

УДК 621.396.4

Коваленко И. Г., к.т.н.

(Государственный университет телекоммуникаций, г. Киев. +380 (67) 501 09 13. kig777@ukr.net)

МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С ИЗБЫТОЧНЫМ КОЛИЧЕСТВОМ УЗЛОВ

Коваленко И. Г. Методи збільшення тривалості функціонування безпроводних сенсорних мереж з надлишковою кількістю вузлів. Безпроводні сенсорні мережі складаються з невеликих радіоелектронних вузлів з інтегрованими функціями моніторингу зовнішнього простору, обробки і передачі даних. При випадковому розгортанні мереж в районі моніторингу (шляхом розсіювання з літальних апаратів) для забезпечення якісного покриття датчиками площі району доцільно використовувати надмірну кількість вузлів. У статті запропоновані методи зменшення витрат енергоресурсів вузлів і алгоритм їх застосування для збільшення тривалості життя безпроводних сенсорних мереж з надмірною кількістю вузлів. На основі імітаційного моделювання дана оцінка ефективності розроблених методів управління сенсорних мереж. В порівнянні з аналогічними методами цього класу час життя мережі може бути збільшений на 15-20%.

Ключові слова: безпроводна сенсорна мережа, вузли мережі, енергетичний ресурс, надмірність вузлів, час життя мережі, імітаційне моделювання

Коваленко И. Г. Методы увеличения продолжительности функционирования беспроводных сенсорных сетей с избыточным количеством узлов. Беспроводные сенсорные сети состоят из небольших радиоэлектронных узлов с интегрированными функциями мониторинга внешнего пространства, обработки и передачи данных. При случайной установке сетей в районе мониторинга (рассеиванием с летательных аппаратов) для обеспечения качественного покрытия датчиками площади района целесообразно использовать избыточное количество узлов. В статье предлагаются методы уменьшения потребления энергоресурса узлов и алгоритм их применения для увеличения времени жизни беспроводных сенсорных сетей с избыточным количеством узлов. На основе имитационного моделирования дана оценка эффективности разработанных методов управления сенсорных сетей. По сравнению с аналогичными методами данного класса время жизни сети может быть увеличено на 15-20%.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, узлы сети, энергетический ресурс, избыточность узлов, время жизни сети, имитационное моделирование

Kovalenko I. G. Methods for increasing the lifetime of wireless sensor networks with excessive number of nodes. Wireless sensor networks consist of small electronic nodes with integrated functions of monitoring the external space, data processing and transmission. If you accidentally install networks in the monitoring area (scattering from aircraft) to provide quality coverage sensors region area is advisable to use an excess number of nodes. The article r proposes the methods of reducing energy consumption of nodes and algorithms for their application to increase the lifetime of wireless sensor networks with excessive number of nodes. On the basis of simulation it was evaluated the effectiveness of the developed methods of sensor networks management. In comparison with the similar methods of this class the network lifetime may be increased by 15-20%.

Keywords: wireless sensor network, network nodes, energy resource, redundancy nodes, the network lifetime, simulation

1. Постановка задачи. Современные достижения в радиоэлектронике сделали возможным создание малогабаритных, дешевых и многофункциональных беспроводных устройств (узлов), состоящих из совокупности датчиков мониторинга, микропроцессора, батареи питания и приемопередатчика. Данные узлы способны передавать данные мониторинга по радиоканалам, обеспечивать сетевое взаимодействие между множеством аналогичных узлов и создавать беспроводные сенсорные сети (БСС).

Основными свойствами БСС являются [1]: *низкая* стоимость и малые габариты узла; *масштабируемость*, быстрое развертывание и инициализация; *автоматическая* настройка и восстановление; *способность* узлов осуществлять первичную обработку данных мониторинга; *низкая* стоимость разворачивания и технического обслуживания;

минимальные ограничения по размещению беспроводных устройств; *отказоустойчивость* сети при нарушении отдельных соединений между узлами или выходе некоторых узлов из строя; *ограниченные* коммуникационные и энергетические ресурсы узлов.

Данные особенности БСС могут быть эффективно использованы для решения различных прикладных задач, связанных с распределенным сбором, анализом и передачей информации, например [2]: *автоматизация* процессов жизнеобеспечения (мониторинг микроклимата, присутствия людей и т.д.); *промышленная* автоматизация (дистанционный контроль и диагностика промышленного оборудования и т.д.); *оборона* и безопасность (контроль перемещения людей и техники, средства оперативной связи и разведки, удаленное наблюдение, помощь в проведении спасательных операций, охранно-пожарная сигнализация и др.); *мониторинг* окружающей среды (природных процессов, загрязнений и т.д.); *здравоохранение* (мониторинг состояния пациентов и т.д.).

