

Е.С. ГРИЧУК¹, М.Г. КУЗЬМИНА², Э.А. МАНЬКИН^{1,3}

¹Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт», Москва

²Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва
mg.kuzmina@gmail.com

МОДЕЛЬ СЕТИ ИМПУЛЬСНЫХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ МАРШРУТИЗАЦИИ ИНФОРМАЦИИ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Разработки принципов работы беспроводных сенсорных сетей и методов маршрутизации информации в них, позволяющих обеспечить динамическую адаптацию архитектуры связей сети и автоматизм ее работы, представляют интерес. При построении принципов работы сети, основанных на синхронизации, адекватными моделями беспроводных сенсорных сетей являются модели импульсных осцилляторных сетей.

В работе предложена модель осцилляторной сети с импульсной осцилляторной динамикой и импульсным взаимодействием. Обсуждаются возможные правила сетевого связывания, обеспечивающие управление состоянием синхронизации в импульсной осцилляторной сети.

Ключевые слова: импульсные осцилляторные сети, синхронизация, беспроводные сенсорные сети, маршрутизация информации.

Введение

Достижения микроэлектроники открыли путь к созданию новой технологии – беспроводным сенсорным сетям (wireless sensor networks, WSN). WSN – гетерогенные пространственно распределенные сети, содержащие узлы-сенсоры (sensor nodes), приемники (sinks) и передаточные устройства (gateway nodes), связанные между собой посредством радио. В качестве сетевых процессоров (называемых сенсорными узлами) в них используются мало потребляющие процессоры, трансиверы и миниатюрные недорогие сенсоры (MEMS, RFID). Узлы WSN сочетают функции удаленных детекторов, микрокомпьютеров и коммуникационных устройств. Число узлов может достигать 10^7 . Сети WSN используются в разнообразных задачах мониторинга. Они способны обеспечить сбор информации, начальную

обработку данных и передачу информации с больших площадей в течение длительного времени.

Как правило, WSN – самоформирующиеся системы, способные адаптироваться к внешней среде и обладающие многими возможностями. Адаптация осуществляется посредством самоорганизованного изменения топологии сетевых связей. Заложенные в сетях внутрисетевые правила (протоколы) способны обеспечить возвратно-поступательное (челночное) распространение информации в сети методами multi-hop. Динамически адаптирующаяся архитектура связей WSN способна обеспечить решение таких задач как присоединение новых узлов, расширение пространственной области, занимаемой сетью, самовосстановление (продолжение прежней работы сети в случае выхода из строя отдельных узлов) и др. [1-4].

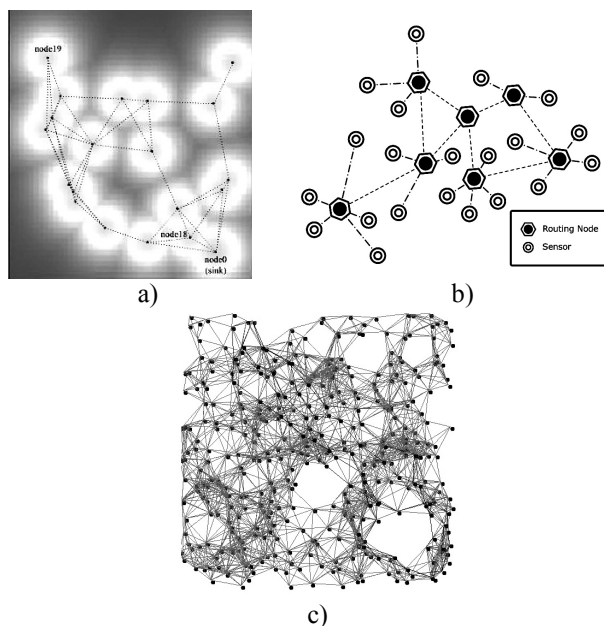


Рис. 1. Примеры WSN-сетей:

а) фрагмент WSN, состоящей из узлов-сенсоров, обладающих одинаковыми ограниченными сенсорными полями (показаны светлым); б) фрагмент гетерогенной кластеризованной WSN, состоящей из узлов-сенсоров и узлов-приемников; в) фрагмент гомогенной WSN (из узлов-сенсоров) с самоорганизованно сформированной системой связей.

