

УДК 621.396

П. В. Галкин, ассистент  
Харьковский национальный университет радиоэлектроники, г. Харьков  
galkinletter@ukr.net

## Модель и алгоритм управления информационными потоками в беспроводной сенсорной сети

*В статье предложена модель беспроводной сенсорной сети (БСС) на основе теории гиперграфов с применением кластеризации сети. Выявлено, что основным фактором, влияющим на длительность, скорость и живучесть сети являются информационные потоки между всеми узлами. Введено понятие пикосети. Сформулирована задача кластеризации БСС и получено ее решение на основе определения элементов зоны покрытия пикосети. 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. Также предложен алгоритм выбора головного узла кластера с учетом порогового значения необходимой энергии для головного узла с использованием введенного понятия производного кластерного радиуса в пикосети. Для минимизации информационного потока в БСС обосновано использование метода агрегации данных на базе агрегатора сети, подчиненного координатору. Предложены подходы управления информационным потоком в кластерах, пикосетях и между ними. Для управления потоком внутри кластера предполагается использовать идею Fisheye State Routing (FSR). Для управления информационным потоком внутри пикосети предлагается использовать принцип гибридной маршрутизации. Для управления множеством информационных потоков, которые возникают между пикосетями, предлагается использовать метод множественных родителей, в котором сообщения не передаются через один и тот же маршрут, как в классическом случае, а через два или более узла пикосети.*

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

### Введение

Сегодня тема моделирования и оптимизации работы беспроводных сенсорных сетей (БСС) вызывает интерес многих ученых [1, 2]. Это вызвано в первую очередь тем, что аппаратные средства и протоколы, лежащие в основе таких сетей, достаточно новы и быстро развиваются. Микроминиатюризация и развитие микроэлектроники позволило создать приемо-передатчики и микроконтроллеры, способные работать от батарей питания несколько лет [3]. Первая версия спецификации IEEE 802.15.4 была создана в 2003 году, и в неё постоянно вносятся изменения вот уже на протяжении более десяти лет. Важным фактором при работе БСС является ограниченная емкость элементов питания, установленных на узлах такой сети [4]. В связи с этим, как правило, на сенсорных узлах выполняется только простейшая первичная обработка данных, ориентированная на уменьшение объема передаваемой информации и минимизацию числа циклов приема-передачи данных. В настоящее время исследования в этой области ведутся в основном по разработке новых протоколов связи. Однако, при увеличении количества сенсорных узлов классическое применение

коммуникационных протоколов: набора правил и процедур, регулирующих порядок осуществления связи, – теряет свою эффективность. При проектировании беспроводных сенсорных сетей невозможно перенести программное обеспечение, которое хорошо протестировано и отлажено в лабораторных условиях для небольшой сети, на реальную сеть. Это связано с тем, что динамические процессы, протекающие в беспроводных сенсорных сетях, существенно меняются при масштабировании систем, а БСС часто работают в неопределенной помехосигнальной обстановке. 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. Также в работе разрабатываются подходы к созданию алгоритма управления потоками данных в БСС, ориентированные на уменьшение объема передаваемой информации, с целью увеличения срока жизни сети.

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, Чинг-Чуан Чанга, Д. А. Молчанова, А. А. Захарова, К. А. Аксенова, Л. С. Волков, М. М. Комаров, С. Г. Ефремов. Анализ энергодисбаланса узлов БСС уделили свое внимание А. Н. Зеленин, В. А. Власова [4]. 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 компонентов, а именно Digi, Freescale Semiconductor, Philips, Ember, Samsung, IBM, Motorola, Texas Instruments [3, 5].

Типичный узел БСС содержит датчик, воспринимающий данные от внешней среды, микроконтроллер, память, радио-приемопередатчик, автономный источник питания. При этом микроконтроллер, трансивер и память могут изготавливаться и на одном кристалле, что способствует как миниатюризации самого узла БСС, так и снижению его энергопотребления. Основная часть энергии тратится на прием, прослушивание и передачу данных, а не на обработку или сохранение данных [5]. Необходимо организовать такой способ сбора сенсорных данных, при котором обеспечивался бы доступ в реальном режиме времени без потребности массовой передачи данных на маршрутизаторы и далее на координатор БСС.

Для эффективного сбора информации с БСС является актуальным создание ее модели. На базе модели БСС возможно разработать алгоритм управления потоками данных в сети. Использование новой модели сбора данных позволит создать качественно новую сеть, существенно расширяя перечень возможных решаемых ею задач в условиях неопределенности, и обеспечивающую повышение адекватности и объективности получаемых данных при низких энергетических затратах.

### Постановка задачи

Целью исследования является разработка модели БСС с применением теории множеств и гиперграфов, а также построение алгоритма управления информационными потоками, которые при этом возникают.

Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать принцип формирования модели БСС;
- определить порядок формирования кластера БСС;
- решить задачу кластеризации БСС;

- разработать процедуру формирования пикосети;
- разработать принцип работы алгоритма выбора головного узла кластера (ГУК) в определенный момент времени;
- решить задачу нахождения оптимального положения агрегатора пикосети;
- решить задачу уменьшения информационного потока между пикосетями (уменьшение объема передаваемых данных, обеспечение необходимого качества обслуживания согласно рекомендации Y.1541 [37], обеспечение необходимой пропускной способности для разных типов потоков);
- решить задачу уменьшения информационного потока внутри пикосети (обеспечение необходимого качества обслуживания, уменьшение объема передаваемых данных за счет эффективного использования радиуса действия узла);
- разработать алгоритм управления информационным потоком.

### 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 число 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],  $k=1=const$ ;  $r$  – количество роутеров в сети;  $e$  – количество оконечных устройств в сети.

нечных устройств в сети;  $N_j$  – j-й координатор в беспроводной сенсорной сети;  $N_l$  – l-й роутер в сети;  $N_s$  – s-й оконечный узел в сети.

