

УДК 519.687.5

А.П. ПЛАХТЕЕВ, П.А. ПЛАХТЕЕВ

Национальный автомобильно-дорожный университет «ХАДИ», Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

Приведен анализ модели беспроводной сенсорной сети с узлами переменной активности и предложено ее компактное описание. На основе модели можно синтезировать произвольную топологию сети с достаточно большим числом узлов. Для автоматической генерации топологии сети, ее визуализации и анализа поведения предложена программная оболочка NetsModel. Показано использование оболочки для моделирования поведения сетей с регулярной и нерегулярной топологией. Приведены результаты моделирования mesh-сетей с периодической активностью узлов.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, узел сети, топология, список связей, модель сети.

Введение

Моделирование сетей позволяет получить данные для совершенствования алгоритмов взаимодействия их узлов и качественных показателей сетей. Это требует генерации пространственного расположения узлов сети – регулярного или случайного и простого описания топологии. Число узлов, плотность их расположения, радиус действия узлов определяет число связей в сети, используемых при решении задач маршрутизации. Особенностью современных Ad Hoc сенсорных сетей является динамическая топология, обусловленная перемещением узлов сети и их периодической активностью. Последнее является важным средством повышения срока жизни необслуживаемых узлов с автономным питанием. На основе Peer-to-Peer соединений реализуется информационный обмен между произвольными узлами сети при выходе из строя отдельных узлов и воздействия помех на отдельные сегменты сети. Ожидается высокая живучесть таких сетей, способность к самоорганизации и масштабированию.

2. Анализ последних исследований и публикаций и анализ нерешенных задач

Периодическая активность узлов требует синхронизации циклов обмена узлов [1, 2], что позволяет повысить срок жизни необслуживаемых узлов. Но эта проблема еще далека от решения и требует исследования процессов самосинхронизации mesh – сетей.

Протоколы маршрутизации [3, 4] в Ad Hoc сетях являются ресурсоемкими и требуют усовершенствования для возможности реализации в простых узлах. В этом направлении данные моделирования могут позволить оценить качество протоколов.

1. Описание модели сети

Основным способом описания топологии сети G из N узлов является матрица смежности. Эта матрица разреженная и имеет очень большие размеры, а ее хранение в исходном виде требует большой объем памяти (файла). Более удобным является описание в виде списков связей узлов:

$$G_i = \langle g_1^i, g_2^i, \dots, g_j^i, \dots, g_{k_i}^i \rangle, \quad (1)$$

где $g_j^i \in \overline{1..i-1, i+1..N}$,

$$i = \overline{1..N}, \quad j = \overline{1..N}, \quad k_i = \overline{1..N}.$$

Связность узла i : $P_i = |G_i|$. Если $\forall i: P_i = N$, то сеть является полностью связной и общее число связей составляет $V = N^2/2$. На практике $\forall i: P_i \ll N$.

Также $\exists i: G_i = \emptyset$, составляющие подмножество G^S узлов, находящихся в неактивном состоянии (ожидания, неисправном, заблокированном помехами). Число неактивных узлов $N^S = |G^S|$ изменяется в процессе функционирования сети, поскольку подмножество G^S непрерывно изменяется. Таким образом, сеть $G = G^A \cup G^S$, где G^A – подмножество активных узлов.

С учетом пространственного положения узлов дополним список связей узла координатами X_i, Y_i на плоскости размерами $W \times W$:

$$\langle X_i, Y_i, G_i \rangle, \quad i = \overline{1..N}, \quad X_i \leq W, \quad Y_i \leq W. \quad (2)$$

Для составления списков связей узлов сети с радиусом действия R используем критерий:

$$\forall i \forall j: g_j^i = j,$$

$$\text{если } \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \leq R. \quad (3)$$

Узлы сети, подверженные действию источника помех с координатами X_n, Y_n с радиусом действия R_n переводятся в подмножество G^S и определяются следующим образом:

$$\forall i: \sqrt{(X_i - X_n)^2 + (Y_i - Y_n)^2} \leq R_n, i \in G^S. \quad (4)$$

Учитывая изменение во времени, обозначим через $G^A(t)$ и $G^S(t)$ подмножества G^A и G^S в момент времени t .