Сети WSN отличаются от традиционных сетей, и для них требуется развитие специальных распределенных адаптивных алгоритмов обработки информации. Разнообразие методов маршрутизации информации (routing protocols, RP) отражает разнообразие способов обмена данными в WSN. Выбор метода маршрутизации определяется выполняемыми задачами и архитектурой связей сети. Существуют RP, основанные на оптимизации энергии WSN, на использовании характеристик пространственного расположения сети, на введении предварительной кластеризации сети, на построении направленной диффузии информации и др. Должное место занимают RP, основанные на синхронизации.

Временную синхронизацию в WSN можно рассматривать как одно из средств самоорганизации сети [5]. Обращение к синхронизации вызвано необходимостью обеспечить динамическую адаптацию сети в условиях частого изменения структуры сетевых связей. Построение протокола синхронизации включает предварительное выяснение условий синхронизации в выбранной модели сети и выбор самого типа синхронизации (например, multi-hop time synchronization). В числе предложенных протоколов временной синхронизации можно упомянуть: протокол синхронизации удаленных кластеров кластеризованной WSN (2010); децентрализованный протокол с гарантированным уровнем синхронизации (2010); протокол синхронизации многоканальных WSN (2011); протокол эффективной синхронизации WSN в условиях постепенного ухудшения работы.

Синхронизирующаяся WSN-сеть фазовых осцилляторов с импульсным взаимодействием была изучена в [6]. В работе проанализированы условия синхронизации много-осцилляторной системы и проведены подтверждающие вычислительные эксперименты.

Модель осцилляторной сети с импульсной осцилляторной динамикой и импульсным взаимодействием осцилляторов предложена в настоящей работе. Сетевой осциллятор построен на основе модели осциллятора предельного цикла, разработанной авторами ранее для задач обработки изображений. Обсуждаются правила сетевого связывания, которые можно было бы использовать для построения основанных на синхронизации протоколов самоорганизованной маршрутизации информации в беспроводных сенсорных сетях.

Модель импульсного осциллятора

Модель осциллятора предельного цикла, разработанная ранее для задач обработки изображений, записывается в виде ОДУ для комплексной переменной $u = u_1 + iu_2$ (см. [7, 8]):

$$du/dt = f(u), \quad (1)$$

где

$$f(u) = (\rho^2 + i\omega - |u - \rho(1+i)|^2)(u - \rho(1+i)) - \alpha T(\rho)[u - \rho(1+i)], \quad (2)$$

$$T(\rho) = 0.5 \left[\operatorname{th}(\sigma(\rho - \rho_*)) - \operatorname{th}(\sigma(\rho - \rho_*)) \right]. \quad (3)$$

Динамическая система (1)-(3) имеет предельный цикл – окружность радиуса ρ с центром в точке с координатами $u_{10} = u_{20} = \rho(1+i)$ на фазовой плоскости (u_1, u_2) . Параметрами динамической системы являются: ω – частота свободных колебаний осциллятора, ρ_* – параметр, определяющий порог для ρ , ниже которого предельный цикл бифурцирует в устойчивый фокус (бифуркация Хопфа), α – параметр, определяющий скорость затухания колебаний в фокусе, $\sigma \gg 1$ – постоянная. Параметр ρ является свободным параметром динамической системы. В задачах обработки изображений он определялся некоторой монотонной функцией яркости пикселя изображения, отвечающего сетевому осциллятору.

