

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ СБОРА ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ОДНОЙ МОДЕЛИ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ С ТОПОЛОГИЕЙ «ПРАВИЛЬНАЯ РЕШЕТКА»

Е. А. Бакин^а, канд. техн. наук, доцент

Г. С. Евсеев^а, канд. техн. наук, доцент

К. Н. Смирнов^а, ассистент

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: за последние годы в области распределенных измерительных систем появился новый подход к организации сбора информации, известный как беспроводные сенсорные сети. Этот подход получения данных является перспективным и многообещающим, однако для его эффективного прикладного использования требуется разработка особых схем передачи информационных сообщений, исключающих возможные коллизии. **Цель исследования:** разработка алгоритмов сбора данных в сенсорных сетях с топологией «правильная решетка», при которых минимизируется время получения информации о состоянии сети. **Результаты:** для беспроводных сенсорных сетей с логической структурой «все к одному» и топологиями «треугольная решетка», «квадратная решетка» и «гексагональная решетка» предложены алгоритмы составления оптимального бесконфликтного расписания передачи информационных сообщений, позволяющие минимизировать время сбора данных с устройств сети (N слотов для сети из N сенсоров). Полученные алгоритмы обладают полиномиальной сложностью и могут быть реализованы на современной элементной базе. **Практическая значимость:** результаты представленного исследования могут быть использованы разработчиками распределенных систем сбора данных на базе беспроводных сенсорных сетей при разработке сетевых протоколов передачи информации.

Ключевые слова — сенсорная сеть, сбор данных, коллизии, метод расписания.

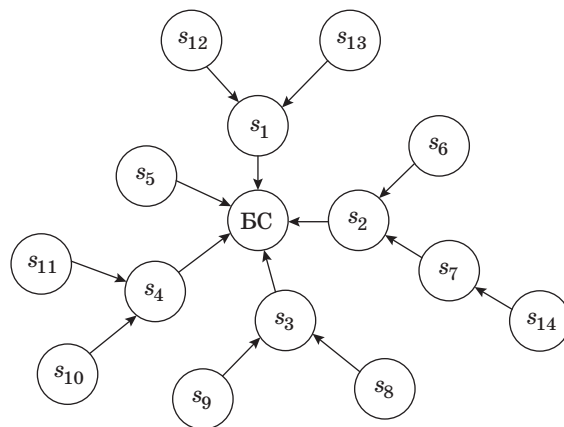
Введение

Миниатюризация элементной базы и прогресс технологий связи создали предпосылки для появления особого типа беспроводных систем передачи информации — сенсорных сетей. Типичная сенсорная сеть состоит из множества идентичных элементов, называемых сенсорами (другое название — интеллектуальный датчик) и базовой станции (БС). Назначением сенсора является контроль состояния объекта путем измерения отдельных параметров окружающей среды (например, температуры, влажности и т. д.), первичная обработка результатов измерения, а также передача соответствующих сообщений посредством беспроводной связи. Сообщения, передаваемые сенсорами, собираются БС [1]. Таким образом, логической структурой сенсорной сети является структура «все-к-одному». Будем обозначать множество элементов сети как $S = \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$, где N — число сенсоров в сети.

Каждый сенсор является как источником сообщений, так и их ретранслятором. Таким образом, сенсорная сеть может охватывать большие территории, протяженность которых намного превышает радиус действия передатчика одного сенсора. При этом сообщения от дальних сенсоров поступают на БС по цепочке (рис. 1).

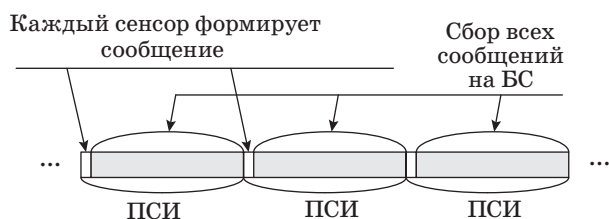
В данной работе рассматриваются сети с циклическим сбором данных. Время работы таких

сетей можно условно поделить на периоды сбора информации (ПСИ). В начале каждого ПСИ каждый сенсор формирует по сообщению, отражающему состояние контролируемого им объекта. За оставшуюся часть ПСИ сформированные сенсорами сообщения поступают на БС (рис. 2). Пусть l_i — длина маршрута, соединяющего сенсор s_i и БС. Тогда в ходе ПСИ должно осуществиться ровно $L = \sum_{i=1}^N l_i$ успешных передач. Обозначим это множество передач как P ($|P| = L$).