В практике построения сенсорных сетей $G^A(t-1) \neq G^A(t) \neq G^A(t+1)$, однако если $\forall i \forall j: G^A(i) \cap G^A(j) = G^C$, то подмножество G^C – постоянно активные узлы-координаторы. Такие узлы используются, например, при построении сетей ZigBee [4, 5]. Наличие таких специализированных узлов, образующих некоторую инфраструктуру упрощает решение задач маршрутизации, но требует для них неограниченного энергетического ресурса, что обеспечивается стационарным питанием.

Для сетей Ad Hoc все узлы равноправны и имеют ограниченный энергетический ресурс. Для узла i ресурс $E_i = e_i \cdot m_i$, где e_i – средние энергетические затраты на выполнение цикла обмена, m_i – максимальное число циклов обмена. Расход энергии e_i определяется длительностью цикла t_i , потребляемой мощностью p_i , которая выражается потребляемым током I_i и напряжением питания U_i :

$$e_i = t_i \cdot p_i = t_i \cdot I_i \cdot U_i,$$

Поскольку U_i в общем случае уменьшается со временем, то в модели будем использовать среднее значение. Поскольку в цикле обмена прием и передача могут требовать различных энергетических затрат, то представим

$$e_i = e_i^R + e_i^T = t_i^R \cdot p_i^R + t_i^T \cdot p_i^T, \quad (5)$$

где: e_i^R, e_i^T – энергетические затраты на прием и передачу в цикле обмена;

t_i^R, t_i^T – продолжительность приема и передачи;

чи;

p_i^R, p_i^T – потребляемая мощность при приеме и передаче.

Для упрощения модели в (5) положим

$$\forall i: E_i = E = \text{const}, e_i = e = \text{const}, p_i = p = \text{const},$$

$$t_i = T = \text{const}, m_i = m = \text{const}.$$

Таким образом, каждый узел сети способен выполнить m циклов обмена, после чего переходит в множество G^S . Следовательно, для оптимизации сети период активизации узлов необходимо по воз-

можности увеличивать при минимизации числа циклов обмена.

3. Программная модель беспроводной сенсорной сети

С целью исследования поведения сенсорной сети с периодической активностью узлов, процессов деградации и влияния помех был создан инструмент имитационного моделирования работы сети (рис. 1). В состав модели входит генератор новой сети, создающий на плоскости множество узлов со случайными координатами. Задаваемые параметры сети – W, N, R, R_n, X_n, Y_n определяют плотность расположения узлов и их связность.

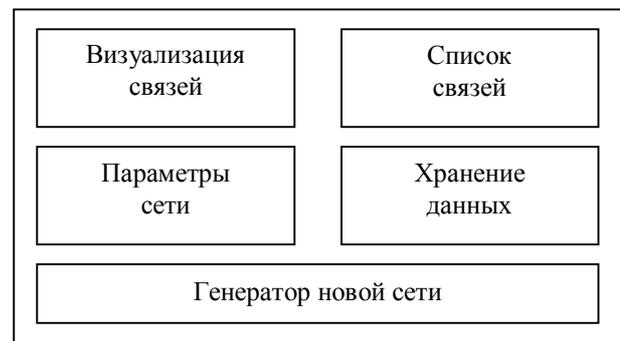


Рис. 1. Состав модели сети

Модель реализована средствами среды Delphi. Вид рабочего окна модели представлен на рис. 2. Приведенная сеть содержит 111 узлов со случайным расположением на плоскости.

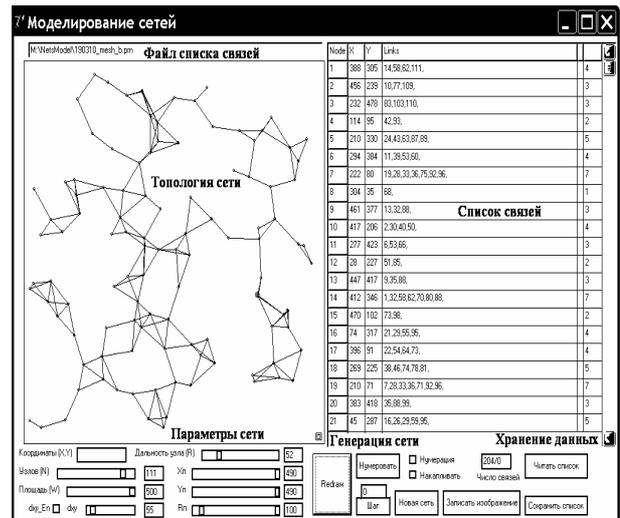


Рис. 2. Вид рабочего окна модели сенсорной сети

Список связей посредством функций хранения данных записывается в файл и воспроизводится из

файла для продолжения исследований с имеющейся моделью.