Некоторые сферы применения БСС (особенно оборона и безопасность) требуют полного покрытия площади объекта зонами мониторинга датчиков. Кроме того, часто для обеспечения надежности сбора данных мониторинга требуется многократное перекрытие площади объекта датчиками мониторинга с обеспечением заданной степени связности узлов сети. Для этого перед разворачиванием БСС осуществляется планирование мест расположения узлов. Но существуют области применения БСС, в которых детерминированное разворачивание узлов нецелесообразно (или невозможно) из-за больших временных или экономических затрат на размещение (например, в случае боевых действий, экологических катастрофах, в районах химического или радиационного заражения, труднодоступных районах и т.д.) [3]. В таких случаях для оперативного разворачивания сети может использоваться рассеивание узлов над районом мониторинга с использованием летательных аппаратов (ракет, пушек и т.п.). При этом из-за случайного размещения узлов максимально покрыть сенсорами район мониторинга возможно только с использованием достаточно большого числа узлов (избыточности). Избыточность количества узлов (ИКУ) позволит обеспечить требуемое покрытие, но приведет к росту числа коллизий при передаче из-за увеличения уровня взаимных помех, задержек передачи данных, дублированию информации мониторинга и излишнему расходу ресурсов батарей на повторные передачи.

Каждый узел БСС оснащен источником энергии ограниченной ёмкости, поэтому основополагающим требованием к ним является уменьшение потребления энергии для увеличения времени жизни (ВЖ) сети. Под временем жизни сети понимается длительность функционирования сети без потери связности ее элементов из-за выхода из строя узлов, израсходовавших свой энергоресурс (энергию батарей) [3].

В настоящее время универсальным стандартом построения БСС является спецификация сетевых протоколов верхних уровней ZigBee, использующая протокол физического и канального уровня IEEE 802.15.4. Очевидно, что использование стандартной технологии имеет множество преимуществ (уменьшение стоимости элементной базы, сокращение времени на разработку, возможность объединения разных сетей и т.д.). Однако спецификация ZigBee в силу своей универсальности не является оптимальной для многих приложений и ее коммерческая направленность не предусматривает использование БСС с избыточным количеством узлов. Поэтому необходимо разрабатывать методы уменьшения расхода энергетических ресурсов узлов для увеличения времени жизни БСС данного класса.

В статье предложены методы уменьшения (перераспределения) расхода энергии батарей с целью увеличения времени жизни сетей с избыточным количеством узлов за счет планирования и управления совместной работой элементов сети на различных уровнях эталонной модели взаимодействия открытых систем.

2. Методы увеличения времени жизни сенсорной сети. Для уменьшения расхода энергоресурса узлов с целью увеличения времени жизни сети в настоящее время предложено множество соответствующих методов [4...6], классификация которых в соответствии с уровнями модели OSI показана на Рис. 1.



Рис. 1. Классификация методов увеличения времени жизни сенсорной сети

Основными методами экономии энергоресурса узлов БСС является организация режимов работы, которая подразумевает **периодическое отключение узлов или их приемопередатчиков**. БСС осуществляют передачу данных мониторинга с заданным периодом и отключение узлов (приемопередатчиков) после передачи данных до начала следующего периода позволяет снизить расход энергоресурса, но при этом возникает задача организации взаимодействия между узлами для обеспечения ретрансляции сообщений в направлении шлюза с обеспечением минимальных задержек. Классическими подходами решения данного класса задач является организация согласованных циклов сна/пробуждения узлов (приемопередатчиков), что вносит задержки при передаче сообщений [4].

В отличие от классического подхода организации циклов сна/пробуждения для БСС с избыточным количеством узлов автором предлагается :

1. На прикладном уровне отключать узлы, которые дублируют покрытие района мониторинга. Для продления длительности функционирования сети предлагается организовать периоды включения/выключения отдельных узлов так, чтобы в каждый момент времени функционировало множество узлов, необходимое для обеспечения заданного покрытия района мониторинга.

2. На сетевом уровне использовать энергосберегающий метод маршрутизации, учитывающий периодическое функционирование множеств избыточных узлов, а также метод уменьшения (сжатия) объема передаваемых данных за счет их избыточности.

3. На канальном уровне при возрастании нагрузки передачи данных использовать гибридные методы множественного доступа (МД) (детерминированные и случайные методы доступа имеют различные предельные значения эффективности в зависимости от нагрузки). Для приближенных к шлюзу узлов (на которых концентрируется трафик всей сети) для уменьшения числа коллизий передачи пакетов и увеличения скоростей передачи

целесообразно использовать методы детерминированного доступа к каналу. Для удаленных от шлюза узлов целесообразно использовать методы случайного доступа к каналу, не требующих синхронизации узлов.

Управление мощностью передачи позволяет уменьшить использование энергоресурса за счет уменьшения мощностей (дальности) передачи. Исходя из того, что узлы БСС не мобильны и варианты маршрутов могут быть определены заранее, управление мощностью передачи целесообразно использовать на сетевом уровне в методах маршрутизации.

Уменьшение использования энергоресурса методом уменьшения объема данных (агрегации) происходит за счет уменьшения избыточности или потери точности сбора данных мониторинга с внесением задержек передачи для обработки данных. БСС с избыточным количеством узлов используется для повышения надежности и качества покрытия площади объекта мониторинга, поэтому в данных сетях методы агрегации целесообразно использовать на сетевом уровне на отдельных узлах с повышенным использованием энергоресурса для предотвращения выхода их из строя при неэффективности применения других методов энергосбережения. Для уменьшения объема данных целесообразно использовать их корреляцию (временную, когда данные не меняются со временем, и пространственную, когда данные от соседних узлов совпадают).

