$$

где d – расстояние между передатчиком и приемником (м), d_0 – эталонное расстояние (м), α – показатель степени потерь в тракте, $N(0, s_{ch}^2)$ – случайная Гауссова переменная в тракте с нулевым средним и дисперсией s_{ch}^2 .

Данная модель учитывает только влияние эффектов замирания ($N(0, s_{ch}^2)$), при этом остаются неучтенными мобильность узлов, динамика объектов окружения, а также несимметричность радиоканала. Моделирование перечисленных физических параметров является достаточно громоздким и трудоемким и ими зачастую пренебрегают, что ведет к ощутимому снижению точности математической модели в особенности для БСС.

В таком случае целесообразным является именно физическое моделирование узлов БСС с целью исследования реальных физических параметров узлов сети, беспроводных каналов, а также сети в целом.

Физическое моделирование позволяет исследовать следующие показатели сети:

- Электромагнитную совместимость (ЭМС) проектируемой БСС с существующими беспроводными сетями в данном диапазоне рабочих частот (например, WiFi);
- Помехоустойчивость БСС.

Кроме того, использование реальных радиомодулей на этапе физического моделирования позволяет также оценить возможное наличие ошибок функционирования узлов разрабатываемой БСС.

2. Способ повышения точности физической модели БСС. Исходя из

концепции создания БСС, в качестве ее узлов (рис. 3) используются интеллектуальные датчики, состоящие из устройств измерения параметров окружающей среды, микроконтроллеров и приемопередатчика для обеспечения беспроводной связи. Кроме того, в состав узлов БСС могут входить исполнительные устройства, которые могут быть использованы для обратной связи с окружающим миром. К примеру, возможно наличие исполнителей для изменения положения узла в пространстве с целью самоорганизации сети. Такая архитектура позволяет осуществлять сбор, первичную обработку информации, ее передачу по беспроводным каналам, а также организовать простейшую обратную связь посредством исполнителей.



Рисунок 3 – Обобщенная структурная схема узла БСС

На сегодняшний день, при физическом моделировании БСС в качестве узлов используется ПК, реализующий функции устройств измерения параметров окружающей среды, исполнительных устройств, а также микроконтроллера (МК), управляющего работой узла в целом. Для моделирования приемопередатчика беспроводной связи используются отладочные комплекты различных фирм разработчиков, занимающихся созданием и реализацией радиомодулей Zigbee стандарта.

При существующем подходе весьма затруднительным является определение энергопотребления узла беспроводной сенсорной сети. Использование ПК для генерации потока данных, их обработки, а также управления узлом БСС требует постоянного преобразования формата данных при обмене с приемопередатчиком беспроводной связи. Это обусловлено отсутствием средств подключения радиомодуля к стандартным портам ввода/вывода ПК. Такое преобразование имеет ряд недостатков:

- задержки в передаче, вызванные работой аппаратных драйверов по

преобразованию форматов данных;

- повышенное энергопотребление, вызванное преобразованием форматов данных.

Говоря об энергопотреблении, что является крайне важным параметром для БСС, следует сказать, что при таком подходе нет возможности учета затрат МК реального узла на обмен данными, а также на управление модулем. При этом провести оценку энергозатрат ПК для решения этих конкретных задач не представляется возможным.

Еще одним немаловажным фактором является высокая стоимость предлагаемых отладочных комплектов, что приближает затраты на создание физической модели к стоимости проектируемой БСС.

Таким образом, на сегодняшний день при физическом моделировании БСС существует ряд серьезных ограничений значительно снижающих эффективность данного метода.

Для устранения этих недостатков предложено использовать реальные МС, которые позволяют более четко проследить взаимосвязи отдельных компонентов узла БСС, и оценить их характеристики значительно точнее.

Среди основных преимуществ предложенного способа по сравнению с существующим можно выделить следующие:

- прозрачность физической структуры узла БСС, которая позволяет четко выделить отдельные его компоненты;
- исключение промежуточного преобразования форматов данных при обмене между МК и беспроводным приемопередатчиком;
- снижение задержки, связанной с преобразованием форматов данных;
- возможность оценки совместимости существующих МС с радиомодулями, используемыми в качестве приемопередатчиков узлов БСС;
- точный расчет энергопотребления узла БСС и отдельных его блоков в различных режимах работы.

Разработанный способ физического моделирования БСС позволяет рассчитать энергопотребление не только узла БСС в целом, но и отдельных его блоков. При этом расчет энергопотребления аналоговых цепей (например, аналоговые датчики, исполнительные устройства) осуществляются по формуле (2).

$$P_a = UI, \quad (2)$$

где P – значение энергии потребляемой аналоговой цепью [Вт], U – напряжение, подаваемое на цепь [В], I – ток, потребляемый цепью [А].

Для расчета энергопотребления микроконтроллеров используется формула (3).

$$P_{MC} = CU^2f, \quad (3)$$

где P_{MC} – значение потребляемой энергии микроконтроллера с CMOS архитектурой [Вт], U – напряжение питания [В], C – внутренняя емкость МК [Ф], f – тактовая частота МК [Гц].

