

УДК 621.396.1 + 004.728.4

Галкин П. В., ассистент кафедры (Тел.: +380 057 702 14 94. E-mail: galkinletter@ukr.net)
(Харьковский национальный университет радиоэлектроники)

МОДЕЛЬ СБОРА ИНФОРМАЦИИ В БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

Галкин П. В. Модель збору інформації в безпроводовій сенсорній мережі. У статті запропоновано модель безпроводової сенсорної мережі (БСМ) на основі теорії гіперграфів із застосуванням кластеризації мережі. Введено поняття пікомережа. Розроблено принцип формування пікомережі. Введено поняття похідного радіусу кластера в пікомережі. Розроблена модель БСМ на основі пікомереж може бути застосована для спільного використання раніше не сумісних алгоритмів управління інформаційними потоками у рамках однієї мережі.

Ключові слова: безпроводова сенсорна мережа, збір інформації, гіперграф, модель, похідний радіус кластера, кластеризація, пікомережа

Галкин П. В. Модель сбора информации в беспроводной сенсорной сети. В статье предложена модель беспроводной сенсорной сети (БСС) на основе теории гиперграфов с применением кластеризации сети. Введено понятие пикосеть. Разработан принцип формирования пикосети. Введено понятие производного радиуса кластера в пикосети. Разработанная модель БСС на основе пикосетей может быть применена для совместного использования ранее не совместимых алгоритмов управления информационными потоками в рамках одной сети.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, сбор информации, гиперграф, модель, производный радиус кластера, кластеризация, пикосеть

Galkin P. V. Model of information collection in wireless sensor network. In this paper, we propose a model of a wireless sensor network (WSN) based on the theory of hypergraphs using clustering network. Introduced the concept of the piconet. Developed the principle of forming a piconet. Introduced the concept of the derived radius of the cluster in the piconet. The developed model WSN based on piconets can be used for sharing previously not compatible algorithms for the management of information flows within the same network.

Keywords: wireless sensor networks, information collection, hypergraph, model, the derived radius of the cluster, clustering, piconet

1. Введение и постановка задачи

Сегодня тема моделирования и оптимизации работы БСС вызывает интерес многих ученых. Это вызвано в первую очередь тем, что аппаратные средства и протоколы, лежащие в основе таких сетей, достаточно новы и быстро развиваются. Системы мониторинга параметров объектов на базе дискретных беспроводных сенсорных сетей описаны в работах М. Н. Терентьева [1].

Решением задач, связанных с оценкой, анализом и эффективным управлением информационными потоками в БСС, занимались ученые: И. А. Иванова [2], А. Е. Кучерявый, М. М. Комаров, С. Г. Ефремов. Микроминиатюризация и развитие микроэлектроники позволило создать приемо-передатчики и микроконтроллеры, способные работать от батарей питания несколько лет [3].

Важным фактором при работе БСС является ограниченная емкость элементов питания, установленных на узлах такой сети. Анализ энергосистем узлов уделили свое внимание А. Н. Зеленин, В. А. Власова [4]. На сенсорных узлах, как правило, выполняется только простейшая первичная обработка данных, ориентированная на уменьшение объема передаваемой информации и минимизацию числа циклов приема-передачи данных. Большое внимание анализу и решению проблем разработки надежных БСС, а также созданию программных и аппаратных средств для них уделяют ведущие компании в области производства радиоэлектронных компонент, а именно Digi, Freescale Semiconductor, Ember, Texas Instruments [3, 5]. В настоящее время исследования в этой области ведутся в основном по разработке новых протоколов связи.

Первая версия спецификации IEEE 802.15.4 [6] была создана в 2003 году, и в неё постоянно вносятся изменения вот уже на протяжении более десяти лет. Динамические процессы, протекающие в беспроводных сенсорных сетях, существенно меняются при масштабировании систем. Наличие большого количества транзитных узлов, которые ретранслируют сообщения (пакеты), существенно влияет на оптимальность выбранных параметров протоколов передачи данных. Поэтому, для анализа и понимания динамических процессов, протекающих в беспроводных сенсорных сетях, актуальным является построение их математической модели. Именно разработке модели БСС на основе гиперграфа и посвящена данная работа. На базе модели БСС возможно разработать алгоритм управления потоками данных в сети.

Целью исследования является разработка модели БСС с применением теории множеств и гиперграфов.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать принцип формирования модели БСС;
- разработать процедуру формирования пикосети;
- определить зону покрытия пикосети.

2. Модель беспроводной сенсорной сети

2.1. Построение модели беспроводной сенсорной сети

Беспроводную сенсорную сеть представим в виде множества узлов:

$$N = \{n_1, n_2, \dots, n_{N_{all}}\}, \quad (1)$$

где N_{all} – общее количество узлов БСС без учета типа устройств, которое можно определить как:

$$N_{all} = \sum_{i=1}^n N_i, \quad (2)$$

где N_i – i -й узел БСС.

Такой подход при исключении маршрутизаторов характерен для одноранговой сети, где каждое устройство может взаимодействовать с любым другим устройством, находящимся в пределах его радиуса действия.

Принимая во внимание, что БСС состоит из конечных устройств, роутеров и координатора, множество может быть разбито на три подмножества, объединяющих все три типа устройств в БСС:

$$N \subset K, N \subset R, N \subset E, \quad (3)$$

где K – подмножество координаторов в сети;
 R – подмножество роутеров в сети;
 E – подмножество конечных устройств в сети.