Автором были проанализированы методы увеличения времени жизни БСС с точки зрения целесообразности их применения в сетях с избыточным количеством узлов и были предложены следующие методы управления БСС:

- 1) энергосберегающий метод управления БСС с избыточным количеством узлов (ЕМУ БСС ИКУ) на прикладном и сетевом уровнях модели OSI ;
- 2) энергосберегающий метод управления БСС с избыточным количеством узлов (ИКУ) на канальном уровне модели OSI – энергосберегающий метод множественного доступа (ЕММД) к каналу БСС с ИКУ (в дальнейшем – метод ЕММД БСС ИКУ);
- 3) энергосберегающий метод агрегации данных в БСС с избыточным количеством узлов (ЕМАД БСС ИКУ).

Разработанные методы могут использоваться как отдельно, так и дополнять друга в соответствии со следующим алгоритмом выбора набора применяемых методов для БСС с ИКУ (Рис. 2):

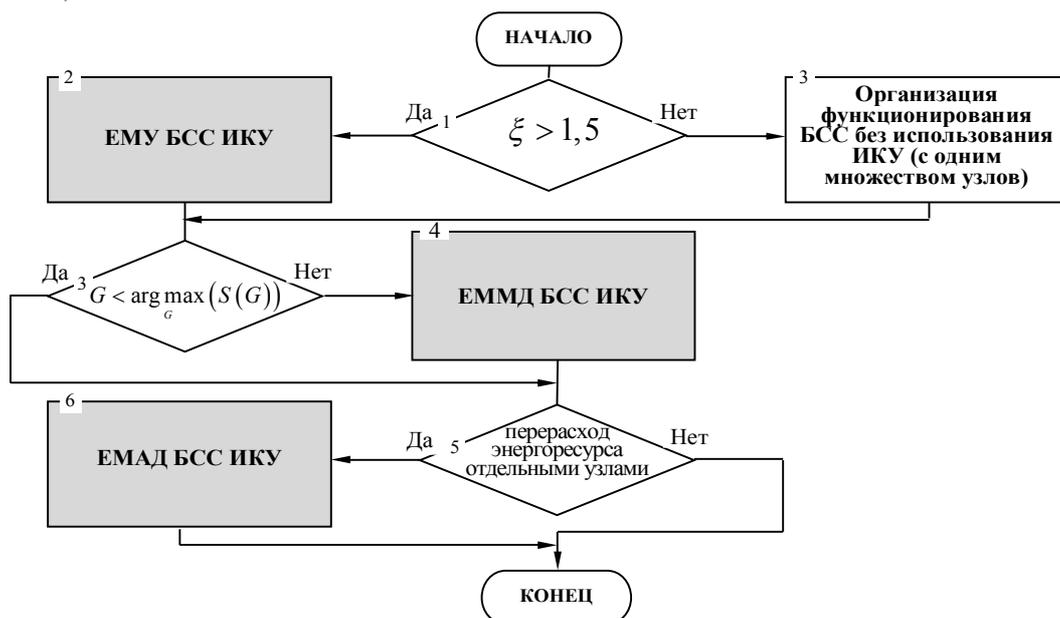


Рис. 2. Алгоритм выбора методов

1) При избыточности количества узлов $\xi \geq 1,5$ шлюз инициирует использование ЕМУ БСС ИКУ ($\xi = N / N_n$, N – общее количество узлов, N_n – количество необходимое для обеспечения заданного покрытия).

2) При повышении суммарной нагрузки на шлюз и приближенные к нему узлы до значений границы стойкости (критическое увеличение коллизий) для случайных методов множественного доступа $G^{rc} = \arg \max_G (S(G))$ (G – суммарная нагрузка на узел, S – средняя скорость передачи узла) [2], шлюз инициирует использование ЕММД БСС ИКУ.

3) При угрозе потери связности сети из-за исчерпания энергоресурса отдельными узлами для них используется ЕМАД БСС ИКУ.

Рассмотрим отдельно предложенные методы.

2.1. Энергосберегающий метод управления БСС с ИКУ на прикладном и сетевом уровнях модели OSI. При анализе существующих методов увеличения времени жизни БСС были определены преимущества методов ЕЕCCR (An Energy-Efficient m -coverage and n -connectivity Routing Algorithm Under Border Effects in Heterogeneous Sensor Networks) [7] и ECR (An Energy Conserving Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks [8, 9]). Данные методы направлены на обеспечение m -кратного покрытия района мониторинга и n -кратной связности узлов сетей и по результатам моделирования показывают лучшие результаты времени жизни сети. Автором были выявлены недостатки этих методов и предложен усовершенствованный метод [5]. В предложенном методе разработаны новые алгоритмы определения доступного количества подмножеств избыточных узлов, развертывания и функционирования БСС с избыточным количеством узлов.

Суть метода: На этапе планирования сети сначала определяется доступное количество подмножеств узлов, каждое из которых сможет обеспечить заданное покрытие площади мониторинга; а затем общая численность узлов БСС разделяется на определенное количество множеств узлов, которые будут функционировать в разные периоды времени и обеспечивать m -кратное покрытие площади района мониторинга датчиками и n -кратную связность.

На начальном этапе функционирования определяются маршруты передачи сообщений от каждого узла в направлении шлюза с учетом периодов функционирования БСС и использования энергетических ресурсов узлами, причем некоторые узлы включаются в состав разных подмножеств для обеспечения связности сети.

После определения маршрутов осуществляется передача данных в направлении шлюза (при переключении множеств маршруты корректируются в зависимости от расхода энергоресурса отдельными узлами).