БСС также можно представить как совокупность составных частей определённого уровня иерархии. Составляющая часть сети – объект, свойства которого являются контролируруемыми признаками на конкретном уровне представления. Используя многоуровневый подход при декомпозиции сети, можно выделить три уровня иерархии её структуры: уровень координатора, уровень маршрутизатора, уровень оконечных устройств. Что соответствует приведенным множествам в выражении (3).

Объединение узлов БСС в кластер образует простой граф в двумерном пространстве, рис. 1.

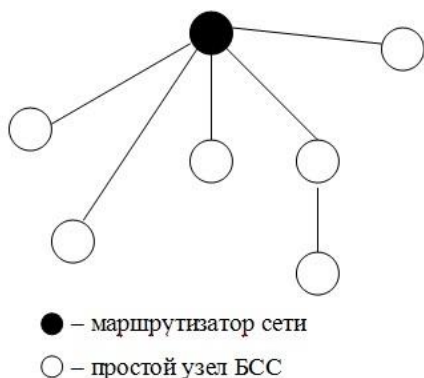


Рисунок 1 – Подмножество узлов, объединенных в простой граф

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:

$$N \subset N_q^\Theta, \tag{5}$$

где индекс  $\Theta$  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, формируются новые подмножества узлов, которые объединяются по определённому принципу. При этом узлы БСС внутри пикосети могут объединяться в кластеры, рис. 2. Принцип формирования пикосети будет рассмотрен ниже.

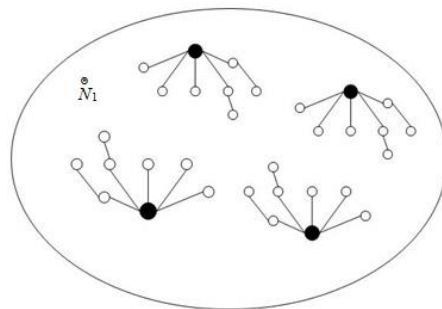


Рисунок 2 – Пример объединения узлов в пикосеть с внутренней кластеризацией

Объединение узлов в свое подмножество, например  $N_1$ , позволяет создать небольшую пикосеть внутри БСС. Такое объединение узлов – пикосеть, возьмем за основу построения модели БСС.

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

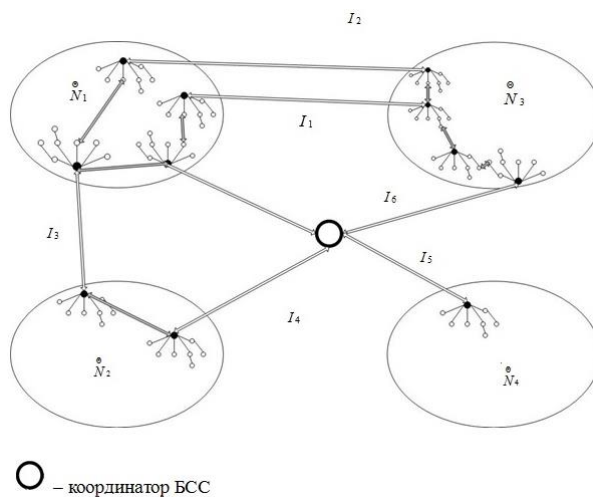


Рисунок 3 – Модель сети БСС на основе гиперграфа

Из выше изложенного следует, что модель БСС представляет собой гиперграф:

$$G(N, I), \tag{6}$$

где  $N$  – 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:

$$N = \{N_1, N_2, \dots, N_p\}, \tag{7}$$

где p – количество пикосетей в БСС.

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

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

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, которая должна передаваться 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 % [30];
- все остальные данные, что передаются без гарантий.

Самый высокий приоритет обслуживания применяется для передачи сообщений аварийной сигнализации, они должны быть доставлены с минимальными задержками и потерями. Классы качества обслуживания, определенные в рекомендации Y.1541 [37], 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 [28], 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 [28], а основой для него может служить рекомендации Y.1541 [37].

Для всех передаваемых данных кроме, аварийной сигнализации, необходимо также учитывать тип информационного потока, который может обладать свойствами нестационарности [18], самоподобия [28] и др.[38, 39].

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. Способ представления БСС в виде гиперграфа обладает высокой наглядностью.

Каждую пикосеть можно представить в виде множества кластеров, как было показано на рис. 2 – 3. Одной из актуальных задач в области алгоритмов маршрутизации в БСС является разработка эффективных алгоритмов кластеризации.

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

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. При использовании неэнергоэффективной топологии, время жизни сети может быть существенно снижено.

Иерархический подход формирования БСС вызывает интерес, поскольку благодаря своей структуре позволяет снизить энергозатраты на передачу пакетов между узлами [7].

К программным методам снижения энергозатрат относят использование протоколов маршрутизации, основанных на метрике остаточной энергии узлов [8], а также кластеризацию [9].

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 покрыть БСС;
- территориальную близость узлов в рамках одной пикосети;
- выполняемую задачу в рамках БСС;
- связность узлов;
- энергетическую балансировку внутри сети;
- связность 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.

Связностью 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 заканчивается 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 адреса, пропускная способность канала связи, уровень загрузки линии [10]. В беспроводных сенсорных сетях часто применяется метрика остаточной энергии узлов на пути до координатора. В этом случае из множества альтернативных маршрутов выбирается тот, на котором узлы имеют большую остаточную энергию.

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

Внутривикосетевое взаимодействие необходимо рассматривать в привязке до процесса кластеризации, который характерен для иерархического подхода формирования БСС. 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 обоих соседних главных узлов кластеров (ГУК).