Соответственно, общее количество узлов в сети:

$$N_{all} = \sum_{i=1}^n N_i = \sum_{j=1}^k N_j + \sum_{l=1}^r N_l + \sum_{s=1}^e N_s, \quad (4)$$

где k – количество координаторов в сети, согласно спецификации IEEE 802.15.4 [6],
 $k=1$ – константа;
 r – количество роутеров в сети;
 e – количество конечных устройств в сети;
 N_j – j -й координатор в беспроводной сенсорной сети;
 N_l – l -й роутер в сети;
 N_s – S -й конечный узел в сети.

Используя многоуровневый подход при декомпозиции сети, можно выделить три уровня иерархии её структуры: уровень координатора, уровень маршрутизатора, уровень конечных устройств. Что соответствует приведенным множествам в выражении (3).

Объединение узлов БСС в кластер образует простой граф (Рис. 1) в двухмерном пространстве.

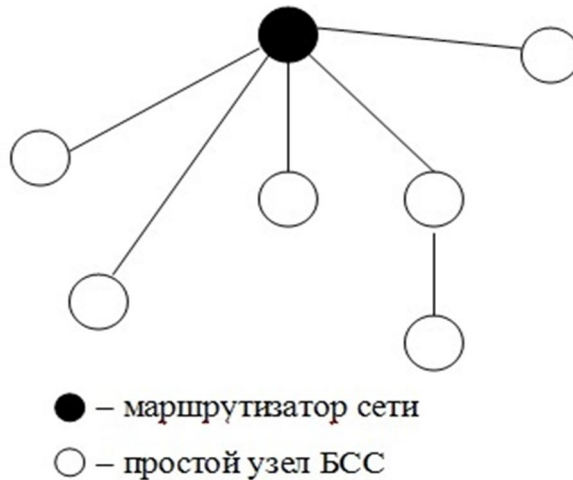


Рис. 1. Подмножество узлов, объединенных в простой граф

Существующие и разрабатываемые беспроводные сенсорные сети передачи данных можно представить в виде гиперграфа, так как этот способ представления обладает высокой наглядностью, особенно при разбиении сети на уровни.

Пусть вся беспроводная сенсорная сеть разбивается на подмножества узлов, которое назовем пикосеть:

$$N \subset N_q^{\Theta}, \quad (5)$$

где индекс Θ показывает, что это множество является пикосетью;

q – номер пикосети и принимает значение от 1 до p ;

p – количество пикосетей в БСС.

В пикосеть могут входить узлы из обычных множеств K , R , E . Таким образом, образуются новые подмножества узлов, которые объединяются по определённому принципу. При этом узлы БСС внутри пикосети могут объединяться в кластеры, Рис. 2.

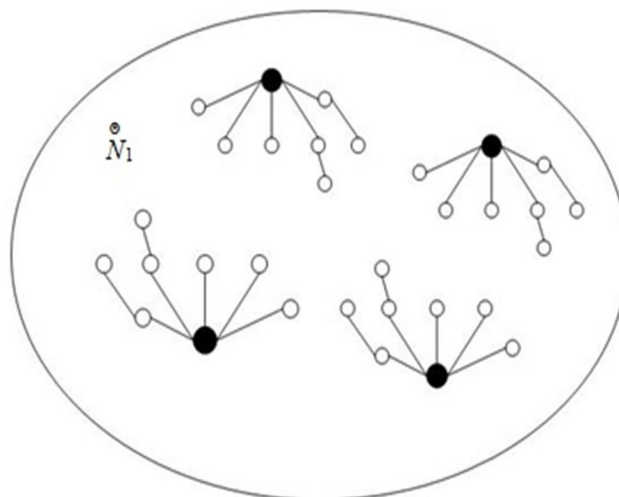


Рис. 2. Пример объединения узлов в пикосеть с внутренней кластеризацией

Далее объединим пикосети в полную сеть на основе гиперграфа, Рис. 3.

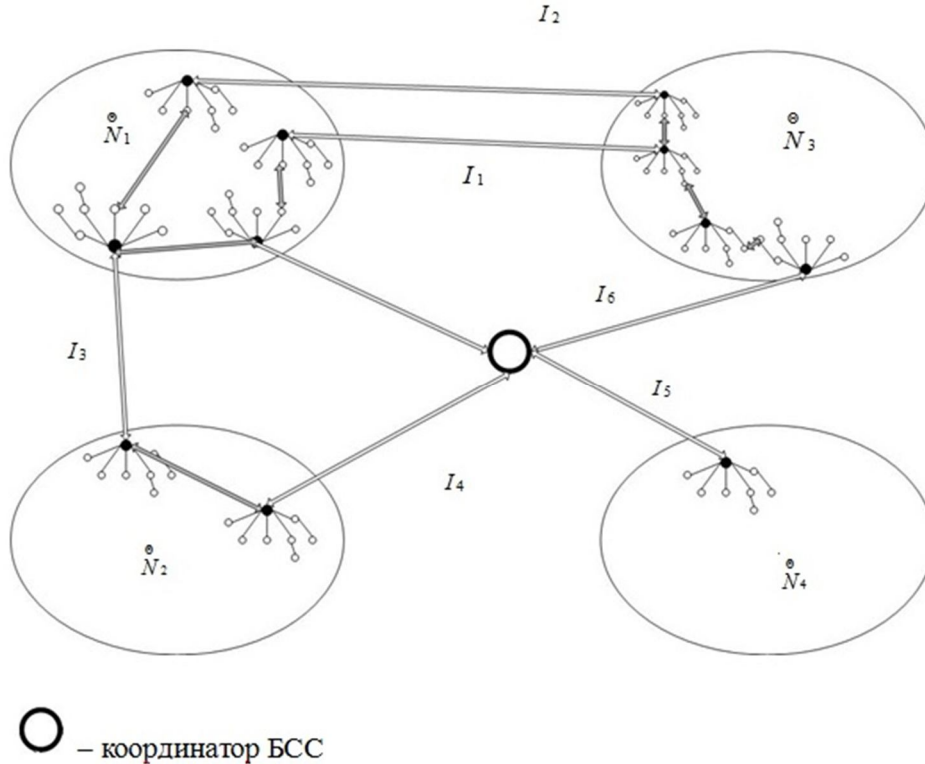


Рис. 3. Модель сети БСС на основе гиперграфа

Объединение узлов в свое подмножество, например $\overset{\ominus}{N}_1$, позволяет создать небольшую пикосеть внутри БСС. Такое объединение узлов – пикосеть, возьмем за основу построения модели БСС.