Модель импульсного осциллятора строится на основе системы (1)-(3) путем модуляции (во времени) радиуса предельного цикла ρ , определяющего амплитуду колебаний осциллятора. В качестве модулирующей функции используется периодическая функция

$$P(t; \Delta, T_0) = 0.5 \sum_{k=0}^K \left[\operatorname{th}(\sigma(t - kT_0)) - \operatorname{th}(\sigma(t - kT_0 - \Delta)) \right], \quad \sigma \gg 1, \quad (4)$$

где K – число импульсов, параметр T_0 определяет период следования импульсов, а Δ – их «ширину» во времени. Динамическую систему свободного импульсного осциллятора в переменных (x, y) , $u = x + iy$ можно записать в виде (для простоты сначала рассматриваем частный случай наличия всего двух импульсов)

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \left[z^2 - (x-z)^2 - (y-z)^2 \right] (x-z) - \omega(y-z) - \alpha T(z)(x-z), \\ \dot{y} &= \omega(x-z) + \left[z^2 - (x-z)^2 - (y-z)^2 \right] (y-z) - \alpha T(z)(y-z), \\ \dot{z} &= \rho_0 \dot{P}(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} T(z) &= 0.5 \left[\left| \operatorname{th}(\sigma(z-z_*)) \right| - \operatorname{th}(\sigma(z-z_*)) \right], \\ P(t; \Delta) &= P_0(t; \Delta) + P_0(t-T_0; \Delta), \quad P_0(t; \Delta) = 0.5 \left[\operatorname{th}(\sigma t) - \operatorname{th}(\sigma(t-\Delta)) \right], \\ \dot{P}(t; \Delta) &= \frac{\sigma}{2} \left[\operatorname{th}^2(\sigma(t-\Delta)) - \operatorname{th}^2(\sigma t) + \operatorname{th}^2(\sigma(t-\Delta-T_0)) - \operatorname{th}^2(\sigma(t-T_0)) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Осциллятор, управляемый динамической системой (5)-(6), генерирует два последовательных импульса почти синусоидальных колебаний частоты ω через временной интервал T_0 . Амплитуда колебаний почти постоянна (равна ρ_0), временная длительность каждого импульса равна Δ (см. рис. 2). В случае, когда функция $P(t)$, определяемая формулой (4), содержит K слагаемых, будет сгенерировано K одинаковых импульсов с периодичностью по времени T_0 .

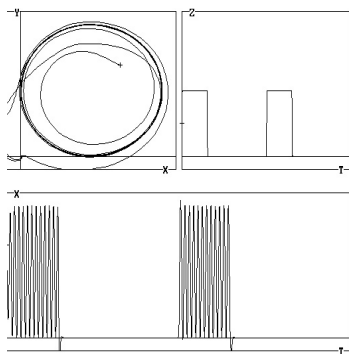


Рис. 2. Динамика свободного импульсного осциллятора.

Система двух взаимодействующих осцилляторов

Если взаимодействие осцилляторов сети построить линейно зависящим от состояния осцилляторов (так же как это ранее было сделано в осцилляторных сетях, предназначенных для обработки изображений),

взаимодействие также окажется импульсным. Чтобы изучить возможности такого сетевого взаимодействия, проанализируем сначала систему двух взаимодействующих импульсных осцилляторов. Систему ОДУ, управляющую динамикой осцилляторной сети из $M \cdot N$ осцилляторов, расположенных в узлах некоторой двумерной пространственной решетки, запишем в виде