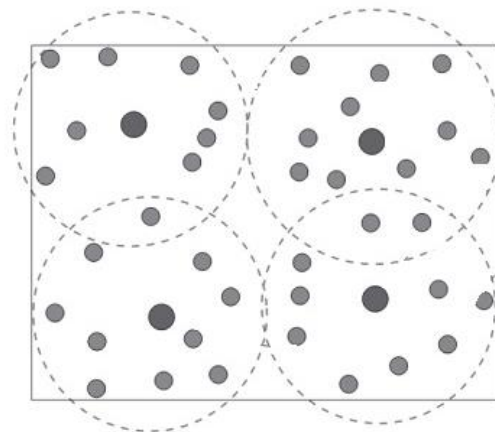


Рисунок 4 – Зона покрытия пикосети с образованием четырех кластеров

Информация от узла определённого кластера может передаваться как к главному узлу кластера непосредственно, так и через определённый промежуточный узел, рис. 5-6. Одноинтервальный принцип формирования кластера (рис. 5) не всегда применим, так как, иногда узел БСС может передать информацию к главному узлу кластера только через промежуточный. Многоинтервальный принцип формирования кластера (рис. 6) позволяет собрать информацию с удалённых от ГУК узлов, минуя это ограничение.

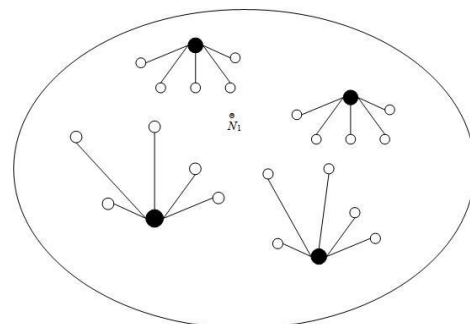


Рисунок 5 – Передача данных в пикосети в рамках кластера при одноинтервальном принципе формирования кластера

При одноинтервальном принципе формирования кластера данные, агрегированные ГУК, передаются напрямую на координатор БСС. Данный принцип имеет существенный недостаток, так как ГУК не всегда смогут передавать данные напрямую координатору, в виду их удаленности от него. Чем дальше будет располагаться ГУК, тем слабее будет сигнал или же координатор будет вообще вне зоны радиуса действия приемопередатчика ГУК. Это существенное ограничение снижает возможность использования протоколов с одноинтервальным принципом формирования кластера, а также их масштабируемость. Когда

соседнему ГУК необходимо передать информацию из своего кластера на координатора, одноинтервальный принцип вследствие показанных ограничений не всегда применим.

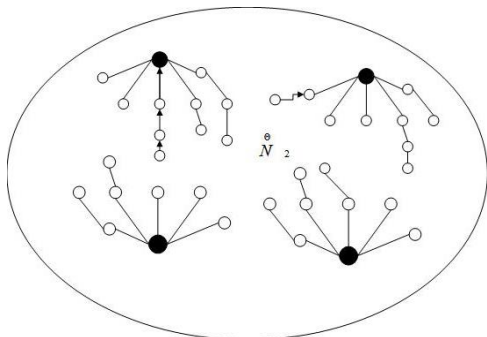


Рисунок 6 – Передача данных в пикосети в рамках кластера при многоинтервальном принципе формирования кластера

Многоинтервальный подход позволяет каждому ГУК, вне зависимости от его удаленности от координатора, передавать ему данные. Пакеты с данными передаются опосредованно – через другие ГУК или другие узлы соседнего кластера, как показано на рис. 6 (пикосеть  $N_2$ ). Когда ГУК не хватает мощности, чтобы связаться друг с другом, данные нужно передавать через узлы соседнего или своего кластера, при этом возникает задача организации передачи данных внутри пикосети с многоинтервальной кластеризацией через узлы, которые будем называть межкластерными шлюзами (рис. 7).

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. Это удастся добиться за счет использования масштабируемых алгоритмов маршрутизации [2], построенных на виртуальном преобразовании топологии сети из «плоской» (одноранговой) в иерархическую (многогранговую). Также при использовании межкластерных шлюзов нет необходимости обмениваться информацией между двумя ГУК на максимальной мощности радиопередатчика.

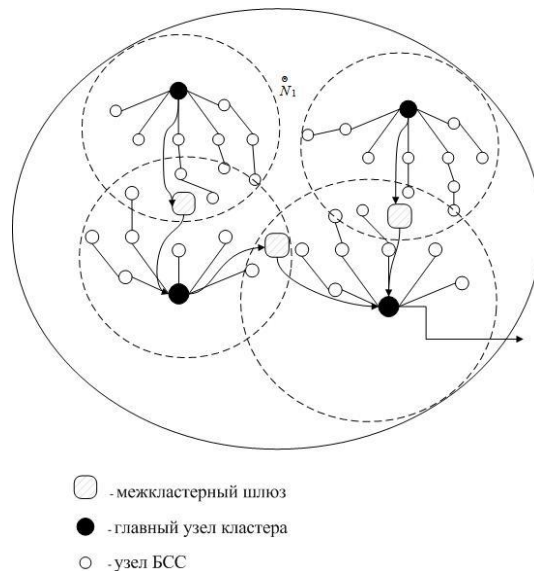


Рисунок 7 – Организации передачи данных внутри пикосети с многоинтервальной кластеризацией через межкластерные шлюзы

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 – увеличения срока службы узлов без замены источника питания. Следовательно, удастся добиться и уменьшения энергопотребления всей БСС, за счет того, что узлы тратят меньше энергии во время передачи данных. 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, 36] и положительный эффект от оптимизации уровня мощности радиопередатчика показан в работе Жевака А. В. [20].

**Постановка задачи кластеризации в пикосети**

Существующие иерархические протоколы маршрутизации БСС, такие как LEACH, PEGASIS, TEEN and APTEEN, SOP объединяют узлы в кластеры с определенной иерархией [1].

Одним из вариантов топологии сети ZigBee является топология «Кластерное дерево», рис. 8, где сеть БСС разбивается на кластеры CID0-CID5 (CID - cluster identifier), в кластере CID0 находится координатор сети. На рис. 8 главные узлы кластеров обозначены CLH1 - CLH5 (CLH – cluster head) в кластерах CID1-CID5, а в кластере CID0 главным узлом кластера выступает координатор БСС.

