

УДК 004.75

*Александр Олегович Телятников,  
Юрий Никитович Кононов,  
Латиф Кудр*

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ**

В статье описана разработка системы моделирования и визуализации беспроводных сенсорных сетей. Разрабатываемая система предназначена для выявления узких мест беспроводных сенсорных сетей при их разработке, и экономии средств на доработку уже существующих сетей. В статье решены следующие задачи: выполнен обзор технологий организации беспроводных сенсорных сетей; выполнен анализ и выбор системы моделирования; сделан выбор метода построения графа сети и разработан алгоритм визуализации; сделана программная реализация разработанного алгоритма; проведено тестирование системы.

### **Обзор технологий организации беспроводных сенсорных сетей**

Одним из первых прототипов сенсорной сети можно считать систему SOSUS [1], предназначенную для обнаружения и идентификации подводных лодок. Технологии беспроводных сенсорных сетей стали активно развиваться в середине 90-х годов. Однако лишь в начале XXI века развитие микрoeлектроники позволило делать для таких систем достаточно дешевую элементную базу. Это привело к появлению большого количества реализаций беспроводных сенсорных сетей.

Современные беспроводные сенсорные сети в основном базируются на стандарте Zigbee. Множество отраслей и сегментов рынка (производство, различные виды транспорта, обеспечения жизнедеятельности, охрана и др.) готовы для внедрения сенсорных сетей, и спрос на эту технологию постоянно увеличивается. Использование недорогих беспроводных сенсорных устройств контроля открывает новые области для применения систем телеметрии:

- своевременное выявление отказов исполнительных механизмов, по контролю та-

ких параметров как вибрация, температура, давление и т. п.;

- контроль доступа в режиме реального времени в удаленных системах мониторинга объектов;
- автоматизация инспекции и технического обслуживания промышленных активов;
- применение как компонентов в энерго- и ресурсосберегающих технологиях;
- контроль параметров окружающей среды.

В настоящее время проблемам построения беспроводных сенсорных сетей посвящается множество работ. Их тематика разнообразна: от вопросов, связанных с созданием отдельных компонентов (приемопередатчики, микроконтроллеры, датчики и т.п.) с низкой стоимостью и малым энергопотреблением до проблем, возникающих при проектировании и эксплуатации сенсорных сетей — оптимизация топологии сети, разработка протоколов передачи данных разного уровня, оптимальное развертывание сети и т. п.

Следует отметить, что, несмотря на длительную историю сенсорных сетей, концепция их построения окончательно не оформилась и не выразилась в определенные программно-аппаратные (платформенные) решения. Реализация сенсорных сетей на текущем этапе во многом зависит от конкретных требований задачи. Архитектура, программно-аппаратная реализация находится на этапе интенсивного формирования технологии.

Одним из основных ограничений, которые необходимо учитывать при проектировании беспроводной сенсорной сети, является ограниченность емкости батарей установленных на узлах. Эта проблема особо остра, так как во многих случаях замена батарей затруднительна из-за того, что узлы устанавливаются в труднодоступных местах.

Наиболее энергозатратной операцией при функционировании беспроводных сенсорных сетей является передача данных по радиоканалу. Поэтому оптимизация передачи

данных, в смысле уменьшения общего энергопотребления, является важной задачей. Оптимизация протоколов передачи данных позволит продлить работоспособность и повысить эффективность всей сети.

Основными целями более низкого уровня, позволяющими минимизировать общее энергопотребление являются:

- равномерное распределение нагрузки на узлы сети;
- нахождение оптимальных маршрутов передачи данных с минимальным количеством ретрансляций;
- выбор оптимальной топологии сети;
- устойчивость к изменению топологии в процессе эксплуатации.

Ни одна из вышеперечисленных целей не может быть достигнута без моделирования сети. Успешному анализу полученных результатов моделирования будет способствовать визуализация топологии беспроводных сенсорных сетей и процессов протекающих в ней.