Визуализация связей позволяет перенести матрицу связей на плоскость в виде ребер, соединяющих активные узлы модели.

Выводятся номера узлов, а также координаты (X_i, Y_i) выбранного узла i .

4. Визуализация связей

При визуализации расположения узлов различными метками выделяются активные, неактивные и отключенные узлы, координаторы и источник помех (рис. 3). Узлы могут быть перенумерованы. Число и расположение связей определяется состоянием узлов и радиусом их действия R . У регулярной сети на рис. 3 для $R=51$ образуются 26 связей.

Здесь узлы находятся в различном состоянии: неактивном (4, 10), отключенном (10), постоянно активном (3, 5), заблокированном помехами (27, 28, 30) и активными в текущий момент (остальные узлы).

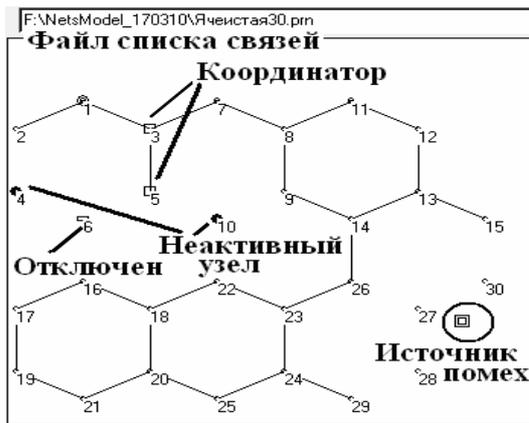


Рис. 3. Связи узлов сети для $R = 51$

Из (2) следует, что с увеличением R растет число связей отдельных узлов и сети в целом. Так, для приведенного на рис. 4 расположения и состояния 30 узлов зависимость от R числа связей сети и отдельных узлов приведена на рис. 4.

В современных радиочастотных модулях предусматривается управление уровнем излучаемой мощности, что соответствует изменению дальности узлов.

Список связей регулярной сети (рис. 5) дополнен признаком состояния узлов: « \ast » – активный в текущий момент, « x » – неактивный, « c » – постоянной активности, « f » – выключенный. С учетом состояния узлов определяются связи узлов, и в выделенной колонке выводится их число.

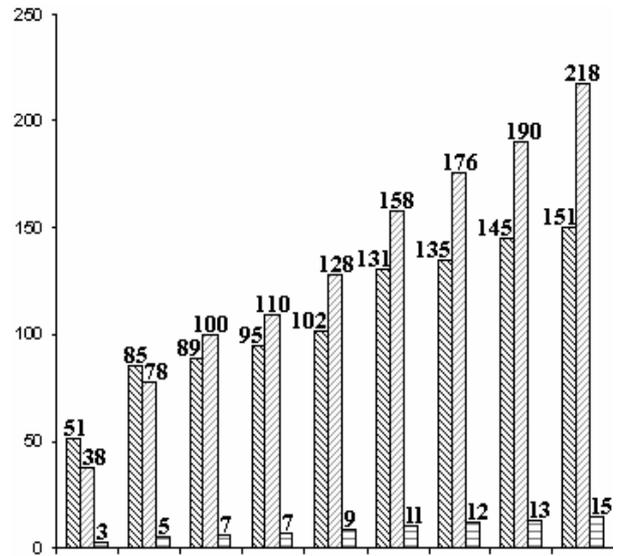


Рис. 4. Дальность, число связей сети и среднее число связей узла

Состояние узлов может произвольно изменяться установкой признака узла в выделенном поле, а также в каждом шаге моделирования поведения сети программно. При этом задается число активных узлов на каждом шаге.

| | | | | | |
|---|----|-----|--------|--|-----|
| 2 | 6 | 72 | 1, | | 1 |
| 3 | 94 | 72 | 1,5,7, | | c 3 |
| 4 | 6 | 122 | | | x 0 |
| 5 | 94 | 122 | 3, | | c 1 |
| 6 | 50 | 144 | | | f 0 |

Рис. 5. Фрагмент списка связей узлов сети для сети на рис. 2

5. Управление параметрами сети

Элементы интерфейса пользователя на рис. 6 позволяют управлять параметрами генерируемой сети.