$$\dot{\mathbf{u}}_{jm} = f(\mathbf{u}_{jm}) + \kappa \sum_{j'}^M \sum_{m'}^N W_{jmj'm'} \cdot (\mathbf{u}_{j'm'} - \mathbf{u}_{jm}), \quad j = 1, \dots, M, \quad m = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где в случае сети осцилляторов с импульсной динамикой \mathbf{u} – трехкомпонентный вектор состояния осциллятора. Определим векторы $\mathbf{u}_{1,2}$, отвечающие двум осцилляторам, переменными $\mathbf{u}_1 = (x_1, y_1, z_1)$ и $\mathbf{u}_2 = (x_2, y_2, z_2)$. Для системы двух взаимодействующих осцилляторов, каждый из которых «генерирует» два последовательных импульса (т.е. при $P^{(1,2)}(t) = P_0^{(1,2)}(t; \Delta_{1,2}) + P_0^{(1,2)}(t - T_{1,2}; \Delta_{1,2})$, где $P_0(t; \Delta)$ определено в (6)), динамическую систему (7) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= [z_1^2 - (x_1 - z_1)^2 - (y_1 - z_1)^2](x_1 - z_1) - \omega_1(y_1 - z_1) - \alpha T(z_1)(x_1 - z_1) + \kappa W(x_2 - x_1), \\ \dot{y}_1 &= \omega_1(x_1 - z_1) + [z_1^2 - (x_1 - z_1)^2 - (y_1 - z_1)^2](y_1 - z_1) - \alpha T(z_1)(y_1 - z_1) + \kappa W(y_2 - y_1), \\ \dot{z}_1 &= \rho_1 [\dot{P}_0(t; \Delta_1) + \dot{P}_0(t - T_1; \Delta_1)], \\ \dot{x}_2 &= [z_2^2 - (x_2 - z_2)^2 - (y_2 - z_2)^2](x_2 - z_2) - \omega_2(y_2 - z_2) - \alpha T(z_2)(x_2 - z_2) - \kappa W(x_2 - x_1), \\ \dot{y}_2 &= \omega_2(x_2 - z_2) + [z_2^2 - (x_2 - z_2)^2 - (y_2 - z_2)^2](y_2 - z_2) - \alpha T(z_2)(y_2 - z_2) - \kappa W(y_2 - y_1), \\ \dot{z}_2 &= \rho_2 [\dot{P}_0(t; \Delta_2) + \dot{P}_0(t - T_2; \Delta_2)], \end{aligned} \quad (8)$$

В системе (8) параметры $\omega_{1,2}$ определяют частоты свободных колебаний осцилляторов в импульсе, $\rho_{1,2}$ – максимальные значения амплитуд колебаний осцилляторов, $\Delta_{1,2}$ – длительности импульсов, $T_{1,2}$ – значения периодов импульсов, κ – параметр, характеризующий абсолютную величину силы осцилляторного взаимодействия. Функцию W , определяющую зависимость силы взаимодействия от амплитуд колебаний осцилляторов $z_{1,2}$, выберем в виде:

$$W = W(z_1, z_2) = g(z_1 z_2 - h_1), \quad g(x) = 1/(1 + e^{-\sigma_1 x}), \quad \sigma_1 \gg 1. \quad (9)$$

Функции $P_0(t; \Delta)$ и $\dot{P}_0(t; \Delta)$ вычисляются по формулам (6).

Динамика двух взаимодействующих осцилляторов с $\omega_1 \neq \omega_2$, $\rho_1 \neq \rho_2$, $\Delta_1 \neq \Delta_2$ и $T_1 \neq T_2$ представлена на рис. 3, где показано поведение проекций траектории динамической системы (8) на плоскости (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_1, x_2) , (y_1, y_2) , а также зависимость от времени переменных x_1 и x_2 . Если сила связи κ достаточно велика и длительности импульсов $\Delta_{1,2}$ осцилляторов перекрываются так, что число колебаний, приходящихся на время перекрытия, достаточно велико, синхронизация наступает. Об этом свидетельствует поведение проекций траектории динамической системы на плоскости (x_1, x_2) , (y_1, y_2) . Таким образом, можно ожидать, что даже при отсутствии точной идентичности осцилляторных импульсов (совпадения всех значений Δ_{jm} и T_{jm}) можно добиться хорошей синхронизуемости сети из импульсных осцилляторов посредством регулирования длительности и частоты импульсов и осцилляторных частот (для этого при выборе частот ω_{jm} и длительностей импульсов Δ_{jm} сетевых осцилляторов нужно принимать во внимание простые ограничения вида $\Delta_{\min} / \tau_{\max} \sim \Delta_{\min} \omega_{\max} \gg 1$).