■ Рис. 1. Пример сенсорной сети

■ Fig. 1. Wireless sensor network



■ **Рис. 2.** Период сбора информации
 ■ **Fig. 2.** Data collection period

Оперативность сети определяется длительностью ПСИ T . Чем меньше длительность ПСИ, тем чаще обновляется на БС информация о состоянии контролируемых объектов, а значит, более высокочастотные параметры можно контролировать. Существует большое количество приложений, в которых оперативность является ключевым параметром сети [2].

Модель коллизий и метод расписания

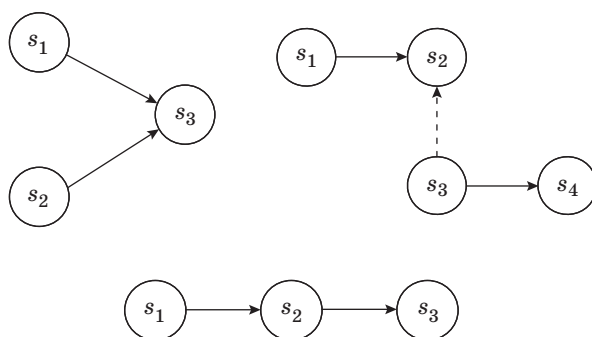
Сбор сообщений осложняется наличием помех, создаваемых одними передающими сенсорами другим. При этом одно или несколько сообщений могут оказаться искаженными, а передаваемая информация теряется. Такая ситуация называется *коллизией*, или *конфликтом*. В настоящей статье используется распространенная модель коллизий, рассмотренная, например, в работах [3, 4] и др.

В этих работах сеть описывается графом слышимости, узлы которого соответствуют сенсорам. Если пара сенсоров s_i и s_j находится друг от друга на расстоянии $d_{i,j}$ меньше, чем дальность действия передатчика r , то пара соответствующих им узлов в графе соединяется ребром $e_{i,j}$. Обозначим граф слышимости как $G = (S, E)$, где S — множество сенсоров сети ($|S| = N$); E — множество ребер сети ($E \subseteq S \times S$, $e_{i,j} \in E$, если $d_{i,j} < r_{\text{прд}}$). Обозначим множество соседей сенсора s_i в графе G как C_i . В дальнейшем будем считать, что сообщения доставляются на БС по кратчайшему маршруту в графе G .

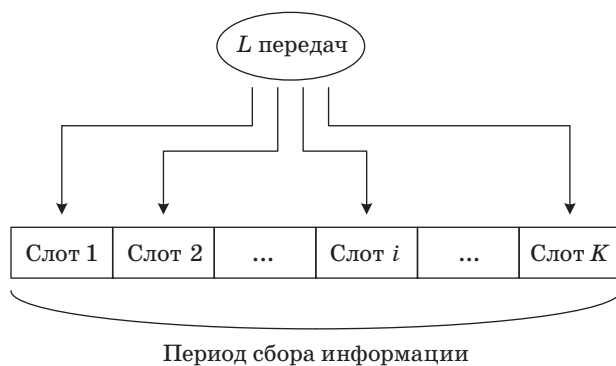
Для данной модели существует три типа коллизий (рис. 3):

- 1) некоторому сенсору пытаются одновременно передать сообщения два и более сенсоров;
- 2) сенсор, принимающий сообщение, находится в радиусе действия одного и более передатчиков других сенсоров, передающих сообщение не ему;
- 3) сенсору, осуществляющему передачу сообщения, пытается передать сообщение другой сенсор.

Достоинством данной модели является простота описания и возможность проведения теоре-



■ **Рис. 3.** Три вида коллизий
 ■ **Fig. 3.** Types of collision



■ **Рис. 4.** Метод расписания
 ■ **Fig. 4.** Scheduling approach

тического анализа, обобщаемого на случай более сложных моделей сети.