Из вышеизложенного следует, что модель БСС представляет собой гиперграф:

$$G(\overset{\ominus}{N}, I), \quad (6)$$

где $\overset{\ominus}{N}$ – множество вершин гиперграфа, которое является множеством пикосетей (специально объединенные подмножествами узлов БСС);

I – множество информационных потоков.

Множество вершин гиперграфа состоит из p -пикосетей, образованных в БСС:

$$\overset{\ominus}{N} = \left\{ \overset{\ominus}{N}_1, \overset{\ominus}{N}_2, \dots, \overset{\ominus}{N}_p \right\}, \quad (7)$$

где p – количество пикосетей в БСС.

Множество ребер гиперграфа является множеством информационных потоков, что возникают между пикосетями,

$$I = \{I_1, I_2, \dots, I_j\}, \quad (8)$$

где j – количество информационных потоков в БСС.

Информационные потоки между пикосетями образуют множество информационных потоков.

Проанализировав типы информационных потоков, которые возникают в БСС можно выделить следующие:

- аварийная сигнализация, передача которой должна осуществляться с минимальными задержками и потерями;
- протокольная сигнализация, которая должна передаваться с минимальными потерями;

- речевые данные, которые чувствительные к джиттеру и потерям;
- данные обслуживания, такие как микропрограммы и конфигурации с гарантированной доставкой;
- данные телеметрии, при интегральном сборе информации допускают потерю на уровне 20 % [7];
- все остальные данные, что передаются без гарантий.

Самый высокий приоритет обслуживания применяется для передачи сообщений аварийной сигнализации. Классы качества обслуживания, определенные в рекомендации Y.1541 [8], являются основой для соглашений между конечными пользователями и сетевыми поставщиками услуг, а также между поставщиками услуг.

При передаче данных в БСС возникают существенные проблемы, связанные с ограниченной полосой пропускания используемых в качестве линий связи радиоканалов. В частности, в ситуациях, когда много узлов источников одновременно инициируют передачу данных, может возникать перегрузка или даже коллапс сети [9], в результате чего ее пропускная способность, выражаемая в количестве проходящих от источника к центральному узлу пакетов данных в единицу времени, падает практически до нуля. Возможное решение такой проблемы – назначение приоритетов передаваемым по сети пакетам и организация первоочередной доставки пакетов с более высоким приоритетом. Этот подход согласуется с концепцией качества обслуживания (Quality of Service - QoS), являющейся общепринятой для беспроводных сенсорных сетей [9], а основой для него может служить рекомендации Y.1541 [8].

Для всех передаваемых данных, кроме аварийной сигнализации, необходимо также учитывать тип информационного потока, который может обладать свойствами нестационарности [10], самоподобия [11] и др. [12, 13].

При подходе к построению математической модели БСС на основе гиперграфа, модель учитывает, что каждое ребро гиперграфа соединяет не только два узла сети БСС, но и любое подмножество узлов, как показано на Рис. 3. Каждая пикосеть может быть с внутренней кластеризацией, как было показано на Рис. 2. Способ представления БСС в виде гиперграфа обладает высокой наглядностью.

2.2. Разработка принципа формирования пикосети

Объединение узлов БСС в пикосеть позволяет сгруппировать их в рамках одной зоны. Это может быть зона покрытия или определённый объект исследования, например, этаж с разделением на квартиры или целое здание с разделением на счетчики электроэнергии на лестничных площадках. Построение топологии играет одну из важных ролей в работе БСС. После развертывания узлы сети должны произвести самоорганизацию – обнаружить все доступные узлы, построить топологию и обеспечить маршрутизацию пакетов между узлами. Выбор топологии БСС во многом определяет энергоэффективность сети.

Введем понятие “Зона покрытия пикосети” – двух- или трехмерное пространство, на котором собирается исследуемая информация, при этом количество итераций передачи от одного узла к соседним не превышает значение t , а Z – зона покрытия пикосети.

Иерархический подход формирования БСС вызывает интерес, поскольку благодаря своей структуре позволяет снизить энергозатраты на передачу пакетов между узлами [14].

К программным методам снижения энергозатрат относят использование протоколов маршрутизации, основанных на метрике остаточной энергии узлов [15], а также кластеризацию [13].

Формировать пикосеть необходимо, исходя из нескольких критериев, которые далее нужно перевести в алгоритм формирования пикосети, а на следующем шаге перевести алгоритм в программный код при программировании узлов БСС. К критериям объединения узлов БСС в пикосети можно отнести:

- количество зон покрытия, которые необходимо накрыть БСС;
- территориальную близость узлов в рамках одной пикосети;

- выполняемую задачу в рамках БСС;
- связность узлов и связность сети;
- энергетическую балансировку внутри сети.