Для определения минимального количества узлов, которые должны обеспечить заданное покрытие района мониторинга была использована аналитическая модель БСС.

Модель БСС с избыточным количеством узлов: N узлов случайным образом равномерно размещены в районе мониторинга Ω с радиусом R ; $S_\Omega \rightarrow \infty$ та $N \rightarrow \infty$, но в отдельной точке $N / S_\Omega = const$; плотностью узлов – случайная величина (пуассоновским законом распределения с интенсивностью N / S_Ω ; используется M типов узлов, количество узлов i -го типу – $\rho_i N$ ($0 \leq \rho_i \leq 1$, $1 \leq i \leq M$, $\sum_{i=1}^M \rho_i = 1$); радиус мониторинга узла типа i – r_{mi} , максимальный радиус передачи узла типа i – r_{pi} ; $\forall i, j \in M, r_{mi} < r_{mj}$ если $i < j$; сеть представляется в виде графа $G = (V, E)$.

Было доказано, что для описанной модели БСС с избыточным количеством узлов при $R \gg \max(r_{mi})$, $R \gg \max(r_{pi})$, $i \in (1..M)$ отношение площади m -кратного покрытия S_{Ω_m} к

площади району моніторинга S_Ω и вероятность n -кратной связности узлов $P(G, n)$ для используемой модели БСС равны [5]:

$$\frac{S_{\Omega_m}}{S_\Omega} = 1 - \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{n_1+\dots+n_m=x} \frac{1}{\prod_{i=1}^m n_i!} \times \sum_{k=0}^M \left(\prod_{i=1}^M \left(\frac{\rho_i N r_{mi}^2}{R^2} \right)^{n_i} e^{-\left(\frac{\rho_i N r_{mi}^2}{R^2} \right)} \right), \quad P(G, n) \geq \left(1 - e^{-\frac{N(r_n^{\min})^2}{R^2}} \sum_{x=0}^{n-1} \left(\frac{N(r_n^{\min})^2}{R^2} \right)^x / x! \right)^N. \quad (1)$$

Метод включает в себя следующую последовательность этапов:

1. *Определение необходимого количества множеств узлов БСС и временных периодов их функционирования.* Особенностью метода является его применение при избыточности узлов $\xi \in [1,5..2), [2,5..3)$, $\xi = N / N_{mn}$ (N_{mn} – необходимое количество узлов для обеспечения заданных характеристик сети). Для этого предлагается увеличить количество подмножеств узлов N_m и периодов их функционирования N_T . При этом каждому узлу будет соответствовать несколько периодов включения и выключения. Так для $\xi \in [1,5..2)$: $N_m = 3$, $N_T = 2$, количество периодов включения узлов $N_{T_{вкл}} = 2$. Для $\xi \in [2,5..3)$ $N_m = 5$, $N_T = 5$, $N_{T_{вкл}} = 2$. Для определения необходимого количества подмножеств узлов N_m и периодов N_T предлагается использовать разработанный алгоритм, использующий зависимости (1) [5].

2. *Распределение БСС на множества узлов с отдельными периодами функционирования.* Случайное распределение общего количества узлов на подмножества в БСС с избыточным количеством узлов, которое применяется в предыдущих методах, может привести к уменьшению реального покрытия площади района мониторинга в отдельных периодах функционирования сети. Также это может привести к перерасходу энергоресурса узлов в отдельных зонах сети из-за их постоянного включения (при назначении одинаковых номеров множеств соседним узлам) [5]. Особенно это применимо к узлам, которые находятся в непосредственной близости от шлюза и осуществляют ретрансляцию данных всей сети. В предложенном методе, в отличие от предыдущих, предлагается равномерное распределение узлов на подмножества и периоды функционирования с помощью разработанного алгоритма [5]. Пример распределения узлов на подмножества представлен на Рис. 3а.