Существует два принципиально разных подхода борьбы с коллизиями. Первый подход получил название *случайный множественный доступ* [5], в то время как второй — *метод расписания* [6, 7]. В данной статье рассматривается метод расписания. При работе по расписанию ПСИ делится на *слоты* — отрезки времени, равные длительности передачи одного сообщения (считается, что все сообщения, формируемые сенсорами, имеют равную длительность). В каждом слоте сенсор может либо передавать сообщение, либо принимать сообщение, либо находиться в спящем режиме. Каждой из L передач назначается определенный слот. Назначение осуществляется таким образом, чтобы в i -м слоте ($i = 1, 2, \dots, K$) множество осуществляемых в нем передач p_i было бесконфликтным. Пусть длина расписания —

$$K \text{ слотов. Тогда } P = \bigcup_{i=1}^K p_i \text{ (рис. 4).}$$

Понятно, что может существовать множество бесконфликтных расписаний. Поиск конкретного расписания осуществляется на основе выбранного критерия.

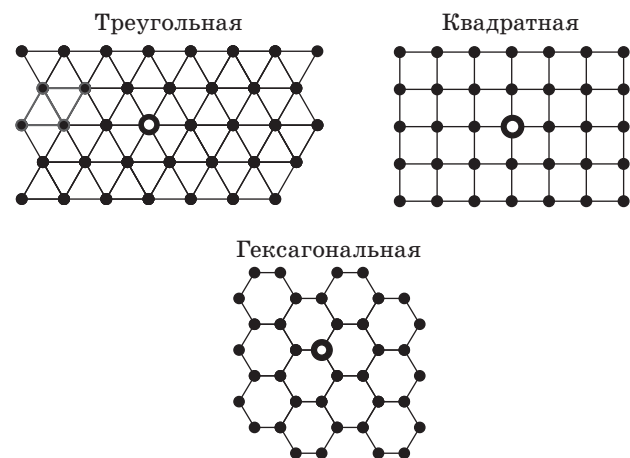
В данной работе основным критерием является минимизация величины K , длины расписания (или, что то же самое, периода сбора информации). Знание минимально возможной длительности ПСИ позволяет оценить способность сети выполнять возложенные на нее функции еще на этапе проектирования. Алгоритмом составления оптимального расписания будем называть алгоритм, позволяющий составить бесконфликтное расписание передач с минимально возможным числом слотов K . Очевидно, что $K \geq N$. Это следует из того, что за один слот БС не может принимать более одного сообщения (иначе возникнет коллизия).

Составление расписания для сетей с топологией «правильная решетка»

Рассмотрим важный частный случай топологии сети — сеть типа «правильная двумерная решетка». Сети с данной топологией часто встречаются, например, в сельском хозяйстве [8]. Граф такой сети является планарным. Все ячейки решетки являются правильными многоугольниками с равным числом вершин. Узлами решетки являются сенсоры. Рассмотрим три возможных типа подобных решеток (рис. 5): решетки, ячейки которых являются 1) треугольниками (треугольные решетки), 2) четырехугольниками (квадратные решетки) и 3) шестиугольниками (гексагональные решетки).

Теорема. Для сети с топологией «правильная двумерная решетка» можно составить расписание длины N слотов.

Для доказательства теоремы введем некоторые вспомогательные определения и сформули-



■ **Рис. 5.** Треугольная, квадратная и гексагональная решетки: черные точки — сенсоры; черно-белые точки — БС

■ **Fig. 5.** Triangular, square and hexagonal lattice: black points — sensors; black-white point — base station

руем три алгоритма составления оптимального расписания для каждого из типов решетки.

Определение 1. Сенсор называется пассивным, если ни он, ни сенсоры, использующие его в качестве ретранслятора, не имеют сообщений для передачи. Иначе сенсор называется активным.

Определение 2. Активным графом называется подграф сети, образованный активными сенсорами и БС.

Определение 3. Псевдона начальным состоянием сенсорной сети называется такое состояние сети, когда каждый сенсор активного графа содержит не менее одного сообщения. Фактически это означает, что, если сеть находится в псевдона начальном состоянии, то сенсоры, не содержащие ни одного сообщения, можно исключить из рассмотрения, так как они в течение данного периода сбора не участвуют в работе сети ни как источники сообщений, ни как ретрансляторы.

Треугольная решетка

Разделим сеть при помощи шести лучей на шесть подсетей и пронумеруем подсети, как показано на рис. 6. Сенсоры, расположенные на луче, отнесем к подсети, расположенной в направлении против часовой стрелки относительно луча. В каждой из подсетей содержится $N/6$ сенсоров.