Координаты (X, Y) определяют положение выбранного узла сети в квадратной области, размеры которой задаются параметром W . Число узлов 1..128 задается параметром N , а дальность действия узла – параметром R .

Хотя дальность действия узла определяется многими факторами (мощность передатчика, зависящая от напряжения питания; чувствительность приемника; диаграмма направленности антенны; наличие препятствий для распространения радиоволн; наличие и уровень помех и пр.), в модели все узлы обладают круговой диаграммой направленности с фиксированным радиусом действия.

| | | | |
|------------------|--|--------------------|----------------------------------|
| Координаты (X,Y) | <input type="text" value="50,50 (1)"/> | Дальность узла (R) | <input type="text" value="51"/> |
| Узлов (N) | <input type="text" value="30"/> | Xп | <input type="text" value="299"/> |
| Площадь (W) | <input type="text" value="500"/> | Yп | <input type="text" value="233"/> |
| dxу_En | <input type="text" value="15"/> | Rп | <input type="text" value="50"/> |

Рис. 6. Задание параметров сети и источника помех

Воздействие помех моделируется с помощью точечного источника помех с координатами (Xп, Yп) и радиусом действия Rп. Параметр dxу определяет число активных узлов в процессе функционирования сети и отражает периодичность выхода узлов из состояния ожидания. Выбор множества активных узлов на каждом шаге осуществляется по случайному закону. Число активных узлов на каждом шаге моделирования задается с помощью элемента dxу.

При генерации новой сети элемент dxу ограничивает расстояние между узлами, если это разрешено элементом управления dxу_En.

6. Управление визуализацией и документированием

Новая конфигурация сети со случайным выбором положения узлов генерируется в соответствии с заданными параметрами элементом управления «Новая сеть» (рис. 7).

| | | | | |
|--------|------------|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------|
| Redraw | Нумеровать | <input type="checkbox"/> Нумерация | <input type="text" value="26/6"/> | Читать список |
| | | <input type="checkbox"/> Накапливать | Число связей | |
| | Шаг | Новая сеть | Записать изображение | Сохранить список |

Рис. 7. Управление визуализацией

Любые изменения в сети отображаются на обновленном изображении в области построения с помощью элемента Redraw. При этом определяется число связей узлов сети и число неактивных узлов. При необходимости узлы могут быть перенумерованы одновременно (Нумеровать) или выборочно (разрешается элементом Нумерация).

Описание сети хранится в текстовом файле *.rpn и может отображаться из файла. Для этого используются функции «Читать список» и «Сохранить список». Сохранению подлежат: параметр R и элементы X,Y,Links для всех узлов сети. Посредством элемента читать список из выбранного файла *.rpn извлекаются R и элементы X,Y,Links для всех узлов сети, заносятся в список (рис. 5), а в поле изображения топологии указывается местоположение узлов. Такой файл с описанием расположения узлов реальной сети может быть подготов-

лен в текстовом редакторе и использоваться в процессе моделирования.

7. Построение маршрутов сети

Увеличение дальности и числа связей узлов позволяет строить маршруты при малом числе активных узлов, однако разрешение коллизий при одновременном обмене нескольких узлов увеличивает энергопотребление передатчика.

Для сетей с регулярной структурой вид топологии определяется числом связей каждого узла (рис. 8). Сети с такой топологией позволяют решить задачу оптимального покрытия заданной. Целью оптимизации является использование минимального числа узлов. Одновременно, регулярная топология упрощает задачу маршрутизации, где используются таблицы маршрутов.

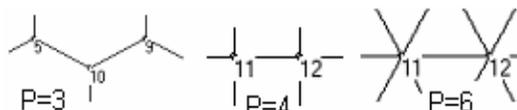


Рис. 8. Узлы сети с числом связей 3, 4 и 6

На рис. 9 показан процесс формирования маршрута передачи данных от узла 1 к узлу 22 сети для P = 3. На каждом шаге выбирается по случайному закону три активных узла.

Для одной из последовательностей выбора выстраивается несколько цепочек передачи данных и через 10 шагов завершается цикл передачи через узлы – 3-5-10-18-19-20-21. Минимальная длина пути – 8. При другом порядке выбора активных узлов количество шагов изменяется.