Для формирования пикосети необходимо определить связность узлов БСС. Чтобы решить задачу определения связности необходимо:

- определить тип связности узлов сети;
- создать модель связности сети;
- определить эффективный метод передачи данных внутри пикосети.

Связность сети также следует учитывать при формировании пикосети, так как некоторые узлы могут оказаться связующими звеньями между большими группами узлов. Такая ситуация приведет к кластеризации БСС на сильно не связанные области, где энергия в связующих узлах закончится значительно быстрее, чем в большинстве остальных узлов. При выходе из строя связующих узлов происходит дробление сети на отдельные автономные подсети без возможности связи с координатором.

Известно, что в протоколах маршрутизации традиционных сетей используются метрики, направленные на увеличение пропускной способности сети или уменьшение задержек передаваемых данных. Подобными метриками могут служить: количество промежуточных узлов до адресата, пропускная способность канала связи, уровень загрузки линии [16]. В беспроводных сенсорных сетях часто применяется метрика остаточной энергии узлов на пути до координатора, из множества альтернативных маршрутов выбирается маршрут с большей остаточной энергией.

Для описания информационного обмена внутри пикосети введем понятие внутрипикосетевая связность. Для взаимодействия с другими пикосетями – межпикосетевую. Внутрипикосетевая связность обеспечивает передачу данных между узлами внутри пикосети, а межпикосетевая – между другими пикосетями, а также координатором БСС.

Внутрипикосетевое взаимодействие необходимо рассматривать в привязке к процессу кластеризации. На Рис. 4 изображена зона покрытия пикосетью, при этом возможно сформировать четыре кластера внутри пикосети. Из Рис. 4 видно, что существуют узлы в рамках одной пикосети, которые входят в область радиовидимости обеих соседних главных узлов кластеров (ГУК).

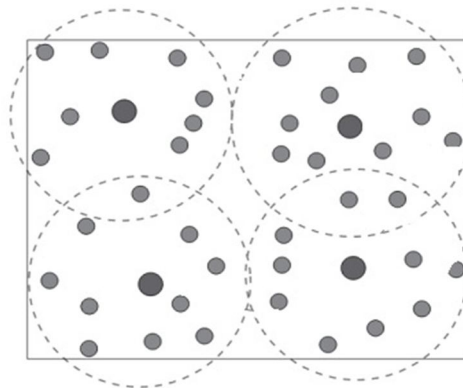
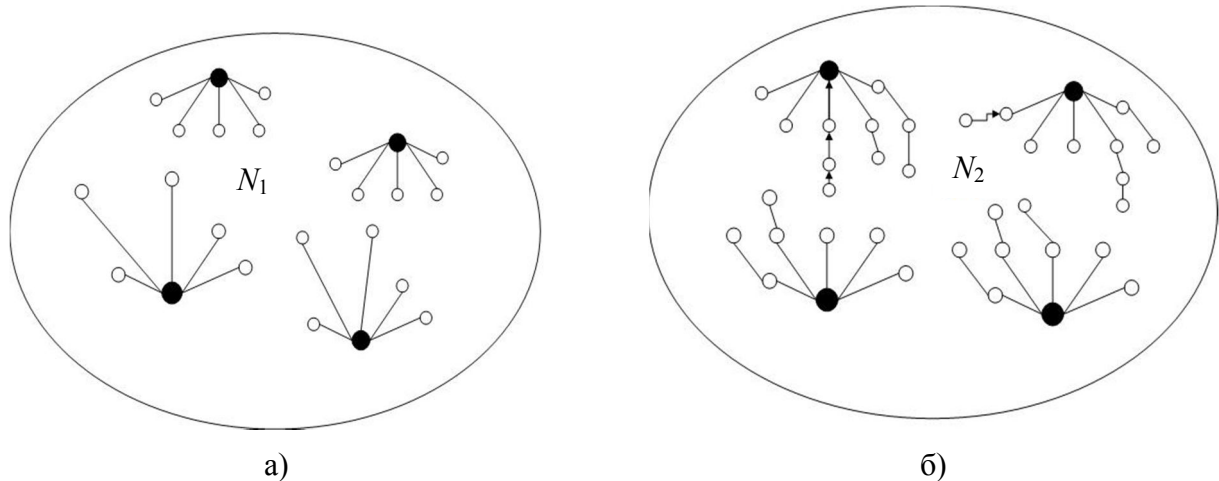


Рис. 4. Зона покрытия пикосети с образованием четырех кластеров

Информация от узла определённого кластера может передаваться как к главному узлу кластера непосредственно, так и через определённый промежуточный узел. Одноинтервальный принцип формирования кластера (Рис. 5,а) не всегда применим, так как, иногда узел БСС может передать информацию к главному узлу кластера только через промежуточный. Это существенное ограничение снижает возможность использования протоколов с одноинтервальным принципом формирования кластера, а также их масштабируемость. Многоинтервальный принцип формирования кластера (Рис. 5,б) позволяет собрать информацию с удалённых от ГУК узлов, минуя это ограничение.



а) б)

Рис. 5. Передача даних в пикосеті в рамках кластера

а) при одноінтервальному; б) при многиінтервальному принципі формування кластера

Многиінтервальний підхід дозволяє кожному ГУК, вне зависимости от его удаленности от координатора, передавати йому дані. Пакети с даними передаються опосередовано – через другие ГУК или другие узлы соседнего кластера, как показано на Рис. 5б (пикосеть N_2). Когда ГУК не хватает мощности, чтобы связаться друг с другом, дані нужно передавати через узлы соседнего или своего кластера, при этом возникает задача организации передачи дані внутри пикосети с многиінтервальной кластеризацией через узлы, которые будем называть межкластерные шлюзы, Рис. 6.