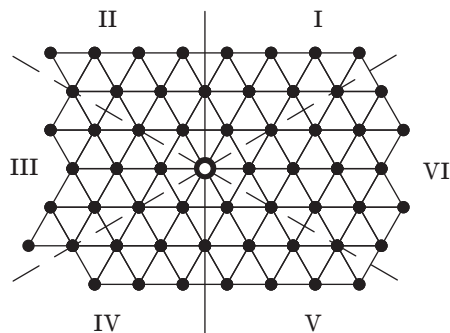
Опишем алгоритм составления оптимального расписания для сети с топологией типа симметричная треугольная решетка.

Алгоритм 1. Процесс составления расписания по алгоритму 1 состоит из последовательности итераций. Во время каждой итерации составляется расписание на шесть слотов. Причем в первых трех слотах итерации участвуют сенсоры, принадлежащие подсетям с нечетными номерами, в последних трех — подсетям с четными номерами.

Опишем действия, проводимые в ходе итерации.

1. Выбрать по одному наиболее удаленному сенсору в каждой из подсетей.

2. Проложить маршруты, соединяющие БС и выбранный сенсор.



■ **Рис. 6.** Разделение сети на шесть подсетей

■ **Fig. 6.** Division of a network into six subnetworks

3. Пронумеровать сенсоры на маршрутах, соединяющих БС и выбранные сенсоры, в порядке удаления от БС.

4. К подмножеству $M_{i,s}$ ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, s = 0, 1, 2$) отнесем сенсоры маршрутов, принадлежащие i -й подсети и находящиеся на расстоянии $s \bmod 3$ от БС.

5. В первом слоте передают сообщения сенсоры, принадлежащие подмножествам $M_{1,1}, M_{3,2}, M_{5,0}$; во втором — $M_{1,2}, M_{3,0}, M_{5,1}$; в третьем — $M_{1,0}, M_{3,1}, M_{5,2}$; в четвертом — $M_{2,1}, M_{4,2}, M_{6,0}$; в пятом — $M_{2,2}, M_{4,0}, M_{6,1}$; в шестом — $M_{2,0}, M_{4,1}, M_{6,2}$.

Замечание. Маршрут, соединяющий БС и выбранный сенсор, должен быть проложен через сенсоры, принадлежащие той же подсети, что и выбранный сенсор.

Очевидно, что в каждом из слотов множество осуществляемых передач является бесконфликтным (это следует из того, что в каждом слоте у каждого принимающего сообщение сенсора есть только один передающий сообщение сосед). В каждом слоте итерации на БС поступает по одному сообщению (по одному из каждой участвующей подсети). Каждый сенсор на маршрутах передает одно сообщение и принимает одно сообщение, следовательно, в конце итерации сеть переходит в псевдоначальное состояние.

Тогда для сбора всех сообщений из сети потребуется $N/6$ итераций. Значит, полная длительность периода сбора информации будет равна $6N/6 = N$ слотов. То есть алгоритм 1 составляет оптимальное расписание для треугольной решетки.

Квадратная решетка

Разделим сеть при помощи четырех лучей на четыре подсети (рис. 7, разделяющие лучи обозначены пунктирными линиями). Сенсоры, расположенные на луче, отнесем к подсети, расположенной в направлении против часовой стрелки относительно луча. В каждой из подсетей содержится $N/4$ сенсоров.

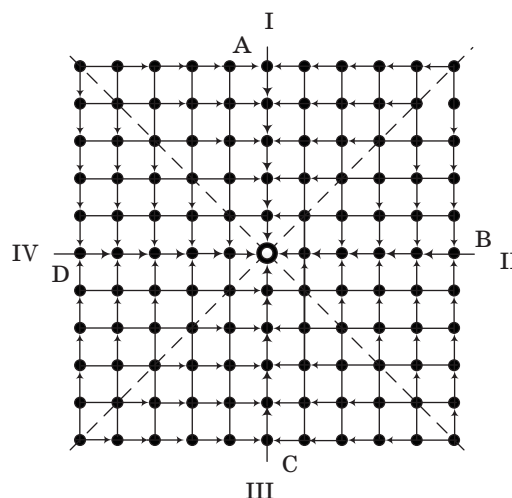
Алгоритм 2. Процесс составления расписания по алгоритму 2 состоит из последовательности итераций. Во время каждой итерации составляется расписание на четыре слота, причем в каждом из слотов передачи осуществляются в трех подсетях из четырех.