Просуммировав значения потребляемой мощности для всех блоков и це-

пей узла БСС (4), получаем значение потребляемой мощности узлом в целом.

$$P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n P_{ai} + \sum_{j=1}^m P_{MCj}, \quad (4)$$

где P_{Σ} – суммарная мощность, потребляемая узлом БСС [Вт], n – число аналоговых цепей, m – число МК, входящих в состав узла.

3. Микроконтроллерный стенд XBee Microlab. Реализация разработанного способа построения физической модели БСС выполнена на стенде XBee Microlab, внешний вид которого приведен на рис. 4.



Рисунок 4 – Внешний вид микроконтроллерного стенда XBee Microlab

При разработке данного стенда был выполнен анализ существующих программно-аппаратных решений на рынке радиомодулей стандарта Zigbee. Были рассмотрены устройства среднего класса основных фирм-производителей: Chipcon CC2520, Jennic JN5121-MO000/003, Freescale MC13192, Maxstream (Digi) XBee ZNet 2.5. Объектами рассмотрения стали модели с набором функций, регламентированных стандартом, а также дающих возможность организовать полноценные узлы (типов PAN router и PAN coordinator).

В процессе рассмотрения существующих решений были исключены те, которые позволяют организовать связь с МК только посредством интерфейса SPI. Использование интерфейса SPI заведомо ограничивает функциональность моделируемого узла БСС, в частности не позволяет использовать механизм прерываний при поступлении данных по беспроводной связи (ввиду того, что при использовании SPI приемопередатчик является ведомым и не может инициировать передачу данных в МК).

При дальнейшем детальном сравнении моделей Jennic JN5121-MO000/003 и Maxstream (Digi) XBee ZNet 2.5, выбор сделан в пользу последней ввиду ее более низкого потребляемого тока, а также более высокой чувствительности приемника [8].

Одним из требований при создании компонентов моделей является возможность их повторного использования. При создании компонентов физиче-

ских моделей, данное требование приобретает еще большую значимость. Возможность использования стенда XBee Microlab для создания широкого спектра физических моделей БСС была одной из основных идей при его создании. Выбранный радиомодуль сам по себе уже обладает большим набором функций и режимов, предусмотренных разработчиком с целью использования данного модуля для проектирования самых разнообразных по сложности и назначению узлов БСС. По этой причине основной задачей при разработке стенда была реализация простого и удобного доступа ко всем функциям радиомодуля, а также его простого сопряжения с большинством MC.

В результате, созданный авторами стенд обладает следующими основными характеристиками:

- Для обмена данными со стендом используется стандартный асинхронный последовательный интерфейс UART, поддерживаемый большинством MC.
- Для физического подключения стенда к MC используется стандартный 10-контактный разъем VH-10.
- Разработанный стенд может быть подключен к любым MC с 5В логикой.
- Стенд не требует внешнего источника питания. Вместо этого питание осуществляется от источников MC через интерфейсный кабель.
- Для управления режимом обмена данными между стендом и MC используется механизм RTS/CTS.
- Предусмотрены линии для управления и индикации режима работы приемопередатчика (рабочий режим/режим сна).
- Предусмотрена возможность аппаратного сброса работы приемопередатчика без сброса работы всей MC.
- На стенде предусмотрены контакты для подключения внешних цепей к любым выводам радиомодуля Maxstream (Digi) XBee ZNet 2.5, действующее значение напряжение в таких цепях не должно превышать 3В.
- Стенд позволяет устанавливать радиомодули XBee/XBee Pro с любым типом антенн.
- Стенд снабжен световой индикацией питания, а также режимов работы приемопередатчика.

Наличие перечисленных характеристик позволяет реализовать все преимущества предложенного способа физического моделирования БСС.

Кроме того, использование стенда XBee Microlab позволяет снизить затраты на создание физической модели по сравнению с решениями, предлагаемыми разработчиками радиомодулей.

4. Проверка работоспособности разработанного стенда. Для проверки работоспособности разработанного стенда XBee Microlab было проведено физическое моделирование БСС, представляющей собой простейшую систему пожаротушения. В ходе моделирования была проверена работа стенда для мо-

делирования всех трех типов узлов, предусмотренных стандартом Zigbee:

- PAN coordinator;
- PAN router;
- PAN end device.

В качестве микроконтроллерной системы для управления работой стенда был использован программно-отладочный стенд AVR Microlab версии СИЭС-1. Пример физической модели узла БСС приведен на рис. 5.

Выводы: Физическое моделирование является одним из важнейших этапов при проектировании БСС. Оно позволяет оценить важнейшие физические параметры разрабатываемой сети, такие как ЭМС, помехоустойчивость БСС, а также энергопотребление узлами сети.