### Моделирование беспроводных сенсорных сетей

Модель — это объект-заместитель объекта-оригинала, обеспечивающий изучение некоторых свойств оригинала. Замещение одного объекта другим с целью получения информации о важнейших свойствах объекта-оригинала с помощью объекта-модели называется моделированием [2].

Основная сложность в моделировании работы беспроводной сенсорной сети заключается в том, что при моделировании необходимо учитывать различные факторы. Во-первых, на каждом узле сети, входящем в ее состав, установлена специализированная операционная система. Таких операционных систем несколько, но наиболее распространенная на сегодняшний день — TinyOS [3]. Кроме этого, разные узлы могут быть оборудованы различными датчиками и выполнять разные задачи. Во-вторых, следует учитывать тот факт, что сеть беспроводная, а значит, на ее работу могут влиять помехи, различные препятствия, затрудняющие передачу информации от узла к узлу. В-третьих, все узлы имеют ограниченное энергетические ресурсы, а значит и срок службы. Поэтому для моделирования необходимо использовать тот инструмент, который может максимально точно учесть все эти факторы.

Существует несколько программных симуляторов, с помощью которых можно моделировать работу беспроводных сенсорных сетей. Наиболее известными являются NS2 [4], Anylogic [5], TOSSIM [6]. Эти системы фокусируются на различных аспектах работы сети и имеют различную архитектуру.

Как NS2, так и Anylogic являются универсальными многофункциональными системами и могут быть использованы для моделирования как обычных, так и беспроводных се-

тей. NS2 моделирует работу на сетевом уровне и не может моделировать поведение приложений. В тоже время TOSSIM симулирует приложение, работающее на узле, работу операционной системы TinyOS и стек протоколов. Другими словами TOSSIM позволяет запускать приложения, написанные для TinyOS, без каких-либо изменений. В этом случае приложение, написанное для реального узла, будет запускаться в среде симулятора.

TOSSIM был разработан специально для моделирования именно беспроводных сенсорных сетей. Он тесно интегрирован с операционной системой, которая используется на узлах, а также может моделировать поведение различных видов узлов, что делает его незаменимым при моделировании работы сенсорных сетей. Поэтому, оптимальным инструментом для моделирования работы беспроводной сенсорной сети является симулятор TOSSIM. Детали программной реализации подсистемы моделирования представлены ниже.

### Визуализация топологии беспроводных сенсорных сетей и процессов, протекающих в них

Визуализация сложных систем и процессов, протекающих в них, является ключевым компонентом во многих приложениях в науке и технике.

Для визуализации структуры сети мы будем использовать граф, в котором узлы графа будут представлять узлы сети, а ребра — связи между узлами сети. Вес ребра будет обратно пропорционален уровню затухания сигнала. Входной информацией для визуализации структуры сети будет являться файл топологии, который используется в TOSSIM. На рис. 1 представлен пример кода задания топологии сети состоящей из шести узлов и соответствующий граф.

Данная сеть состоит из шести узлов, между которыми существует 16 соединений, причем большинство из них несимметричны. Например, соединение от узла 0 к узлу 1 более качественно чем в обратном направлении. В первом случае затухание  $-80$  dB, во втором  $-90$  dB. Это может быть связано с более высоким уровнем сигнала передатчика на узле 0.

Для визуализации графа будем использовать метод физических аналогий [7]. Этот метод предполагает рассмотрение графа как системы тел с силами взаимодействия между ними. Например, можно считать вершины графа одинаково зараженными частицами, а ребра — пружинами. В таком случае алгоритм находит конфигурацию узлов с минимальной потенциальной энергией — так называемую конфигурацию равновесия сил, в которой каждый узел занимает такую позицию, что сумма всех сил, приложенных к нему, равна нулю.