Опишем действия, осуществляемые в ходе итерации.

1. Выбрать по одному наиболее удаленному сенсору в каждой из четырех подсетей.

2. Пронумеровать сенсоры на маршрутах, соединяющих БС и выбранные сенсоры, в порядке удаления от БС.

3. К подмножеству $M_{i,s}$ ($i = 1, 2, 3, 4, s = 0, 1, 2$) отнесем сенсоры маршрутов, принадлежащие



■ **Рис. 7.** Разделение сети на четыре подсети
 ■ **Fig. 7.** Division of a network into four subnetworks

i -й подсети и находящиеся на расстоянии $s \bmod 3$ от БС.

4. В первый слот итерации передают сообщения сенсоры, принадлежащие подмножествам $M_{1,1}, M_{2,2}, M_{3,0}$; во второй — $M_{2,1}, M_{3,2}, M_{4,0}$; в третий — $M_{3,1}, M_{4,2}, M_{1,0}$; в четвертый — $M_{4,1}, M_{1,2}, M_{2,0}$.

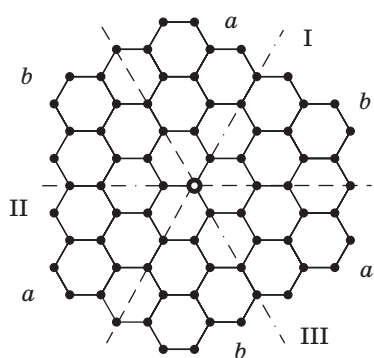
Замечание. Для того чтобы множество передач, осуществляемых в каждом слоте, было бесконфликтным, достаточно выполнения следующего правила составления маршрутов. Кратчайшие маршруты должны быть проложены через цепочки сенсоров, лежащих на лучах A, B, C и D (см. рис. 7, стрелками обозначены направления в маршрутах передачи сообщений). Отметим, что при таком подходе сенсоры, расположенные на разделяющих лучах, являются только источниками сообщений, но не участвуют в ретрансляции.

В каждый слот итерации на БС поступает по одному сообщению (по одному из каждой участвующей подсети). Каждый сенсор на маршруте передает одно сообщение и принимает одно сообщение, следовательно, в конце итерации сеть переходит в псевдоначальное состояние.

Тогда для сбора всех сообщений из сети потребуется $N/4$ итераций. Значит, полная длительность периода сбора информации будет равна $4N/4 = N$ слотов. То есть алгоритм 2 составляет оптимальное расписание для квадратной решетки.

Гексагональная решетка

Разделим сеть при помощи трех лучей на три подсети (рис. 8, разделяющие лучи обозначены пунктирными линиями). Сенсоры, расположенные на луче, отнесем к подсети, расположенной



■ **Рис. 8.** Разделение сети на три подсети
 ■ **Fig. 8.** Division of a network into three subnetworks

в направлении против часовой стрелки относительно луча. В каждой из подсетей содержится $N/3$ сенсоров. Каждую из подсетей в свою очередь разделим на два сектора — a и b (границы раздела секторов изображены на рисунке штихпунктирными линиями).

Опишем алгоритм составления оптимального расписания для сети с этой топологией.

Алгоритм 3. Процесс составления расписания по алгоритму 3 состоит из последовательности итераций. Во время каждой итерации составляется расписание на три слота.

Опишем выполнение итерации.

1. Выбрать по одному наиболее удаленному сенсору из сектора a в каждой из подсетей, если итерация четная, и по одному наиболее удаленному сенсору из сектора b в каждой из подсетей, если итерация нечетная.

2. Пронумеровать сенсоры на маршрутах, соединяющих БС и выбранные сенсоры, в порядке удаления от БС.

3. К подмножеству $M_{i,s}$ ($i = 1, 2, 3, s = 0, 1, 2$) отнесем сенсоры, принадлежащие i -й подсети и находящиеся на расстоянии $s \bmod 3$ от БС.