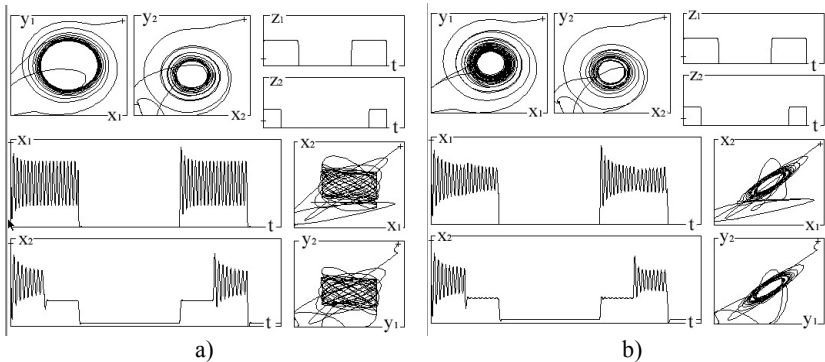


Рис. 3. Два взаимодействующих импульсных осциллятора:
 а) отсутствие синхронизации при $\kappa = 0$; б) синхронизация при $\kappa = 1$.

Возможности импульсных осцилляторных сетей, интересные с точки зрения задач для WSN

При использовании сетей WSN в различных задачах мониторинга как правило необходимо работать с большими объемами сенсорной информации. Поэтому такие свойства как адаптивность, самонастройка и самоорганизованное срабатывание являются весьма желательными, а иногда и необходимыми свойствами WSN. Кроме того, почти всегда требуется обеспечить энергетическую эффективность и надежность работы сети. Поэтому простейшие виды временной синхронизации уже неоднократно использовались для увеличения эффективности работы сетей WSN. Привлечение более гибких видов управляемой синхронизации в качестве «рабочего инструмента» может оказаться полезным при решении многих прикладных задач с использованием различных моделей WSN.

Авторами был развит осцилляторно-сетевой подход к задачам обработки изображений, основанный на управляемой синхронизации осцилляторной сети из осцилляторов предельного цикла. Амплитуды колебаний осцилляторов выбирались зависящими от яркости пикселей изображения (в виде монотонной функции яркости). Построенные правила сетевого связывания, зависящие от амплитуд колебаний осцилляторов пороговым образом, обеспечивали самоорганизованное разложение сети на совокупность внутренне синхронизованных, но взаимно десинхронизованных кластеров, соответствующее совокупности яркостных фрагментов изображения [8].

Опыт построения основанного на синхронизации осцилляторно-сетевого подхода можно достаточно легко распространить на определенный класс задач для сетей WSN. Работа WSN часто предполагает предварительную кластеризацию сети (различного типа, в зависимости от решаемой сетью задачи) и выбор «лидеров» кластеров. Один из способов кластеризации может быть легко осуществлен посредством самоорганизованной синхронизации осцилляторной сети, соответствующей сети WSN. Для этого достаточно задать непрерывную зависимость амплитуды колебаний импульсного осциллятора, соответствующего узлу WSN, от некоторого параметра, характеризующего совокупность данных, обрабатываемых сетью WSN. Тогда включение зависимости типа (9) в правило сетевого связывания может обеспечить автоматическую самоорганизованную кластеризацию WSN-сети. Варианты такого подхода кажутся перспективными для задач

обработки информации в сетях WSN (в частности, для построения основанных на синхронизации протоколов маршрутизации информации).

Заключительные замечания

В работе решены следующие задачи:

- построена простая модель импульсного осциллятора на основе модуляции амплитуды колебаний осциллятора предельного цикла (динамическая система (5)-(6));
- для импульсной осцилляторной сети предложена первая версия правила сетевого связывания, зависящего от амплитуд колебаний взаимодействующей осцилляторной пары (выражение (8));
- проведены численные эксперименты по выяснению условий синхронизуемости пары осцилляторов с импульсной динамикой.