Идея метода схематически изображена на рис. 2.

```

from TOSSIM import *
t = Toassim([])
r = t.Radio()
mote0 = t.getNode(0)
mote1 = t.getNode(1)
mote2 = t.getNode(2)
mote3 = t.getNode(3)
mote4 = t.getNode(4)
mote5 = t.getNode(5)
r.add(0, 1, -80)
r.add(1, 0, -90)
r.add(0, 2, -80)
r.add(2, 0, -83)
r.add(2, 3, -70)
r.add(3, 2, -80)
r.add(1, 3, -90)
r.add(3, 1, -92)
r.add(4, 3, -88)
r.add(3, 4, -85)
r.add(5, 3, -60)
r.add(3, 5, -76)
r.add(2, 1, -90)
r.add(1, 2, -90)
r.add(5, 4, -90)
r.add(4, 5, -90)
    
```

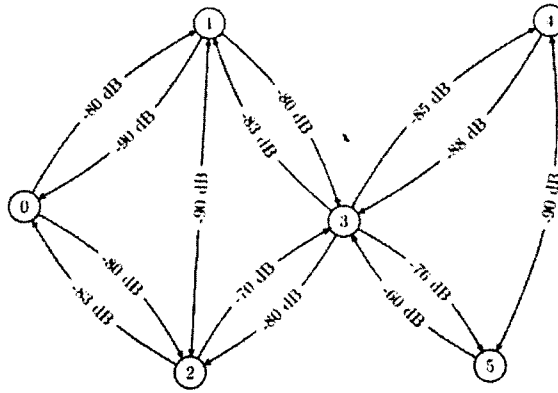


Рис. 1. Пример топологии и соответствующий граф сети

Метод визуализации графов с использованием физических аналогий популярен по нескольким причинам. Во-первых, алгоритм довольно прост в понимании и реализации. Во-вторых, он дает в итоге хорошее отображение графа [7].

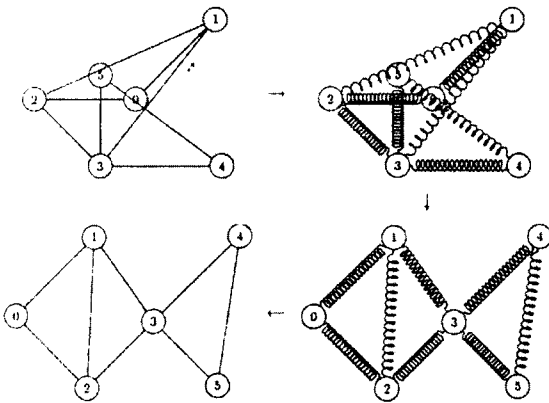


Рис. 2. Идея метода физических аналогий при визуализации графа

Рассмотрим подробнее метод физических аналогий.

Мы использовали подход, который заключается в использовании комбинации пружин и электронных сил, когда каждое ребро рассматривается как пружина, а вершины считаются одинаково заряженными частицами, между которыми действуют силы отталкивания. В этом случае потенциальная энергия системы представляет собой положительную функцию:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{p_i, p_j \in E} w_{ij} d^2(p_i, p_j) + \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{p_i \in E} q_i \sum_{p_j \in V} \frac{q_j}{d(p_i, p_j)}$$

где  $E$  — множество ребер графа;  $d^2(p_i, p_j)$  — квадрат расстояния между вершинами графа  $p_i, p_j$ , декартовы координаты которых  $(x_i, y_i)$  и  $(x_j, y_j)$ ;  $d(p_i, p_j) = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2$ ;

$w_{ij}$  — произвольные положительные веса этих ребер (в частности, можно взять все веса равными 1);

$q_i$  — точечный заряд  $i$ -го узла;

$V(p_i)$  — окрестность вершины  $p_i$ , т.е. множество смежных с  $p_i$  вершин.