4. В первом слоте итерации передают сообщения сенсоры, принадлежащие подмножествам

$M_{0,1}, M_{1,2}, M_{2,3}$; во втором — $M_{2,1}, M_{0,2}, M_{1,3}$; в третьем — $M_{1,1}, M_{2,2}, M_{0,3}$.

Замечание. Маршрут, соединяющий БС и выбранный сенсор, должен быть проложен через сенсоры, принадлежащие той же подсети и тому же сектору, что и выбранный сенсор.

В каждом слоте итерации на БС поступает по одному сообщению (по одному из каждой подсети). Каждый сенсор на маршруте передает одно сообщение и принимает одно сообщение, следовательно, в конце итерации сеть переходит в псевдоначальное состояние.

Тогда для сбора всех сообщений из сети потребуется $N/3$ итераций. Следовательно, полная длительность цикла опроса равна $3N/3 = N$ слотов. Таким образом, алгоритм 3 составляет оптимальное расписание для гексагональной решетки.

Заключение

В данной работе был рассмотрен класс сенсорных сетей с топологией «правильная двумерная решетка». Для каждого типа сетей, принадлежащего этому классу, сформулирован алгоритм составления оптимального бесконфликтного расписания передач. Выяснилось, что для сети, содержащей N сенсоров, возможно организовать период сбора информации длительностью N слотов.

Полученные результаты могут быть использованы при оптимизации сенсорных сетей, а также при разработке и анализе протоколов их функционирования. Особенно актуальными предложенные подходы являются в области сетей со сбором электромагнитной энергии [9, 10]. Дальнейшим развитием работы может стать анализ работы подобных сетей при случайном механизме генерации пакетов на узлах [11].

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-37-00197 мол_а.

Литература

1. **Sohraby K., Minoli D., Znati T.** Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications. — John Wiley & Sons, 2007. — 328 p.
2. **Rashid B., Rehmani M. H.** Applications of Wireless Sensor Networks for Urban Areas: A Survey // Journal of Network and Computer Applications. 2016. Vol. 60. P. 192–219. doi:10.1016/j.jnca.2015.09.008
3. **Chlamtac I., Kutten S.** Tree-based Broadcasting in Multihop Radio Networks // IEEE Transactions on Computers. 1987. N 10. P. 1209–1223. doi:10.1109/TC.1987.1676861

4. **Zhang Y., Gandham S., Huang Q.** Distributed Minimal Time Convergecast Scheduling for Small or Sparse Data Sources // 28th IEEE Intern. Real-Time Systems Symp. RTSS 2007. IEEE, 2007. P. 301–310. doi:10.1109/RTSS.2007.13
5. **Марковский С. Г., Тюрликов А. М.** Использование идентификаторов абонентов для резервирования канала множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2. С. 28–35.
6. **Renner C., Turau V., Weyer C.** Performance of Energy-Efficient TDMA Schemes in Data-Gathering Scenarios with Periodic Sources // Networked Sensing Systems (INSS): Seventh Intern. Conf. IEEE, 2010. P. 187–194. doi:10.1109/INSS.2010.5573141

7. Doudou M., et al. Synchronous Contention-based MAC Protocols for Delay-Sensitive Wireless Sensor Networks: A Review and Taxonomy // *Journal of Network and Computer Applications*. 2014. Vol. 38. P. 172–184. doi:10.1016/j.jnca.2013.03.012
8. Yu X., et al. A Survey on Wireless Sensor Network Infrastructure for Agriculture // *Computer Standards & Interfaces*. 2013. Vol. 35. N 1. P. 59–64. doi:10.1016/j.csi.2012.05.001
9. Bakin E. A., Turlikov A. M., Ivanov I. S., Shelest M. N. Analysis of Energy Harvesting Efficiency for Power Supply of WBAN Nodes in Heterogeneous Scenarios // *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, 2016: 8th Intern. Congress. IEEE, 2016. P. 111–118. doi:10.1109/ICUMT.2016.7765342
10. Monir Rabby M. K., et al. A Scheduling Scheme for Efficient Wireless Charging of Sensor Nodes in WBAN // *Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies (CHASE)*, 2017: IEEE/ACM Intern. Conf. IEEE, 2017. P. 31–36. doi:10.1109/CHASE.2017.56
11. Bakin E. A., Evseev G. S. Scheduling Algorithms for Tree-Based Convergecast Networks with a Random Number of Messages // *Problems of Redundancy in Information and Control Systems (REDUNDANCY)*, 2014: XIV Intern. Symp. IEEE, 2014. P. 19–22. doi:10.1109/RED.2014.7016696