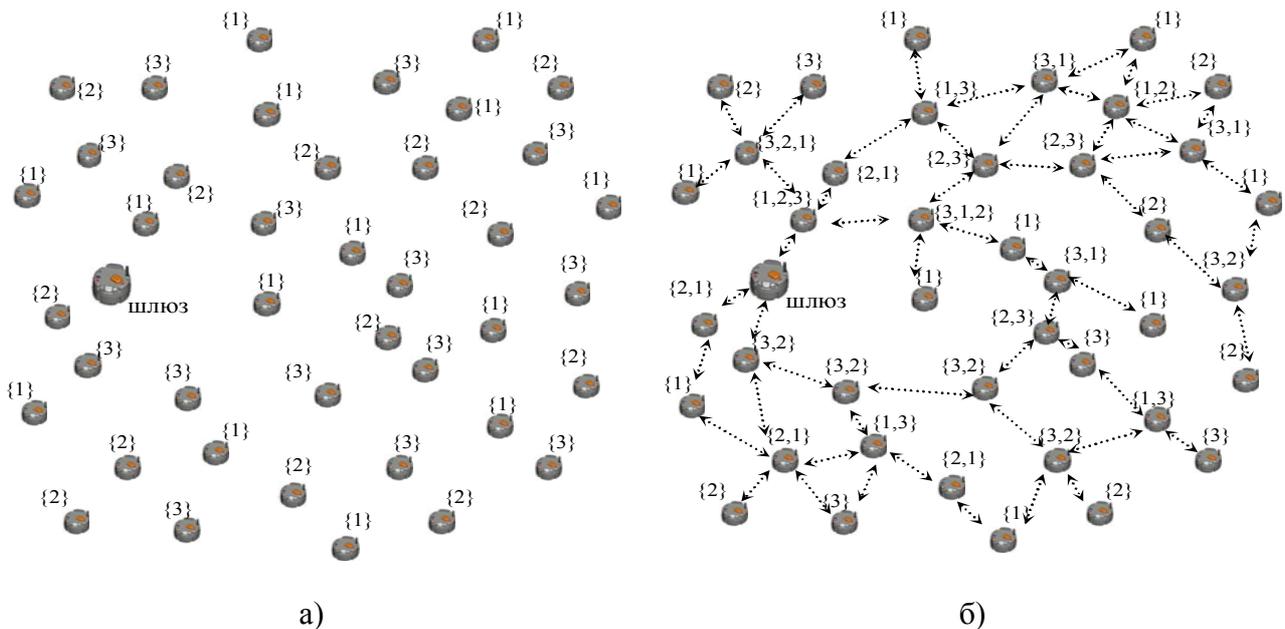


Рис. 3. Распределение узлов на подмножества

3. *Организация маршрутизации сообщений в БСС* (определение маршрутов) с учетом: периодов функционирования БСС с ИКУ; использования энергетических ресурсов узлов; равномерности нагрузки на узлы, приближенные к шлюзу; восстановления связности при выходе из строя отдельных узлов. Для выполнения этих функций предлагается использовать разработанный алгоритм маршрутизации [5]. При построении маршрутов для обеспечения связности некоторые узлы могут входить в состав разных подмножеств (Рис. 3б).

4. *Обеспечение маршрутизации сообщений сбора данных* и их передача по назначенным маршрутам в направлении шлюза в соответствии периодам функционирования сети. На этом этапе осуществляется периодическая реконфигурация сети в соответствии с предложенным алгоритмом [5].

Преимущества разработанного метода:

- возможность использования метода при избыточности узлов $\xi \geq 1,5$ (предыдущие методы использовались при целых значениях избыточности $\xi = 2, 3, 4, \dots$);
- более равномерное распределение узлов на множества с исключением возможности включения в одно множество группы соседних узлов (что возможно при случайном распределении узлов на множества);
- обеспечение минимального количества функционирования приближенных к шлюзу узлов, восстановление связности сети при выходе из строя ее отдельных элементов;
- использование минимально возможных мощностей передачи (управление мощностью передачи на сетевом уровне);
- использование многопараметрической маршрутной метрики, учитывающей мощность передачи, число ретрансляций, остаток заряда батареи и удаление от шлюза (при использовании для ретрансляции узлов из другого множества).

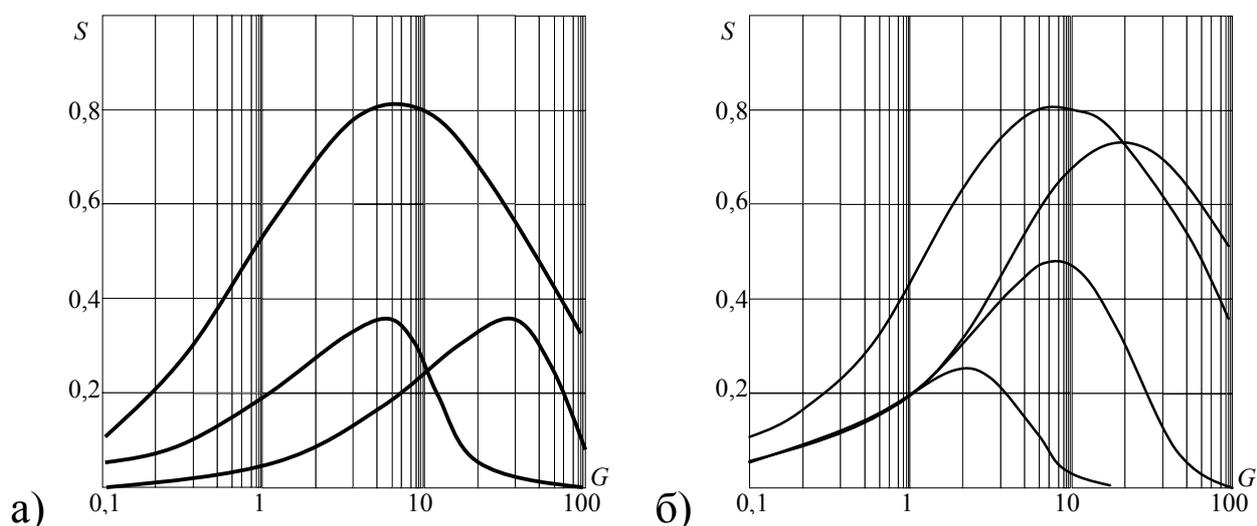
2.2. Энергосберегающий метод управления БСС с ИКУ на канальном уровне модели OSI. При небольших значениях нагрузки в БСС целесообразно использовать случайные методы множественного доступа. Для примера, зависимость средней скорости передачи узла от трафика сети для гибкого метода множественного доступа с контролем несущей [1]:

$$S = \frac{k^2 G e^{-k^2 G(ak+2m)}}{k^2 G(1+2ak) + e^{-k^2 G(ak+2m)}},$$

где a, k, m – параметры сети, влияющие на интенсивность коллизий из-за скрытых терминалов и зависят от характеристик БСС [1].