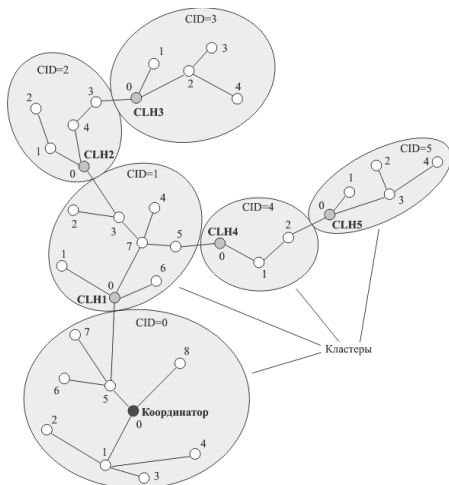


Рисунок 8 – Пример БСС с топологией «Кластерное дерево»

При формировании сети координатор посылает всем соседним устройствам широковещательную команду. Затем узлы запрашивают разрешение на присоединение к кластеру. Если сетевой координатор разрешает, то устанавливается связь с узлом, который начинает периодически посылать команды для присоединения других устройств.

При таком подходе:

- формирование сети производит узел-координатор. Координатор принимает решение о принятии узла в кластер и назначает узлы главами кластеров. В результате возрастает время образования сети;

- формируемая структура сети может быть не оптимальной.

В некоторых случаях разделение сети на кластеры может производиться на основании определенных критериев, например таких как:

- географическое местоположение узлов (узлы, которые расположены рядом друг с другом);

- уровень заряда батарей;

- мощность сигнала (узлы попадают в один кластер на основании радиовидимости);

- номера узлов (при стационарной топологии);

- на основе предыдущей информации об их функционировании (LEACH – алгоритм для выбора ГУК);

- загруженность узлов информационным потоком;

- загруженность соседних узлов в рамках «Зоны покрытия пикосети»  $Z$ .

Кластерная организация считается эффективной и масштабируемой только при условии рационального выбора головного узла в кластерной сети в конкретный момент времени. В действительности являющийся головным в момент времени  $t_1$  сенсорный узел не обязательно должен

быть им же в момент времени  $t_2$ , ибо существующий головной узел уже может затратить достаточно большое количество энергии на передачу сообщений от всех сенсорных узлов кластера к моменту времени  $t_2$ . Поэтому в момент времени  $t_2$  головным узлом в кластере может быть назначен и иной сенсорный узел, сохранивший к этому времени наибольший энергетический запас [11].

Объединение большого количества узлов в сеть, требования по минимизации энергопотребления узлов и сети в целом приводят к необходимости дополнительных структурных решений при создании беспроводных сенсорных сетей. Важнейшим из них является кластеризация сети, предполагающая к тому же постоянную ротацию головного узла кластера в течение жизненного цикла сети.

Существует множество разнообразных алгоритмов выбора головного узла кластера [7, 9, 11], но поскольку этот выбор может зависеть и от области использования БСС, задача создания новых алгоритмов становится одной из самых актуальных. Дополнительное объединение кластеров в пикосеть позволяет получить преимущество, которое присуще иерархическому методу построения БСС.

### Определения элементов зоны покрытия пикосети

Для любого сенсорного узла  $N$  существует такая область  $S(N)$ , называемая зоной чувствительности (sensitivity area), которая 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  $N_j$  находится в зоне радиовидимости  $N_i$ , называется радиусом связи  $R_{radio}$  узла  $N_j$ , 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, что определяется радиусом действия  $R_s$ , принадлежит, по крайней мере, одному сенсору из S, рис. 9.

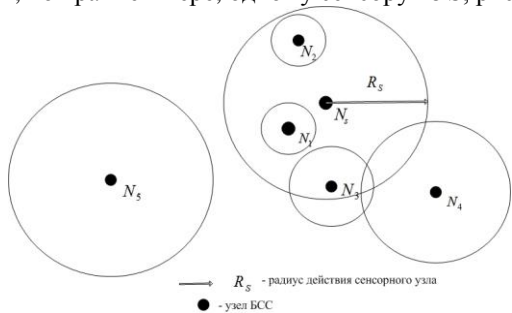
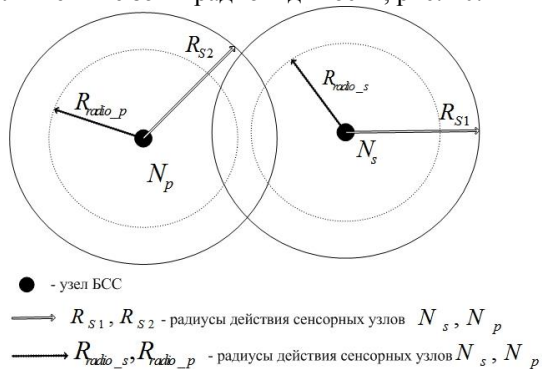


Рисунок 9 – Окружение сенсорного узла  $N_s$

Из рис. 9 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  $N_5$  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 [33, 34]: больше или меньше зоны радиовидимости, рис. 10.



● - узел БСС  
 $\rightarrow R_{S1}, R_{S2}$  - радиусы действия сенсорных узлов  $N_s, N_p$   
 $\rightarrow R_{radio_s}, R_{radio_p}$  - радиусы действия сенсорных узлов  $N_s, N_p$

Рисунок 10 – Радиусы действия и радиосвязи при отсутствии прямой радиовидимости

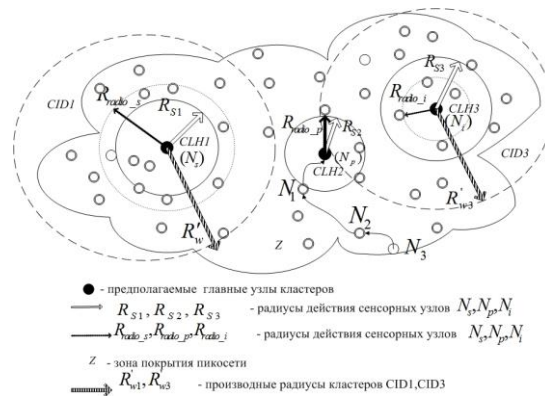
Это означает, что два соседних узла могут не иметь возможности обмениваться информацией напрямую, даже если радиусы действия их сенсоров пересекаются.