UDC 004.75

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.107

Algorithms of Convergecast Schedule Calculation for a Sensor Network Model with Regular Grid TopologyBakin E. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, jenyb@mail.ruEvseev G. S.^a, PhD, Tech., Associate Professor, egs@vu.spb.ruSmirnov K. N.^a, Assistant Professor, kossmir@gmail.com^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: In recent years, a new approach of information gathering has appeared in the area of distributed measuring systems, known as wireless sensor networks. This technique is very promising, but its efficient use in real applications requires developing special schemes of information message transmission which would prevent possible collisions. **Purpose:** Developing algorithms for wireless sensor networks with a 2D lattice topologies which would provide the shortest time of data gathering. **Results:** For wireless sensor networks with «all-to-one» logical structure and the topology of a triangular, rectangular or hexagonal grid, a group of collision-free time-optimal algorithms have been proposed (N slots for a network containing N sensors). The obtained algorithms have polynomial complexity and can be implemented in modern hardware. **Practical relevance:** The results of the research can be used by the developers of distributed data gathering systems based on wireless sensor networks for the development of new communication protocols.

Keywords — Sensor Network, Data Gathering, Collisions, Convergecast Scheduling.

References

1. Sohraby K., Minoli D., Znati T. *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. John Wiley & Sons, 2007. 328 p.
2. Rashid B., Rehmani M. H. Applications of Wireless Sensor Networks for Urban Areas: A Survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, vol. 60, pp. 192–219. doi:10.1016/j.jnca.2015.09.008
3. Chlamtac I., Kutten S. Tree-based Broadcasting in Multi-hop Radio Networks. *IEEE Transactions on Computers*, 1987, no. 10, pp. 1209–1223. doi:10.1109/TC.1987.1676861
4. Zhang Y., Gandham S., Huang Q. Distributed Minimal Time Convergecast Scheduling for Small or Sparse Data Sources. *28th IEEE Intern. Real-Time Systems Symp.*, IEEE, 2007, pp. 301–310. doi:10.1109/RTSS.2007.13
5. Markovskij S. G., Tyurlikov A. M. Using Subscriber Identifiers for Multiple Access Channel Reservation. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2008, no. 2, pp. 28–35 (In Russian).
6. Renner C., Turau V., Weyer C. Performance of Energy-Efficient TDMA Schemes in Data-Gathering Scenarios with Periodic Sources. *Seventh Intern. Conf. "Networked Sensing Systems" (INSS)*, IEEE, 2010, pp. 187–194. doi:10.1109/INSS.2010.5573141
7. Doudou M., et al. Synchronous Contention-based MAC Protocols for Delay-Sensitive Wireless Sensor Networks: A Review and Taxonomy. *Journal of Network and Computer Applications*, 2014, vol. 38, pp. 172–184. doi:10.1016/j.jnca.2013.03.012
8. Yu X., et al. A Survey on Wireless Sensor Network Infrastructure for Agriculture. *Computer Standards & Interfaces*, 2013, vol. 35, no. 1, pp. 59–64. doi:10.1016/j.csi.2012.05.001
9. Bakin E. A., Turlikov A. M., Ivanov I. S., Shelest M. N. Analysis of Energy Harvesting Efficiency for Power Supply of WBAN Nodes in Heterogeneous Scenarios. *8th Intern. Congress "Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops" (ICUMT)*, IEEE, 2016, pp. 111–118. doi:10.1109/ICUMT.2016.7765342
10. Monir Rabby M. K., et al. A Scheduling Scheme for Efficient Wireless Charging of Sensor Nodes in WBAN. *IEEE/ACM Intern. Conf. "Connected Health: Applications, Systems and Engineering Technologies" (CHASE)*, IEEE, 2017, pp. 31–36. doi:10.1109/CHASE.2017.56
11. Bakin E. A., Evseev G. S. Scheduling Algorithms for Tree-Based Convergecast Networks with a Random Number of Messages. *XIV Intern. Symp. "Problems of Redundancy in Information and Control Systems" (REDUNDANCY)*, IEEE, 2014, pp. 19–22. doi:10.1109/RED.2014.7016696