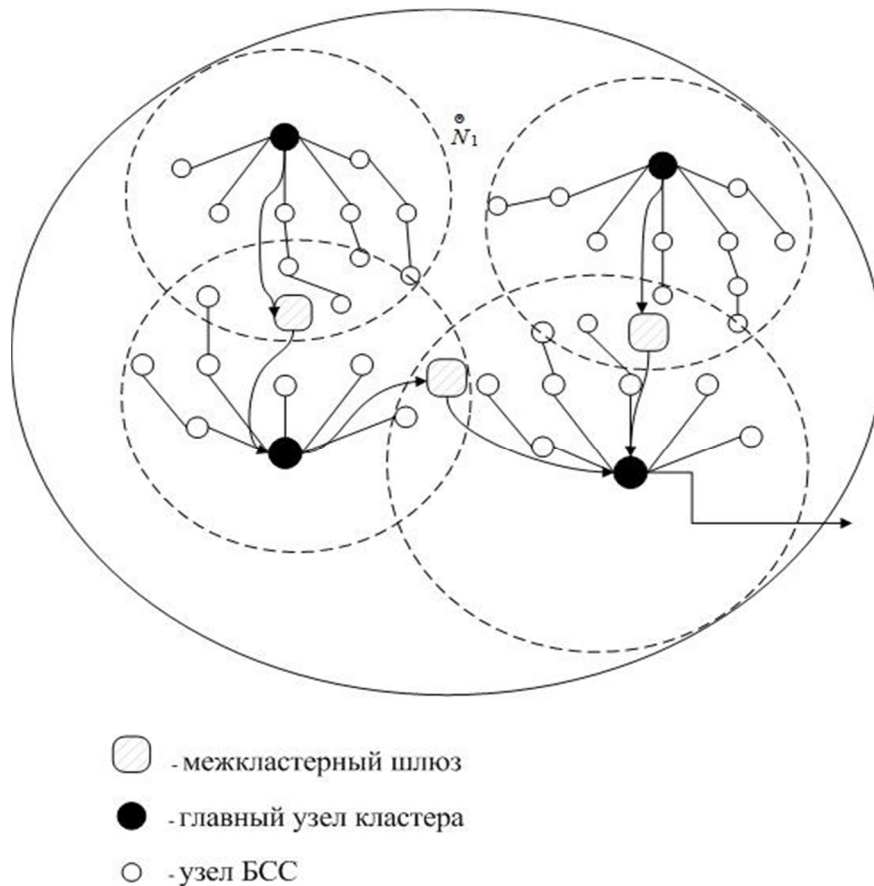


Рис. 6. Организация передачи дані внутри пикосети с многиінтервальной кластеризацией через межкластерные шлюзы

Если данные от каждого сенсорного узла передаются до координатора опосредованно, то все узлы БСС должны хранить одну и ту же информацию, например таблицу маршрутизации, в итоге потребление энергии может возрасти. С другой стороны, разбиение БСС на пикосети обеспечивает более низкое потребление энергии, поскольку отдельные ГУК агрегируют данные и передают их на координатор. Использование пикосетей позволяет распределить ресурсы ортогонально каждому кластеру такой сети для уменьшения коллизий между кластерами и повторного их использования.

В результате использования межкластерных шлюзов сеть получается хорошо масштабируемой. Этого удается добиться за счет использования масштабируемых алгоритмов маршрутизации [2], построенных на виртуальном преобразовании топологии сети из одноранговой в многоранговую. Также при использовании межкластерных шлюзов нет необходимости обмениваться информацией между двумя ГУК на максимальной мощности радиопередатчика. За счет территориальной близости межкластерного шлюза, не всегда для связи между узлами кластера требуется использовать самый высокий уровень мощности радиопередатчика узла. Тогда за счет снижения мощности может быть достигнута экономия энергии, и как следствие – увеличение срока службы узлов без замены источника питания. Следовательно, удается добиться и уменьшения энергопотребления всей БСС. Радиопередатчики узлов БСС имеют или плавно изменяемый, или дискретно изменяемый уровень мощности радиопередатчика [5]. Оценка влияния различных режимов работы узла БСС проводилась в работах [3, 4, 17, 18] и положительный эффект от оптимизации уровня мощности радиопередатчика показан в работе Жевака А. В. [17].

2.3 Определение элементов зоны покрытия пикосети

Для любого сенсорного узла N существует такая область $S(N)$, называемая зоной чувствительности (sensitivity area), Она описывает площадь, в пределах которой сенсор может регистрировать физическое явление [2].

Радиус действия R_s сенсорного узла N_i – максимальное расстояние, на котором датчик может фиксировать состояние окружающей среды. Зона радиовидимости узла – область, в пределах которой узел может напрямую связываться с другими узлами. Максимальное расстояние между N_i и любым другим узлом N_j , где N_i находится в зоне радиовидимости N_i , называется радиусом связи R_{radio} узла N_i , и определяет связность узла БСС. В этом случае N_i называется соседом N_j в радиосети. Два узла N_i и N_j могут иметь прямую радиосвязь только тогда, когда

$$N_i \in M_Radio(N_j) \cap N_j \in M_Radio(N_i), \quad (9)$$

где $M_Radio(N)$ – множество соседей по радиосвязи.

Два узла называются соседними, если пересечение их радиусов действия не является пустым множеством

$$R_s(N_i) \cap R_s(N_j) \neq \emptyset, \quad (10)$$

где $R_s(N_i)$ – радиус действия сенсорного узла N_i ;

$R_s(N_j)$ – радиус действия сенсорного узла N_j ;

$i, j = 1, 2, \dots, n, i \neq j$.