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 определенное количество промежуточных узлов w. Определить производный радиус кластера можно из выражения (8):

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

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. 11), которая определяется суммой площадей или объемов (в трехмерном пространстве) зон кластеров и зависит от количества кластеров, что входят в пикосеть, а также от выбора принципа формирования производного радиуса кластера  $R'_w$ .



● - предполагаемые главные узлы кластеров  
 $\rightarrow R_{S1}, R_{S2}, R_{S3}$  - радиусы действия сенсорных узлов  $N_s, N_p, N_i$   
 $\rightarrow R_{radio_s}, R_{radio_p}, R_{radio_i}$  - радиусы действия сенсорных узлов  $N_s, N_p, N_i$   
 Z - зона покрытия пикосети  
 $\rightarrow R'_w1, R'_w3$  - производные радиусы кластеров CID1, CID3

Рисунок 11 – Процесс сбора данных в рамках зоны Z

Как видно из рис. 11, узлы  $N_s, N_p, N_i$  имеют разные радиусы действия  $R_s$  и радиус радиосвязи  $R_{radio}$ :

$$\begin{aligned} N_s &\Rightarrow R_{S1} < R_{radio_s}, \\ N_p &\Rightarrow R_{S2} = R_{radio_p}, \\ N_i &\Rightarrow R_{S3} = R_{radio_i}. \end{aligned} \quad (12)$$



Из выражения (12) видно, что радиус действия  $R_{s1}$  узла  $N_s$  меньше, чем радиус радиосвязи  $R_{radio_s}$ , но кластер CID1 (рис. 11) образован не на основе радиуса радиосвязи, а на основе производного радиуса кластера  $R'_w$ . Количество промежуточных узлов  $w1$ , которые принимают участие в передаче от узла, входящего в кластер CID1, будет зависеть 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. 11 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  $t$  определяется для всей пикосети, например,  $N_2$ . Из рис. 11 видно, что для узла  $N_p$   $w = 2$  (узлы  $N_1, N_2$ ) а количество итераций  $t = 3$ .

### Алгоритм выбора головного узла кластера

В системах мониторинга одним из важнейших требований является его непрерывность, т. е. обеспечение мониторинга параметров на всем пространстве или процессе. Исходя из сказанного, стоит цель разработать алгоритм выбора головного узла кластера, который обеспечивал бы лучшее покрытие заданной для мониторинга области пространства в течение достаточно длительного периода времени.

Этот подход означает оптимизацию, как срока жизни сенсорной сети, так и оптимизацию выполнения сенсорной сетью своих функциональных задач с заданным качеством обслуживания в течение достаточно длительного периода времени.

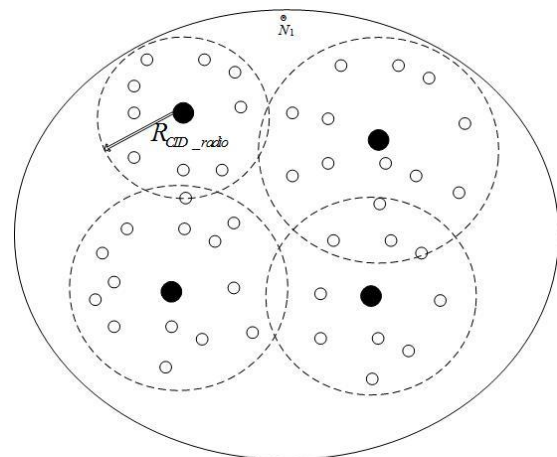
В работе [42], предложен новый алгоритм выбора головного узла кластера для трехмерного пространства, а также проведено его моделирование и доказана эффективность по сравнению с существующим базовым алгоритмом LEACH.

В работе [40], предложен алгоритм выбора головного кластерного узла с использованием нечеткой логики и диаграмм Вороного для все-

проникающих сенсорных сетей (CHS-FL-VD). Проведено сравнение с известными алгоритмами LEACH и Fuzzy C-Means.

Для выбора головного узла кластера, который входит в пикосеть предлагается использовать алгоритм предложенный в работе [17].

В алгоритме выбора головного узла кластера вводят понятие кластерного радиуса  $R_{CID\_radio}$  [2], рис. 12.



→  $R_{CID\_radio}$  - кластерный радиус

● - главный узел кластера

○ - узел БСС

Рисунок 12 – Кластерная БСС с параметрами кластерного радиуса

Подход показанный на рис. 9 вносит упорядоченность в структуру кластерной БСС. В то же время, он накладывает ограничения, так как любой сенсорный узел в пределах своего кластера должен обращаться только к головному узлу напрямую, в то время как передача информации от головного узла к шлюзу может быть и многошаговой.

Алгоритм вначале собирает информацию об остаточной энергии для всех сенсорных узлов, если остаточная энергия  $E_n$  (где  $n$  –  $n$ -й узел БСС) – сенсорного узла равна 0, то этот узел, естественно, исключается из дальнейшего функционирования в беспроводной сенсорной сети. Информация об остаточной энергии рассылается каждым сенсорным узлом в области  $2 \times R_s$ , где  $R_s$  – радиус действия сенсорного узла в сети для выполнения функций мониторинга.

Каждый из сенсорных узлов ожидает окончания активизации сети и затем может объявить себя новым головным узлом в кластере для исходящих соединений. Это происходит в том случае, если за время активации сенсорный узел не получил никаких информационных сообщений от любых других узлов, объявивших себя головными.

При объявлении себя головным узлом сенсорный узел рассылает это информационное сообщение всем сенсорным узлам, находящимся в пределах расстояния  $R_{CID\_radio}$ .