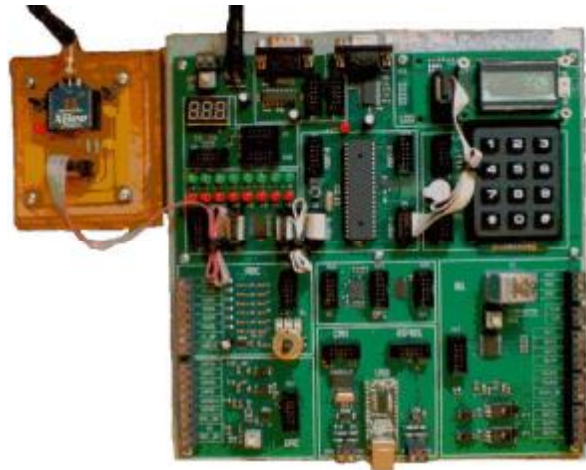


Рисунок 5 – Пример модели узла БСС на базе стендов XBee Microlab и AVR Microlab СИЭС-1

В отличие от существующих способов, предложенный способ физического моделирования БСС позволяет оценить реальное энергопотребление узлов, а также точно измерить физические характеристики беспроводного канала и сети в целом за счет исключения дополнительной избыточности при обмене данными с ПК, с учетом реальной специфики функционирования МС. Предложенный метод реализован в стенде XBee Microlab, который может быть применен для широкого спектра задач, решаемых в ходе физического моделирования. Эффективность предложенного способа и работоспособность стенда подтверждены серийей экспериментов по созданию разнообразных физических моделей БСС.

Список литературы: 1. Баскаков С. Стандарт ZigBee и платформа MeshLogic: эффективность маршрутизации в режиме многие к одному // Журнал «Первая миля». – № 2-3. – 2008. 2. К. Martínez,

J.K. Hart, R. Ong. Environmental Sensor Networks // Computer. – № 37(8). – 2004. – С. 50-56. 3. S. M. Brennan, A.M. Mielke, D.C. Torney, A.B. Maccabe. Radiation Detection with Distributed Sensor Networks // Computer. – № 37(8). – 2004. – С. 57-59. 4. M. Maroti, G. Simon, A. Ledeczi, J. Sztipanovits. Shooter Localization in Urban Terrain // Computer. – № 37(8). – 2004. – С. 60-61. 5. Дорошенко А.Е., Жереб К.А., Шевченко П.С. О моделировании сенсорных сетей средствами высокого уровня // доклад: УкрПРОГ, 23-25 мая 2006 р., г. Киев, Украина. 6. ANSI IEEE Std 802.15.4™-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003) IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – Specific requirements. Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANS). 7. Latest Zigbee specification including the pro feature set [Электронный ресурс] <http://www.zigbee.org/ZigBeeSpecificationDownloadRequest/tabid/311/Default.aspx>. 8. RF-модули XBee™ Series 2 OEM. Техническое руководство.

Поступила в редакцию 09.10.2009

УДК 004.045:621.396.967.2

О.О. ТЮРИН, аспирант, НТУ «ХПИ»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ СИГНАЛІВ СИСТЕМ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТІВ НА БАЗІ ФАЗОВОЇ ТА ЧАСТОТНОЇ МАНІПУЛЯЦІЇ

Приводиться порівняльний аналіз систем сигналів, які реалізуються на базі псевдохаотичних послідовностей при використанні фазової та частотної маніпуляції. Показано, що завдяки значно меншим бічним пелосткам функції невизначеності сигналів з фазовою маніпуляцією їх краще використовувати в системах ідентифікації повітряних об'єктів, для підвищення, як перешкодостійкості, так і енергетичної скритності.

A signals systems comparative analysis over, which will be realized on the base of pseudo-random sequences at the use of phase and frequency manipulations is brought. It is shown that due to the considerably less lateral petals signals vagueness function with phase manipulation it is better to use them in the systems of air objects authentication, for an increase, both noise-immunity and power secrecy.

Постановка проблеми. Розширення можливостей використання повітряного простору держави для польотів повітряних об'єктів неможливо без суттєвого підвищення ступеню технічної оснащеності сучасних засобами повітряного та наземного зв'язку, спостереження, навігації та автоматизації управління повітряним рухом, яка відповідає вимогам ІКАО. Все це укаже на потребу підвищення надійності інформаційного забезпечення користувачів системи контролю використання повітряного простору. Вирішення поставлених задач неможливо без застосування інформаційних технологій в процес отримання, збору, обробки, зберігання та розповсюдження аеронавігаційних даних, які забезпечать аеронавігаційні системи та користувачів повітряного простору держави аеронавігаційною інформацією потрібної якості. Дійсно, використання інформаційних технологій дозволить підвищити рівень інформаційного забезпечення, що дозволить забезпечити безпечність польотів, підвищення економічності та регулярності польотів цивільної та воєнної авіації у районі аеродрому, на повітряних трасах та у позатрасовому повітряному просторі за рахунок автоматизації процесів текучого планування, отримання, збору, обробки та от обра-