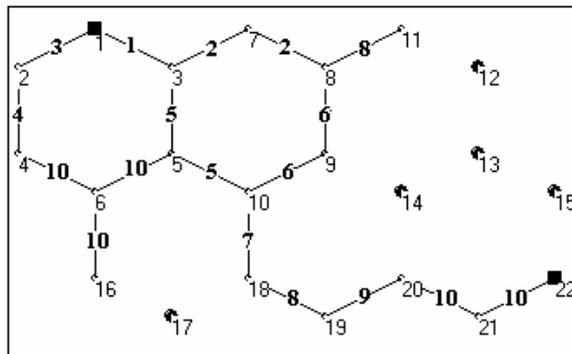


Рис. 9. Маршруты в сети из 22 узлов

На основе модели можно произвести статистическую оценку длин маршрутов для различных протоколов маршрутизации. Критерий эффективности протокола – расход энергии на цикл обмена или за определенный промежуток времени.

Выводы

Предлагаемая модель позволяет проводить моделирование создаваемых случайных сетей, а также сетей с заданной топологией. Может быть задан средний уровень активности узлов сети и различные состояния узлов, а также воздействие источника помех. Пошаговое моделирование поведения сети может дать информацию о наличии критических путей и недопустимом времени доставки данных для совершенствования протоколов маршрутизации и синхронизации сети.

Дальнейшее развитие модели требует задания правил функционирования узлов сети для различных протоколов маршрутизации, накопления данных статистических испытаний.

Литература

1. Рагозин Д.В. Моделирование синхронизированных сенсорных сетей / Д.В. Рагозин // Проблемы програмування. – 2008. – № 2-3. – С. 721-729.
2. *Ultra-Low Energy Wireless Sensor Networks in Practice. Theory, Realization and Deployment.* Tampere University of Technology, Finland. – John Wiley & Sons Ltd. – 2007. – 370 p.
3. Aggelou G. *Wireless Mesh Networking* / George Aggelou, B.Eng. – McGraw-Hill, 2009. – 517 p.
4. Lewis Ted G. *Network Science. Theory and Practice* / Ted G. Lewis // John Wiley & Sons, Inc. – 2009. – 506 p.
5. *ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary.* – 2004. – 21 p.

Поступила в редакцию 5.01.2010

Рецензент: д.т.н., проф., заведующий кафедры компьютерных информационных технологий и систем А.Л. Ляхов, Полтавский национальный технический университет, Полтава, Украина.

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВЗАЄМОДІЇ ЕЛЕМЕНТІВ БЕЗДРОТОВИХ СЕНСОРНИХ МЕРЕЖ

А.П. Плахтєєв, П.А. Плахтєєв

Наведений аналіз бездротової сенсорної мережі з вузлами змінної активності та запропоновано її стислий опис. На основі моделі можна синтезувати довільну топологію мережі з достатньо великою кількістю вузлів. Для автоматичної генерації топології мережі, її візуалізації та аналізу поведінки запропонована програмна оболонка NetsModel. Показано використання оболонки для моделювання поведінки мереж з регулярною та нерегулярною топологіями. Наведені результати моделювання mesh- мереж з періодичною активністю вузлів.

Ключові слова: бездротова сенсорна мережа, вузол мережі, топологія, список зв'язків, модель мережі.

MODELING AND INVESTIGATION PROCESS INTERWORKING ELEMENTS WIRELESS SENSOR NETWORK

A.P. Plakhtyeyev, P.A. Plakhtyeyev

Analysis of a wireless sensor network with variable activity nodes has been given and its compact description has been suggested. On the basis of the model random topology of a network with sufficient number of nodes can be synthesized. SensorNet shell program has been suggested for automatic generation of the network topology, its viewing and behavior analysis. Usage of the shell to simulate behavior of networks with regular and non-regular topology has been shown. The results of simulation of mesh networks having periodic activity of the nodes.

Key words: wireless sensor network, model, network topology.

Плахтєєв Анатолій Павлович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного автомобільно-дорожного університету «ХАДИ», Харків, Україна, e-mail: plaht@mail.ru.

Плахтєєв Павел Анатольевич – асистент кафедри інформатики Національного автомобільно-дорожного університету «ХАДИ», Харків, Україна.