Принятие решения об объявлении себя головным узлом осуществляется на основе возможности обеспечения лучшего покрытия и наличия достаточной энергии [2]:

$$E(n) > E_{th\_cid}, \quad (14)$$

где  $E_{th\_cid}$  – пороговое значение необходимой энергии для головного узла в кластере.

Информационное сообщение должно содержать информацию о местонахождении нового головного узла кластера. После получения сообщения от нового головного узла кластера все сенсорные узлы в пределах кластера исключают себя из дальнейшего рассмотрения на роль головного узла.

При таком алгоритме каждый сенсорный узел должен содержать таблицу всех головных узлов, от которых он получил информационное сообщение об объявлении себя головным, на доступном для узла расстоянии. Эта информация используется сенсорным узлом для принятия решения о том, членом какого кластерного узла этот узел будет. Иногда, два сенсорных узла с подходящими характеристиками объявляют себя головными в пределах одного и того же  $R_{CID\_radio}$ . Тогда головной узел в конечном итоге определяется по наибольшей остаточной энергии.

Предлагается дополнить существующий алгоритм, который рассматривался в работах [11, 17], введением в него производного радиуса кластера  $R'_w$  вместо радиуса  $R_{CID\_radio}$ . Таким образом, возможно при помощи управления количеством промежуточных узлов  $w$  расширить зону действия определённого кластера и уменьшить потребление энергии БСС на площади.

### **Минимизация информационного потока в беспроводной сенсорной сети**

Для минимизации энергопотребления в БСС может быть использован метод агрегации данных. В том случае, когда координатору требуется определить интегральную характеристику для какого-либо участка сети, один из узлов этого участка назначается агрегатором. Агрегатор собирает с остальных узлов участка частные значения определяемой характеристики, вычисляет агрегатную функцию и передает это значение координатору сети. При этом общие затраты на передачу информации существенно ниже, чем при отсутствии агрегатора.

Следует отметить, что в случае кластеризации БСС агрегатор собирает информацию от го-

ловных узлов кластеров. При этом происходит дополнительное снижение передачи избыточной информации.

Известны два подхода к обеспечению надежной агрегации. Первый основан на распределенности процесса агрегации путем вовлечения в него дополнительных сенсоров. Второй способ основан на усложнении протокола взаимодействия между координатором и агрегатором.

Интервал времени передачи данных зависит от используемых коммуникационных моделей, которые могут быть классифицированы как: постоянные, активирующиеся по событию, активирующиеся по требованию, гибридные в зависимости от сферы применимости БСС. В постоянной модели опрашиваются все датчики с определенной периодичностью до тех пор, пока они работоспособны. В моделях, активирующихся по событию, датчики начинают передачу снятых данных только при наступлении определенного события. В модели, которая работает по требованию (запросу), снятые данные передаются только по запросу пользователя.

Оптимальное положение агрегатора в пикосети на месте межкластерного шлюза, рис. 7. Такое положение позволяет агрегатору связаться минимум с двумя ГУК в рамках пикосети.

Использование агрегатора в БСС способствует как снижению объема передаваемых данных внутри пикосетей, так и повышению надежности получаемых данных.

### **Алгоритм управления информационным потоком**

Современная беспроводная сенсорная сеть – это объект высокой структурной сложности с большим количеством элементов, а это приводит к необходимости решения задач, относящихся к теории массового обслуживания. К таким задачам относятся и вопросы управления информационными потоками в сети.

Предложенная модель сбора информации в БСС образует отдельные множества информационных потоков:

- потоки внутри кластера;
- потоки между кластерами в рамках пикосети;
- потоки между пикосетями.

Предлагается отдельно рассмотреть алгоритмы управления информационными потоками в каждой из организационных структур.

Для управления потоком внутри кластера предполагается использовать идею Fisheye State Routing (FSR) [12], и алгоритм, построенный на ее основе [12, 23]. Идея алгоритма FSR состоит в следующем: каждый узел строит карту топологии (topology map) [12] сети, включающую в себя список соседей, топологию сети, список предпочти-

тельных ретрансляторов для маршрутов и таблицу расстояний до узлов-получателей.

FSR (Fish-eye State Routing) относят к пре-активным протоколам маршрутизации. В таких протоколах при изменении топологии сети иницируется широковещательная рассылка сообщений об этих изменениях. Все маршруты хранятся в памяти каждого узла БСС. Узел может воспользоваться маршрутом в любой момент. В виду того, что, фактически, каждый узел имеет граф связности сети, возможно построение кратчайшего маршрута, к примеру, по алгоритму Дейкстры [29] или алгоритму Флойда [30]. Одной из проблем возникающей в БСС, как отмечено в работе [35], является проблема низкой связанности, которая заключается в дроблении сети на не связанные между собой группы узлов. При низкой связанности сети рекомендуется использовать метод коллективной передачи информации [35], направленный на решение проблемы связности через использование идеи, что близко расположенные друг к другу узлы объединяются для синхронной передачи данных на другой узел или координатор БСС.

Изложенный принцип адаптируем и наложим ограничение, что узлы строят карту топологии не всей БСС, а только пикосети, в которую они входят. Такое ограничение оправдано, так как частота обмена сообщениями с маршрутной информацией падает по мере увеличения числа пролетов между узлами. Поэтому, во-первых, уменьшается объема передаваемых служебных сообщений, как показано при моделировании [28] и, во-вторых, по мере приближения к получателю точность и актуальность маршрутной информации будет возрастать, как показано в работе [12]. Этот подход позволяет значительно снизить объем передаваемого служебного трафика, особенно в сильно мобильных сетях, сохранив при этом низкую вероятность ошибки при выборе маршрута передачи для пакета.

Предложенный алгоритм на основе FSR обновляет карту топологии сети в зависимости от расстояния:

- узлы передают Link-статус каждому узлу в пикосети;
- каждый узел периодически транслирует сообщения с обновлением для своих соседей в рамках пикосети;
- обновление узлов входящих в свой кластер происходит чаще, чем в пикосети.