Графики соответствующих зависимостей $S(G)$ при разных вариантах значений a, k, m представлены на Рис. 4 [1]. Видно, что зависимость $S(G)$ имеет выраженный максимум – границу стойкости при $G = G^{rc} = \arg \max_G (S(G))$, после которого идет резкий спад скорости передачи из-за возрастания количества коллизий. Такая зависимость характерна для всех методов случайного доступа к каналу [1]. Очевидно, что при $G > G^{rc}$ применение этих методов нецелесообразно.

Суть метода: Для увеличения времени жизни БСС при увеличении трафика в сети $G \geq G^{rc}$ предлагается создание вокруг шлюза зону детерминированного множественного доступа к каналу [6]. В методе предлагается ввести два временных периода функционирования соответственно детерминированного и случайного доступа (Рис. 4а).

Рис. 4. Графики зависимостей $S(G)$

Для отдаленных узлов, которые не входят в ЗДМД предлагается организовать доступ к каналу с помощью одного из существующих протоколов случайного множественного доступа. Для ЗДМД осуществляется планирование временных интервалов для каждого узла, которое базируется на собранной от дочерних узлов информации о рабочей нагрузке, рабочем цикле родительского узла и выделенным родительским узлом рабочем цикле для текущего узла [6]. Во время организации случайного доступа к каналу отдаленных узлов, узлы зоны детерминированного доступа находятся в режиме сна и наоборот. Граничные узлы зоны детерминированного доступа к каналу функционируют в двух периодах: во время периода случайного доступа находятся в режиме приема данных от отдаленных узлов, а во время детерминированного периода передают данные в направлении шлюза.

Применение двух типов множественного доступа позволит объединить их преимущества, уменьшить потребление энергетических ресурсов нагруженных трафиком узлов и обеспечит упрощение синхронизацию отдаленных элементов сети. Максимальное количество ретрансляций i в ЗДМД определяется как $\max(i)$, при котором $G_i > G_i^{rc}$, $G_i^{rc} = \arg \max_{G_i} (S(G_i))$, где G_i – трафик, поступающий на узлы с i ретрансляциями до шлюза или превышения заданного относительного уровня коллизий.

Преимущества разработанного метода:

- использование ЗДМД позволяет увеличить пропускную способность сети без усложнения ее синхронизации;
- включение узлов в зону детерминированного доступа, инициируемое граничным узлом ЗДМД.
- корректировка расписаний временных интервалов при переключении множеств избыточных узлов;
- адаптация расписания временных интервалов при изменении рабочих нагрузок;
- разработанный метод позволяет применять механизмы агрегации данных (предложены ниже) на граничных узлах ЗДМД без внесения дополнительных задержек за счет агрегации;
- управление размером ЗДМД с агрегацией данных на граничных узлах является дополнительным способом управления потреблением энергоресурса приближенных к шлюзу узлов.

2.3. Энергосберегающий метод агрегации данных в БСС с ИКУ. Методы агрегации данных вносят дополнительные задержки на сбор и обработку данных. Поэтому их целесообразно применять на отдельных узлах для продления длительности их функционирования с целью увеличения времени жизни сети. При анализе методов увеличения времени жизни БСС были определены преимущества метода DyDAP (A Dynamic Data Aggregation Scheme for Privacy Aware Wireless Sensor Networks) [10, 11], который обеспечивает снижение объема передаваемых данных при перегрузках на узлах сети. На его основе предложенный усовершенствованный метод агрегации данных БСС с избыточным количеством узлов для снижения использования энергетических ресурсов узлов.

Для БСС с избыточным количеством узлов агрегацию данных предполагается использовать в двух случаях, представленных на Рис. 5. В первом случае, на граничных узлах ЗДМД (Рис. 5а), которые принимают и передают данные в разные периоды функционирования сети с ЗДМД. Временное разделение приема и передачи позволяет применять агрегацию данных, не внося дополнительных задержек. Во втором случае, агрегация данных применяется для перегруженных ретрансляцией узлов. На Рис. 5б изображен пример, в котором узлы 1 и 2 ретранслируют данные всей "отделенной" подсети и, поэтому могут быстро исчерпать энергетический ресурс и выйти из строя, что повлечет потерю связности сети. При невозможности применить другие методы уменьшения использования энергоресурса (в данном случае из-за особенности расположения узлов) продлить время жизни сети можно только уменьшив объем передаваемых от подсети данных с использованием их корреляции (с допустимой потерей их точности).