Рассмотрим алгоритм работы метода. На первом этапе вершины размещаются на плоскости случайным образом. Второй этап — это последовательность итераций для стабилизации, на каждой из которых вычисляется потенциальная энергия  $W_p$  для всех вершин  $p_i$  и для тех, где  $W_p \neq 0$ , происходит перемещение в направлении уменьшения этой энергии на расстояние пропорциональное ее модулю.

Схема работы визуализатора представлена на рис. 3.

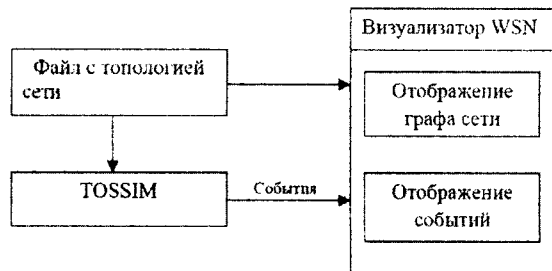


Рис. 3. Структурная схема визуализатора

### Программная реализация системы

Для решения задачи моделирования и визуализации беспроводных сенсорных сетей было разработано несколько модулей, каждый из которых выполняет отдельную функ-

цию, а вместе они составляют полноценное приложение. Разработаны модули для моделирования с использованием эмулятора TOSSIM и визуализации реализованного с помощью фреймворка Ruby on Rails, Javascript и библиотеки D3.js.

Подсистема моделирования работы беспроводной сенсорной сети была написана на языке NesC для операционной системы TinyOS. За основу была взята программа /tinyos-2.x/apps/tests/TestNetwork. В этой программе реализованы основные сетевые протоколы сбора и распространения информации. Данное приложение генерирует случайные показания датчиков и передает их в сеть, а также осуществляет ретрансляцию пакетов, поступивших от других узлов, в направлении базовой станции используя протоколы CTP (Collection Tree Protocol) и Dissemination. CTP де-факто является стандартным протоколом сбора данных в TinyOS 2.x [8]. Dissemination является одним из основных протоколов сенсорных сетей, который позволяет надежно распространять небольшие сообщения (меньше одного пакета данных) для каждого узла с целью конфигурации, опроса, и перепрограммирования сети [9].

Для анализа результатов моделирования была выполнена доработка кода программы TestNetwork, распространяемой с TinyOS. Эта доработка направлена на запись в специальный журнал служебных сообщений о различных событиях, происходящих в сети. Например, это информация о получении и отправке пакетов данных. С помощью этого механизма была достигнута гибкость настройки визуализатора. Появилась возможность отбирать для отображения только интересные события.

Для эмуляции работы сети с использованием TOSSIM был написан скрипт на языке Python, который выполняет следующее:

- подключает TOSSIM и стандартные библиотеки;
- задает множество узлов и связей между ними;
- задает модель шума, параметры которого загружаются из специальных файлов распространяемых с TinyOS;
- запускает модель.

Моделирование работы сети происходит с использованием по-событийного способа продвижения модельного времени. Условием завершения работы модели может быть как временной интервал, так и достижение заданного числа событий.

Результатом работы эмулятора является файл журнала с информацией обо всех событиях выбранных типов, произошедших на узлах сети.

Данные полученные при моделировании работы сети являются входными данными для визуализатора.

В ходе работы эмулятора в файл журнала выводятся сообщения, сигнализирующие о

прохождении определенных событий. Сообщения имеют общую структуру. Для обработки файла журнала используется скрипт написанный на языке Ruby. Он считывает данные из файла, в котором каждая строка это информация о каком-то событии, например информация о получении пакета и сохраняет в нужном формате в базу данных MySQL.

Используется Ruby потому что это динамический высокоуровневый язык для быстрого и удобного объектно-ориентированного программирования. Язык имеет независимую от операционной системы реализацию многопоточности, строгую динамическую типизацию, сборщик мусора и многие другие возможностями. Ruby близок по особенностям синтаксиса к языкам Perl и Eiffel, по объектно-ориентированному подходу — к Smalltalk.