Для управления информационным потоком внутри пикосети предлагается использовать принцип гибридной маршрутизации [13]. Основная идея гибридных протоколов маршрутизации – использование активной маршрутизации в некоторых районах сети в определенное время и реактивной маршрутизации для остальной части сети [14]. Также гибридный подход заключается в том,

что при поиске маршрутов между узлами учитываются вероятности нахождения узлов в состоянии включенной или выключенной связи. В отличие от других алгоритмов маршрутизации, в которой предполагается, что все связи имеют одинаковую длину, здесь у каждой связи есть своя длина, зависящая от статистического поведения связи.

Для управления множеством информационных потоков  $I$ , которые возникают между пикосетями, предлагается использовать метод множественных родителей, в котором сообщения передаются не по одному маршруту, как в классических случаях, а двумя или более узлами пикосети. Это позволяет передавать сообщения от узлов пикосети (родительские узлы) к координатору БСС в  $g$  раз быстрее ( $g$  – количество родителей). Также в случае необходимости для удаленной пикосети можно применить идею когерентного сложения мощностей [35], что позволит решить проблему исключения пикосети из БСС.

При разработке методов управления информационными потоками существенное значение имеет выбор математической модели для описания структуры беспроводной сенсорной сети. Предложенная модель на основе гиперграфа и разбиение БСС на пикосети и кластеры позволяет использовать целый ряд ранее не совместимых вместе алгоритмов в рамках одной БСС, как результат более гибкую и адаптируемую сеть. Адекватность модели можно проверить при помощи имитационного моделирования [15], также перед развертыванием БСС желательно определить дальность связи узлов БСС [16]. Применение приоритетной передачи данных и формирование очереди обслуживания на основании приоритетов, показало уменьшение задержек [28] при передаче высокоприоритетных пакетов.

Таким образом, алгоритм управления информационными потоками в БСС состоит из трех:

- алгоритм FSR для управления потоком внутри кластера;
- алгоритм гибридной маршрутизации для управления информационным потоком внутри пикосети;
- алгоритм множественных родителей для управления информационными потоками, которые возникают между пикосетями БСС.

## Результаты исследований

Для изучения протоколов передачи данных в телекоммуникационных сетях широко используется метод дискретно-событийного имитационного моделирования, позволяющий представить процесс функционирования системы как последовательность событий. Сегодня для решения задач дискретно-событийного имитационного моделирования сетей связи существует достаточно ши-

рокий спектр программных средств: от библиотек функций, для стандартных компиляторов, до специализированных языков программирования [15].

Разработанная модель БСС с применением кластеризации основана на идее разбиения сети на пикосети и представления беспроводной сенсорной сети в виде гиперграфа. В отличие от существующих [1, 2, 8, 9, 11–14], в данной модели для рационального использования кластерной структуры введено понятие производного радиуса кластера. Применение производного радиуса кластера  $R'_w$  является выходом при низкой связности сети и позволяет уйти от ситуации дробления сети на автономные участки. Такой подход обеспечивает более длинный жизненный цикл сети по сравнению с базовым алгоритмом LEACH [29].

Также впервые предложено разбиение БСС на пикосети с последующей кластеризацией. Такая структура сети позволяет реализовать идею когерентного сложения мощностей [35], при которой БСС разбивается на кластеры – группы узлов, излучение передатчиков которых может быть синхронизировано по частоте и стабилизировано по фазе.

Предложенная модель сбора информации в БСС образует отдельные множества информационных потоков:

- потоки внутри кластера;
- потоки между кластерами в рамках пикосети;
- потоки между пикосетями.

Для управления потоком внутри кластера предполагается использовать идею Fisheye State Routing (FSR) [12].

Для управления информационным потоком внутри пикосети предлагается использовать принцип гибридной маршрутизации [13].

Для управления множеством информационных потоков  $I$ , которые возникают между пикосетями, предлагается использовать метод множественных родителей.

Использование агрегатора в БСС способствует как снижению объема передаваемых данных внутри пикосетей, так и повышению надежности получаемых данных.

### **Практическое значение результатов разработки модели БСС и подходов к управлению информационными потоками в БСС**

Для Возможности использования сенсорных сетей распространяются на многие сферы деятельности. В качестве наиболее очевидных областей их применения эксперты называют промышленный мониторинг, автоматизацию строений («умный дом»), логистику, здравоохранение, системы безопасности и оборону.

Разработанная модель БСС на основе пикосетей может быть применена в каждой из сфер деятельности. Использование целого ряда ранее не совместимых вместе алгоритмов управления информационными потоками в рамках одной БСС позволяет гибко адаптировать принципы и модели сбора информации в БСС.

Беспроводные сенсорные сети имеют ограниченную вычислительную мощность узлов и каналы передачи данных, что накладывает ограничение на пропускную способность каждого узла БСС. Размер трафика в сети также влияет на дальность и стабильность связи. Поэтому вопрос оптимизации сбора информации в БСС есть актуальным. Проблема организации и оптимизации сбора данных в беспроводных сенсорных сетях активно изучается учёными из разных стран мира. Результатом работ по стандартизации БСС стало семейство стандартов IEEE 802.15.4 [6]. Анализ стандартов и протоколов, разработанных на их основе, показал, что наиболее эффективным и широко применимым протоколом для построения различных БСС является протокол ZigBee. Для интеграции существующих БСС в IP-сети возможно использовать протокол 6LoWPAN, а также совместимость шлюза между IPv6, и 6LoWPAN.

Анализ существующих моделей сбора [1-2, 8, 9, 11-14] информации в БСС показал, что в зависимости от выбора модели сбора происходит ограничение применимости БСС. В тоже время не существует модели сбора, которая способна с некоторыми ограничениями использоваться для различных сфер применения БСС. Единственной моделью, частично удовлетворяющей это условие, в некотором приближении, есть гибридная. Разработанная модель БСС на основе гиперграфа позволяет решить эту проблему.

Механизмы уменьшения потребления энергии узлом БСС зависят от модели сбора информации.