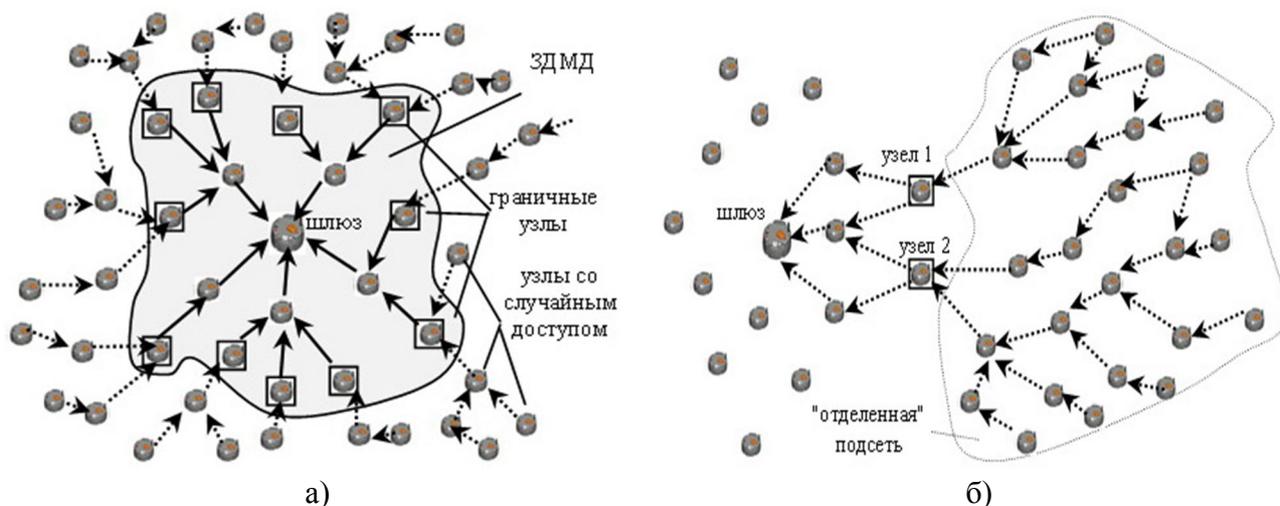


Рис. 5. Примеры применения агрегация в БСС с избыточным количеством узлов

Суть метода. В предлагаемом методе уменьшение объема данных осуществляется за счет создания на отдельных узлах сети по команде шлюза динамических очередей передачи данных с заданными характеристиками: максимальная длина очереди передачи и ограничение передачи сообщений в единицу времени. При увеличении очередей передачи за счет резкого увеличения трафика или при ограничении количества передач (для продления длительности функционирования отдельного узла), увеличиваются возможности уменьшения объема данных за счет пространственной и временной корреляции отдельных сообщений. На узле осуществляется обработка данных и в направлении шлюза передаются только те данные, которые изменились за определенный период, при этом данные от группы соседних узлов усредняются и передаются одним агрегированным сообщением (Рис. ба-в).

Преимущества предложенного метода:

- использование метода на отдельных узлах, перегруженных ретрансляцией для предотвращения выхода их из строя от истощения энергетических ресурсов и потери связности сети;
- использование на граничных узлах ЗДМД для увеличения времени жизни сети;
- управление агрегацией данных с использованием для каждого узла максимальной длины очереди и ограничения количества передач в единицу времени;
- уменьшение объема данных с использованием временной корреляции;
- уменьшение объема передаваемых данных за счет использования разных форматов сообщений;
- использование нескольких очередей передачи разного приоритета.

3. Оценка эффективности методов.

Для оценки эффективности предложенных методов использовалась имитационная модель БСС. В качестве показателя эффективности было предложено использовать длительность функционирования сети до истощения энергоресурса хотя бы одного узла. Для имитационного моделирования использовался программный комплекс The Network Simulator [12]. Функционирование модели БСС зависит от многих параметров: требований к покрытию района мониторинга, пространственных размеров сети, радиусов мониторинга и передачи, энергетических моделей узлов, а также задействованных протоколов физического и канального уровня и т.п. Была использована упрощенная модель БСС с использованием стандартных протоколов физического и канального уровня (802.11). При этом были получены результаты, которые позволили сделать вывод, что предложенные методы позволяют повысить время жизни сети до 15-20% по сравнению с аналогичными. Кроме того, метод увеличения времени жизни БСС за счет избыточного количества узлов позволяет улучшить процентный реального покрытия района зонами мониторинга до 10%.

4. Выводы.

Были предложены методы увеличения времени жизни БСС с избыточным количеством узлов на разных уровнях модели взаимодействия открытых систем. Предложен алгоритм применения разработанных методов в соответствии определенными критериями (повышение нагрузки и перерасход энергоресурса узла). С помощью имитационного