В свою очередь реляционная СУБД MySQL гибкая, быстрая, обеспечивает сохранность данных и распространяется под свободной лицензией GNU General Public License. Это и послужило решающим аргументом в выборе именно данной СУБД.

Далее полученные данные берутся из базы данных, преобразуются в формат JSON. Это необходимо для визуализатора данных.

Таким образом, в ходе выполнения работы была разработана специальная программа, состоящая из нескольких модулей, каждый из которых выполняют уникальную функцию и является частью целой системы моделирования и визуализации беспроводных сенсорных сетей.

## Выводы

Разработана система моделирования и визуализации беспроводных сенсорных сетей, которая может использоваться на этапе проектирования информационных систем использующих множество сенсорных узлов соединенных посредством радиоканала.

Для решения задач использовались современные инструменты, такие как симулятор TOSSIM, Python, Ruby, Javascript. При этом применялся компонентный подход. Данный факт позволяет всегда поддерживать код в актуальном состоянии и уменьшить вероятность того, что программа в будущем станет тяжелой освоенной в связи с утратой актуальности инструментов, с помощью которых она была разработана.

Разработанная система имеет большие перспективы, потому что она позволит упростить процесс проектирования беспроводных сенсорных сетей. Благодаря визуализации и подробной детализации работы сети, система моделирования и визуализации значительно упростит разработку и последующее внедрение беспроводных сенсорных сетей на практике.

## Литература

1. Офіційний сайт SOSUS System [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.pmel.noaa.gov/vents/>

acoustics/sosus.html. 2. Советов Б. Я. Моделирование систем : учеб. для вузов / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. — 3-е изд., перераб. и доп. — М. : Высш. шк., 2001. — 343 с. 3. Офіційна сторінка операційної системи Tinyos. — [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.tinyos.net>. 4. Офіційний сайт NS2 — [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://isi.edu/nsnam/ns>. 5. Офіційний сайт Anylogic — [Електронний ресурс]. Режим доступу: [http://www.xjtek.ru/anylogic/why\\_anylogic](http://www.xjtek.ru/anylogic/why_anylogic). 6. TOSSIM System Description. Philip Levis. January 30, 2002. — [Електронний ресурс]. Режим доступу: [www.tinyos.net/nest/doc/tossim.pdf](http://www.tinyos.net/nest/doc/tossim.pdf). 7. Касьянов В. Н. Графы в програм-

мировании: обработка, визуализация и применение / В. Н. Касьянов, В. А. Евстигнеев. — СПб. : БХВ-Петербург, 2003. — 1104 с. 8. Gnawali O., Fonseca R., Jamieson K., Moss D. and Levis P. Collection Tree Protocol. In Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys), pages 1–14, Nov 2009. 9. Levis P. and Lin K. Data Discovery and Dissemination with DIP. Proceedings of the 7th international conference on Information processing in sensor networks (2008).

У статті описана розробка системи моделювання та візуалізації бездротових сенсорних мереж. Розробляється система призначена для виявлення вузьких місць бездротових сенсорних мереж при їх розробці, та економії коштів на модернізацію вже існуючих мереж. У статті вирішені наступні завдання: виконаний огляд технологій організації бездротових сенсорних мереж; виконано аналіз і вибір системи моделювання; зроблений вибір методу побудови графа мережі та розроблено алгоритм візуалізації; зроблена програмна реалізація розробленого алгоритму.

*Ключові слова:* бездротова сенсорна мережа, моделювання, візуалізація, граф, програмна реалізація

This article describes the development of a wireless sensor networks (WSN) modeling and visualization system. The developed system is designed to identify bottlenecks in WSN in their design, and cost savings for modification of existing networks. The paper addressed the following problems: a survey of wireless sensor network technologies; analysis and choice of modeling system; choice of a method of graph visualization; software implementation of the method.

*Key words:* wireless sensor network, modeling, visualization, graph, implementation.