Множество S сенсорных узлов называется окружением сенсорного узла N_s , если каждая точка на границе зоны чувствительности узла, которая определяется радиусом действия R_s , принадлежит по крайней мере одному сенсорному из S , Рис. 7.

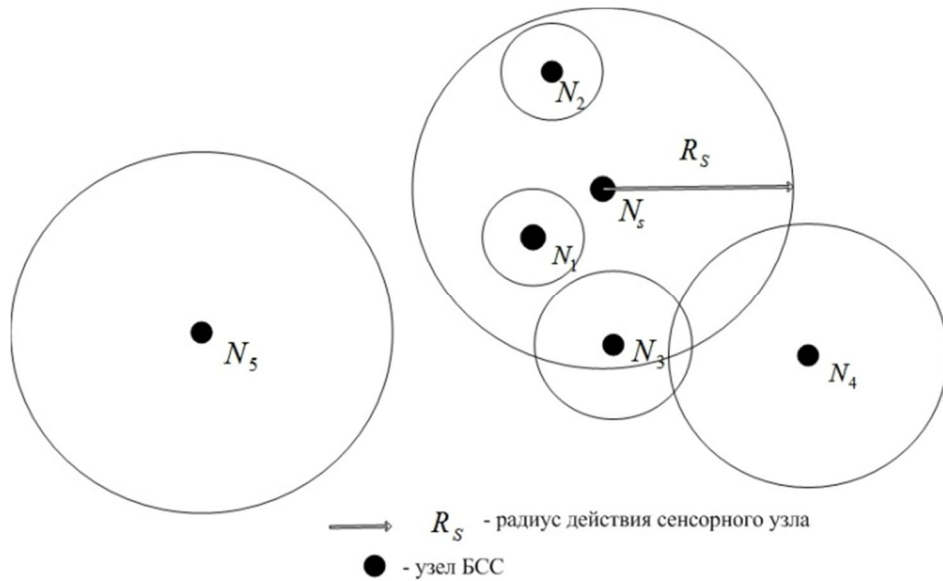


Рис. 7. Окружение сенсорного узла N_s

Из рис. 7 видно, что узлы N_1, N_2 не могут быть окружением узла N_s , так как зона чувствительности узла N_1 и узла N_2 полностью покрывается узлом N_s . Сенсорный узел называется внутренним узлом, если у него есть окружение из сенсорных узлов. Узлы N_1, N_2 являются внутренними узлами. Узел N_s не может быть окружением для узла N_s , так как его зона чувствительности находится за пределами зоны чувствительности узла N_s . Узлы N_3, N_4 могут быть окружением узла N_s .

Радиус действия R_s и радиус радиосвязи R_{radio} узла могут различаться [19, 20]: больше или меньше зоны радиовидимости, Рис. 8.

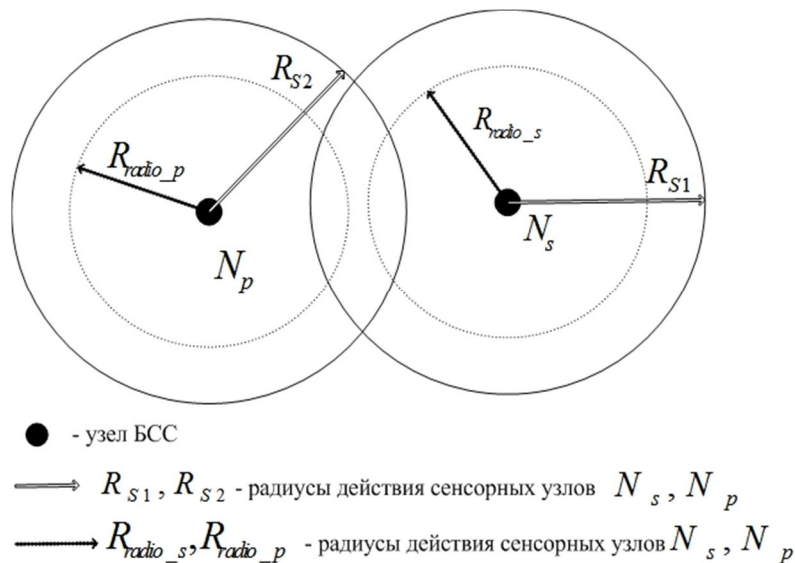


Рис. 8. Радиусы действия и радиосвязи при отсутствии прямой радиовидимости

Это означает, что два соседних узла могут не иметь возможности обмениваться информацией напрямую, даже если радиусы действия их сенсоров пересекаются.

Радиус действия R_s и радиус радиосвязи R_{radio} только частично описывают возможный процесс сбора информации в БСС. Для рационального использования кластерной структуры в пикосети для зоны Z необходимо ввести понятие производного радиуса кластера R'_w . Такой радиус показывает зону действия кластера, в рамках которой ГУК может получить данные с узлов через определённое количество промежуточных узлов w . Определить производный радиус кластера можно из выражения (11):

$$R'_w(N_n(CID)) = R_{radio}(N_j) + R(CHL(CID)), \quad (11)$$

где $N_n(CID)$ – номер пикосети с идентификатором кластера в этой сети; $CHL(CID)$ – идентификатор ГУК в пикосети.

Процесс сбора данных со всей пикосети осуществляется в рамках зоны Z (рис. 9), которая определяется суммой площадей или объемов (в трехмерном пространстве) зон кластеров и зависит от количества кластеров, которые входят в пикосеть, а также от выбора принципа формирования производного радиуса кластера R'_w .