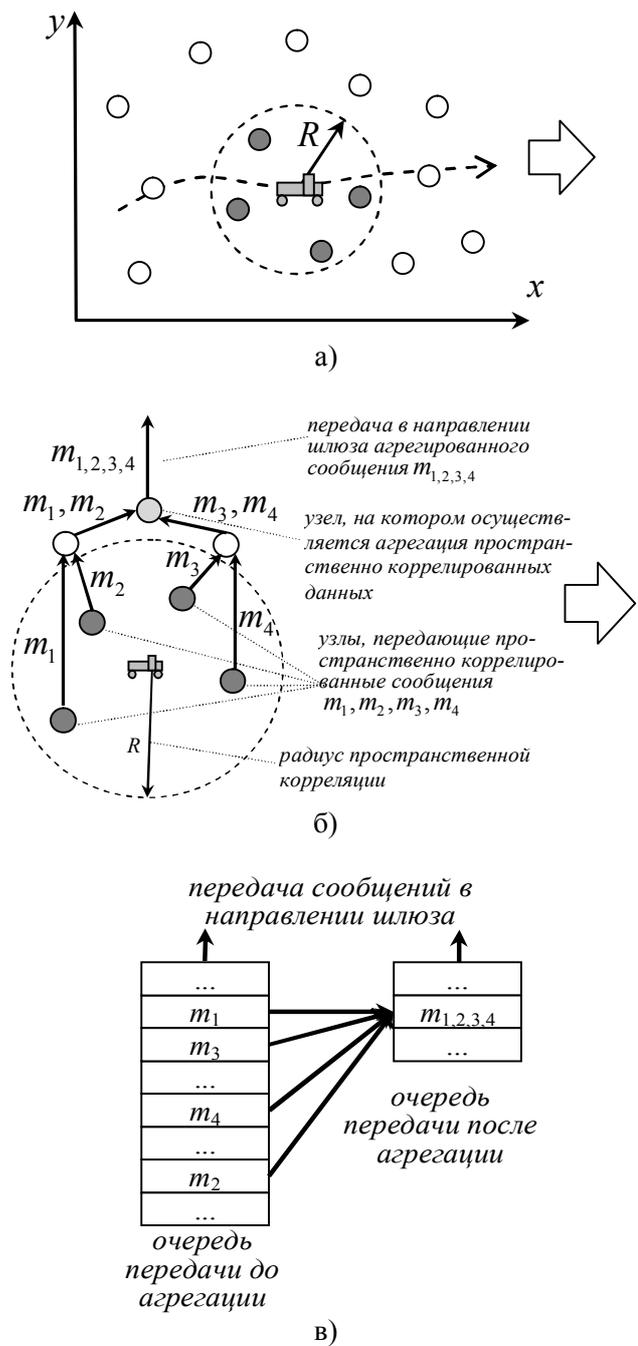


Рис. 6. Энергосберегающий метод агрегации

моделирования была проведена оценка эффективности, которая позволила сделать вывод, что разработанные методы управления БСС увеличивают время жизни сети до 15-20% по сравнению с аналогичными методами данного класса. При проведении исследований было определено, что модель сбора данных БСС с одним шлюзом накладывает ограничения на возможности равномерного распределения нагрузки на узлы БСС для продления времени ее функционирования. Концентрация трафика приводит к повышенной нагрузке на приближенные к шлюзу узлы и к преждевременному выходу их из строя. Продлить длительность функционирования БСС в таких условиях возможно только агрегацией данных с потерей их точности. В дальнейшем предлагается разрабатывать методы управления расходом энергоресурса БСС с избыточным количеством узлов и несколькими шлюзами, которые позволят продлить время жизни сети без потери точности собираемых данных.

Литература

1. Buratti C. An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution / C. Buratti, A. Conti, D. Dardari, R. Verdone // *Sensors*, 2009, vol. 9, pp. 6869-6896.
2. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами / [С. Г. Бунин, А. П. Войтер, М. Е. Ильченко, В. А. Романюк]. – К.: НПП «Вид. «Наукова думка» НАН України», 2012. – 444 с.
3. Kheng Y. Review of Energy Harvesting Technologies for Sustainable WSN / Y. Kheng Tan and S. Kumar Panda. // *Sustainable Wireless Sensor Networks*, Yen Kheng Tan (Ed.), InTech, 2010 [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://www.intechopen.com/books/sustainable-wireless-sensor-networks/review-of-energy-harvesting-technologies-for-sustainable-wsn>.
4. Коваленко І. Г. Аналіз методів енергозбереження в сенсорних радіомережах / І. Г. Коваленко, В. А. Романюк, І. М. Діянчук // *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*, 2011. – № 1. – С. 76-84.
5. Коваленко І. Г. Метод енергозбереження сенсорної радіомережі спеціального призначення з надлишковою кількістю неоднорідних вузлів при забезпеченні заданих показників покриття зон моніторингу та зв'язності вузлів / І. Г. Коваленко, В. А. Романюк, І. М. Діянчук // *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. – 2011. – № 3. – С. 52-64.
6. Коваленко І. Г. Енергозберігаючий метод множинного доступу в сенсорних радіомережах спеціального призначення з надлишковою кількістю неоднорідних вузлів / І. Г. Коваленко // *Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ»*. – 2012. – № 1. – С. 37-49.
7. Jin Y. EECCR: An Energy-Efficient m-Coverage and n-Connectivity Routing Algorithm Under Border Effects in Heterogeneous Sensor Networks / Y. Jin, L. Wang, J. Jo, Y. Kim, M. Yang, Y. Jiang // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2009, vol. 58, no. 3., pp. 1429 – 1442.
8. Dong Y. An Energy Conserving Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks / Y. Dong, H. Chang // *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, 2011, vol. 4, no. 1, pp. 39-53.
9. Wang Q. A realistic power consumption model for wireless sensor network devices / Q. Wang, M. Hempstead, W. Yang // *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*, 2006, vol. 1, pp. 286-295.
10. Gautam G.C. A Comparative Study of Time Synchronization Protocols in Wireless Sensor Networks / G.C. Gautam, T.P. Sharma // *International Journal of Applied Engineering Research*, Dindigul, 2011, vol. 1, no. 4., pp. 691-705.
11. Sicari S. DyDAP: A Dynamic Data Aggregation Scheme for Privacy Aware Wireless Sensor Networks / S. Sicari, A. Grieco, G. Boggia, A. Coen Porisini // *The Journal of Systems & Software (JSS)*, 2012, – № 85(1), pp. 152-166.
12. VINT Project, The Network Simulator [Электронный ресурс] // – Режим доступа: <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.