Достоинство построенной динамики импульсного осциллятора состоит в возможности простого параметрического управления такими характеристиками динамики как частота колебаний в импульсе, амплитуда колебаний, длительность импульса, периодичность импульсов. Достоинство первой версии сетевого связывания – в обеспечении легкой синхронизуемости взаимодействующей осцилляторной пары.

Первые результаты, полученные в работе, можно рассматривать как начальный шаг к возможному использованию модели импульсной осцилляторной сети для задач обработки информации в беспроводных сенсорных сетях [9-12]. Следующий шаг должен состоять в выборе простой задачи обработки информации, осуществимой пространственно распределенной WSN, для решения которой был бы пригоден осцилляторно-сетевой подход, основанный на управляемой синхронизации.

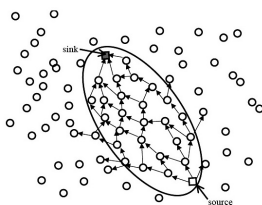


Рис. 4. Пример маршрутизации информации в сети WSN.

Список литературы

1. Wireless Sensor Network, Campbell Scientific, Inc., Copyright 2010-2011.
2. Berger R. Introduction to Wireless Sensor Networks // 2009 NI Technical Symposium. 2009.
3. Hill J.L. System Architecture for Wireless Sensor Networks // Ph.D. thesis, University of California, Berkeley. 2003.
5. Serpedin E., Chaudhan Q.M. Synchronization in Wireless Sensor Networks: Parameter Estimation, Performance Benchmarks, and Protocols. Cambridge Univ. Press. 2009. 244 pp.
6. Au Z. et al. Linear pulsed-coupled oscillators model: A new approach for time synchronization in wireless sensor networks // Wireless Sensor Network. 2010. Vol. 2. P. 108-114.
7. Гричук Е.С., Кузьмина М.Г., Манькин Э.А. Селективная сегментация реальных изображений осцилляторно-сетевым методом // Нейроинформатика-2007. Сборник научных трудов. Ч. 3. М.: МИФИ. 2007. С. 235-244.
8. Kuzmina M., Manykin E., Grichuk E. Oscillatory Neural Networks in Problems of Parallel Information Processing. Berlin/Boston: Walter De Gruyter. 2013. 172 pp.
9. Hadjila M., Guyennet H., Feham M. A chain-based routing protocol to maximize the lifetime of Wireless Sensor Networks // Wireless Sensor Network. 2013. Vol. 5. P. 116-120.
10. Guioufi A., Nasri N., Farah A.B., Kachouri A. Clustering algorithm for small-scale Wireless Sensor Networks // Wireless Sensor Network. 2013. Vol. 5. P. 67-75.
11. Hamzi A., Koudil M., Jamont J.P., Occello M., Multi-agent architecture for the design of WSN application // Wireless Sensor Network. 2013. Vol. 5. P. 14-25.
12. Lee H., Jang M., Chang J.-W. A new energy-efficient cluster-based routing protocol using a representative part in Wireless Sensor Networks // Int. J. Distributed Sensor Networks. 2014. Vol. 2014. Article ID 527928.

E.S. GRICHUK¹, M.G. KUZMINA², E.A. MANYKIN^{1,3}

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

²Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow

³National Research Nuclear University «MEPhI», Moscow

mg.kuzmina@gmail.com

A MODEL OF PULSED OSCILLATOR NETWORK AND PERSPECTIVES OF ITS APPLICATION TO PROBLEMS OF INFORMATION ROUTING IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Development of performance principles of wireless sensor networks (WSN) and information routing in the networks, providing a capability of dynamical adaptation of network interconnection architecture and automatic style of network work, is currently of special interest. For the design of WSN with synchronization-based network performance models of pulsed oscillator networks look like as the most adequate ones.

An oscillatory network model with pulsed oscillator dynamics and pulsed oscillator interaction is suggested in the paper. Design of appropriate network connectivity rules, capable to guarantee controllable network synchronization, is discussed.

Keywords: pulsed oscillator networks, synchronization, wireless sensor networks, information routing.