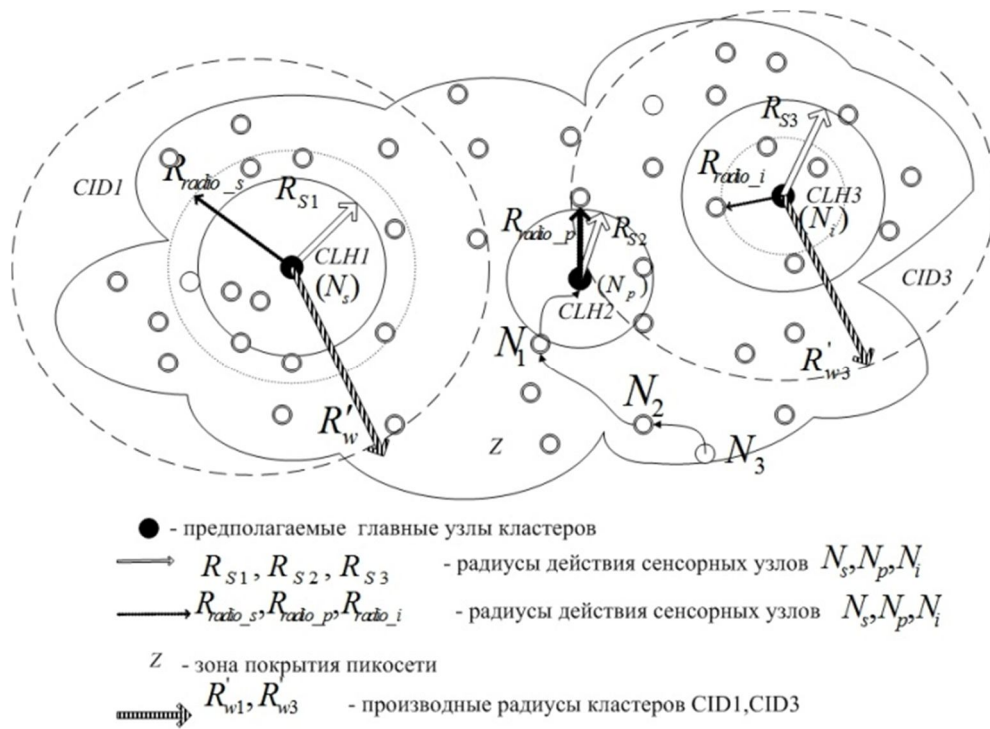


Рис. 9. Процесс сбора данных в рамках зоны Z

Как видно из Рис. 9, узлы N_s, N_p, N_i имеют разные радиусы действия R_s и радиус радиосвязи

$$R_{radio} : \left. \begin{array}{l} N_s \Rightarrow R_{S1} < R_{radio_s}, \\ N_p \Rightarrow R_{S2} = R_{radio_p}, \\ N_i \Rightarrow R_{S3} = R_{radio_i}. \end{array} \right\} \quad (12)$$

Из выражений (12) видно, что радиус действия R_{S1} узла N_s меньше, чем радиус радиосвязи R_{radio_s} , но кластер CID1 (Рис. 9) образован не на основе радиуса радиосвязи, а на основе производного радиуса кластера R'_w . Количество промежуточных узлов w , которые принимают участие в передаче от узла входящего в кластер CID1 будет зависит от радиусов радиосвязи, радиусов действия и решаемой задачи сбора. Определение количества промежуточных узлов w в кластере является отдельной задачей и требует дополнительного рассмотрения. Применение производного радиуса кластера R'_w является выходом при низкой связности сети и позволяет уйти от ситуации дробления сети на автономные участки.

Процесс сбора данных в рамках зоны Z , показанный на Рис. 9, характерен для многоинтервальной кластеризации. Количество итераций t от одного узла БСС до ГУК равно:

$$t_{CID} = w_{CID} + 1, \quad (13)$$

где CID – номер кластера;

t – количество итераций от одного узла БСС до ГУК в рамках пикосети;

w – количество промежуточных узлов, которые принимают участие в передаче.

Параметр t опреляется для всей пикосети, например, N_2 . Из Рис. 9 видно, что для узла N_p $w = 2$ (узлы N_1, N_2) а количество итераций $t = 3$.

На потребление узла влияет алгоритм его работы, построенный по модели сбора информации. Например, в работе [21] предлагается схема сохранения энергии за счет зоны чувствительности, предполагающая отключение сенсора, если его зона чувствительности покрывается другим сенсором.

Разработка эффективных и адекватных [22] моделей сбора информации в БСС позволит сократить время сбора данных, а также энергопотребление узлов. Создание модели БСС актуально и определяется необходимостью на ее основе разработки алгоритма управления потоками данных [23]. Благодаря этому повысится эффективность беспроводной сенсорной сети и её ресурс работы в автономном режиме. Анализ существующих моделей сбора [24], информации в БСС показал, что в зависимости от выбора модели сбора происходит ограничение применимости сети. Разработанная модель БСС на основе гиперграфа позволяет решить эту проблему.

Выводы

В статье предложена модель БСС на основе теории гиперграфов с применением кластеризации сети и разбиением БСС на пикосети. Предложенный принцип формирования модели БСС учитывает, что каждое ребро гиперграфа соединяет не только два узла сети БСС, но и любое подмножество узлов. Способ представления БСС в виде гиперграфа обладает высокой наглядностью. Определено, что основным фактором, влияющим на длительность, скорость и живучесть сети, являются информационные потоки между всеми узлами. Процесс сбора данных со всей пикосети осуществляется в рамках зоны Z , которая определяется суммой площадей зон кластеров и зависит от количества кластеров, которые входят в пикосеть.

Разработанная модель БСС на основе пикосетей может быть применена для разных сфер деятельности. Модель позволяет гибко адаптировать принципы и модели сбора информации в БСС.

Литература

1. Терентьев М. Н. Модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени / М. Н. Терентьев // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16, № 4. – С. 79–84.
2. Иванова И. А. Определение периметра зоны покрытия беспроводных сенсорных сетей / И. А. Иванова // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 10. – С. 25–30.
3. Measuring Power Consumption of CC2530 With Z-Stack [Электронный ресурс] / Texas Instruments Application Note AN079. // – Режим доступа : \www/ URL: <http://www.ti.com/lit/an/swra292/swra292.pdf> – 10.06.2014 г. – Загл. с экрана.
4. Власова В. А. Анализ энергоциклов узлов беспроводных сенсорных сетей / В. А. Власова, А. Н. Зеленин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 3, №9(57). – С. 13–17.
5. Second Generation System-on-Chip Solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / RF4CE / ZigBee [Электронный ресурс] // Texas Instruments. // – Режим доступа : \www/ URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2530.pdf> – 15.06.2014 г. – Загл. с экрана.
6. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks –Specific Requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs) [Электронный ресурс] IEEE Std. 802.15.4-2009 // – Режим доступа : \www/ URL: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.15.4d-2009.pdf> – 11.06.2014 г. – Загл. с экрана.
7. Гадышев В. А. Алгоритм распределения потоков в сетях передачи данных / В. А. Гадышев, А. С. Крутолапов, Д. А. Сычев // Системы управления и информационные технологии.– 2011.– Т. 46, № 4.1.– С. 128-131.
8. Network performance objectives for IP-based services // Recommendation ITU-T Y.1541 . – 2011. – P. 1-66.
9. Тараканов Е. В. Экспериментальные исследования протокола передачи данных с приоритетами в беспроводной сенсорной сети в системе TOSSIM / Е. В. Тараканов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, №5.– С. 223-227.
10. Макаренко С. И., Моделирование обслуживания нестационарного информационного потока системой связи со случайным множественным доступом / С. И. Макаренко, М. А. Татарков // Информационно-управляющие системы. – Санкт-Петербург: ГУАП. – 2012. – № 1. – С. 44-50.
11. Прокопьев А. В. Самоподобие нагрузки в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных / А. В. Прокопьев // 65-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио, апрель 2010, Москва.
12. Мутханна А. С. Модели трафика для приложений передачи изображений во всепроникающих сенсорных сетях / А. С. Мутханна, А. В. Прокопьев // Электросвязь. – 2013. – №1. – С. 28-31.
13. Prolonging the lifetime of wireless sensor networks via unequal clustering [Текст] / S. Soro, W. B. Heinzelman // Proceedings of the 19th IEEE International Parallel and Distributed Processing Symposium (IPDPS'05), Washington, DC, USA .– Washington.– 2005. – P. 236-243. doi: 10.1109/IPDPS.2005.365

14. Sushruta M. Study of Cluster Based Routing Protocols in Wireless Sensor Networks / M. Sushruta, R. Alok, K. Abhishek, C. Vishal, V. Preksha, B. Lalit // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2012. – V.3, Issue 7. – P. 413-420.
15. Chen Y., Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks / Y. Chen, N. Nasser // Proceedings of the 3rd international conference on Quality of service in heterogeneous wired/wireless networks QShine '06. – 2006. – No.21. – P. 245-249. doi: 10.1145/1185373.1185401
16. Олифер В. Г., Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер. – 4-е изд. – Санкт-Петербург :– Питер, , 2010. – 943 с.
17. Жевак А. В. Оптимизация сбора данных в беспроводных сенсорных сетях с использованием нейронной сети с градиентным алгоритмом обучения / В. Ю. Арьков, А. М. Фридлянд, А. В. Жевак // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2007. – №10. – С. 47-49.
18. Галкин П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей / П. В. Галкин // ScienceRise. – 2014. – № 2 (2). – С. 55-61. doi: 10.15587/2313-8416.2014.27246.
19. Chuanlin Zhang Constructing low-connectivity and full-coverage three dimensional sensor networks / Chuanlin Zhang, Xiaole Bai, Jin Teng, Dong Xuan, Weijia Jia // Selected Areas in Communications, IEEE Journal on. – 2010. – Vol.28, Iss. 7. – P. 984-993. doi: 10.1109/JSAC.2010.100903.
20. Bai X. Full-Coverage and k-Connectivity (k=14,6) Three Dimensional Networks / Xiaole Bai, Chuanlin Zhang, Dong Xuan, Weijia Jia // INFOCOM 2009, IEEE (19-25 April 2009).– Rio de Janeiro, Brazil. – 2009. – P. 388-396. doi: 10.1109/INFCOM.2009.5061943.
21. Krishnamchari B. Networking Wireless Sensors / B. Krishnamachari. – Cambridge : Cambridge University Press, 2005. – 202 p.
22. Галкин П. В. Адекватность моделей беспроводных сенсорных сетей в средах имитационного моделирования / П. В. Галкин, А. С. Борисенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 4, №9(64). – С. 52 – 55. doi: <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2013.16394>.
23. Агеев, Д. В. Моделирование информационных потоков в мультисервисной сети NGN при решении задач параметрического Д. В. Агеев, А. Н. Копылев // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запорожський національний технічний університет. – 2010. – № 2 (23). – С. 48-52.
24. Галкин П. В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах / П. В. Галкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – Т. 5, №9(71).– С. 24-30. doi: 10.15587/1729-4061.2014.28008