Также на потребление узла влияет алгоритм работы узла, построенный по модели сбора информации. Например, в работе [32] предлагается схема сохранения энергии за счет зоны чувствительности, предполагающая отключение сенсора, если его зона чувствительности покрывается другим сенсором.

Создание модели БСС актуально и определяется необходимостью на ее основе разработки алгоритма управления потоками данных в БСС. Использование новой модели сбора данных позволит создать качественно новую сеть, существенно расширяя перечень возможных решаемых ею задач в условиях неопределенности и обеспечивающую повышение адекватности и объективности получаемых данных при низких энергетических затратах.

Разработка эффективных моделей и алгоритмов сбора информации для беспроводной сенсорной сети позволит сократить время сбора данных с её сенсорных узлов, а также их энергопотребление. Благодаря этому повысится эффективность беспроводной сенсорной сети и её ресурс работы в автономном режиме.

### **Заключение**

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.

Была поставлена задача кластеризации БСС и найдено ее решение на основе определения элементов зоны покрытия пикосети.

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.

Адаптирован алгоритм выбора головного узла кластера с учетом порогового значения необходимой энергии для головного узла и введенного понятия производного радиуса кластера в пикосети. Для минимизации информационного потока в БСС обосновано использование метода агрегации данных на базе агрегатора сети, подчиненного координатору БСС.

Оптимальное положение агрегатора в пикосети определено на месте межкластерного шлюза. Такое положение позволяет агрегатору связаться минимум с двумя ГУК в рамках пикосети.

Предложены подходы управления информационным потоком в кластерах, пикосетях и между ними.

Для управления потоком внутри кластера предполагается использовать идею Fisheye State Routing (FSR).

Для управления информационным потоком внутри пикосети предлагается использовать принцип гибридной маршрутизации.

Для управления множеством информационных потоков, которые возникают между пикосетями, предлагается использовать метод множественных родителей, в котором сообщения передаются не по одному маршруту, как в классических случаях, а двумя или более узлами пикосети.

### **Список использованной литературы**

1. Терентьев М. Н. Модель беспроводной сенсорной сети с режимом сбережения энергии и синхронизацией шкал времени [Текст] / Вестник Московского авиационного института. – Москва: МАИ, 2009. – Т. 16. – № 4. С. 79–84
2. Иванова, И. А. Определение периметра зоны покрытия беспроводных сенсорных сетей [Текст] / 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 [Текст] / 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. Sushruta M. Study of Cluster Based Routing Protocols in Wireless Sensor Networks [Текст] / M. Sushruta, R. Alok, K. Abhishek, C. Vishal, V. Preksha, B. Lalit // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2012. – Volume 3, Issue 7, – P. 413 - 420
8. Chen Y., Energy-balancing multipath routing protocol for wireless sensor networks [Текст] / 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

9. 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
10. Олифер В. Г., Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. [Текст] / В. Г. Олифер, Н. А. Олифер; СПб.– Питер, 4-е издание, 2010. – 943 с.
11. Кучерявый, А. Е. Выбор головного узла кластера в однородной беспроводной сенсорной сети [Текст] / А. Е. Кучерявый, А. Салим // Электросвязь, 2009. — №8. – С. 32-36.
12. Guangyu Pei, Fisheye State Routing in Mobile Ad Hoc Networks [Текст]/ Guangyu Pei, Mario Gerla, Tsu-wei // International Conference on Distributed Computing Systems - ICDCS(Workshop). Workshop on Wireless Networks and Mobile Computing April 2000. – Taipei: Taiwan, 2000. – P. D71-D78.
13. The Zone Routing Protocol for Ad Hoc Networks [Электронный ресурс] / IETF Internet Draft. – Режим доступа: [www/ URL: http://tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt](http://www.tools.ietf.org/id/draft-ietf-manet-zone-zrp-04.txt) / – 15.07.2014 г. – Загл. с экрана.
14. Abolhasan M., Performance Investigation on three-classes of MANET routing protocols [Текст] / M. Abolhasan, T. Wysocki, J. Lipman // Asia-Pacific Conference on Communications. – 2005.– 03-05 Oct. 2005.– P. 774 – 778. doi: 10.1109/APCC.2005.1554167
15. Галкин П. В. Адекватность моделей беспроводных сенсорных сетей в средах имитационного моделирования [Текст] / 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>.
16. Галкин П. В. Исследование влияния лесных массивов на дальность связи в сетях ZigBee [Текст] / П. В. Галкин, Л. В. Головкина, А. С. Борисенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 3, №2(51). – С. 4–9. doi: 10.15587/1729-4061.2011.1486.
17. Салим Ахмед Абд Эльфтах, Разработка алгоритмов выбора головного узла в кластерных беспроводных сенсорных сетях [Текст]: дис. ... к. т. н.: 05.12.13 / А. Салим. – М., 2010.– 106 с.
18. Макаренко, С. И., Моделирование обслуживания нестационарного информационного потока системой связи со случайным множественным доступом [Текст] / С. И. Макаренко, М. А. Татарков // Информационно-управляющие системы.– Санкт-Петербург: ГУАП, 2012. – № 1. С. 44–50.
19. Крутолапов, А. С., Обеспечение качества обслуживания в сетях информационного обмена [Текст] / Вестник ВИ ГПС МЧС России.– Воронеж, 2013. – № 1. С. 18–22.
20. Жевак, А. В. Оптимизация сбора данных в беспроводных сенсорных сетях с использованием нейронной сети с градиентным алгоритмом обучения [Текст] / В. Ю. Арьков, А. М. Фридлянд, А. В. Жевак // Нейрокомпьютеры: разработка, применение.– 2007.– №10.– С. 47–49.
21. Восков, Л. С. Позиционирования датчиков беспроводной сенсорной сети как способ энергосбережения [Текст] / Л. С. Восков, М. М. Комаров // Датчики и системы. 2012. № 1. С. 34-38.
22. Zhang, Xuyuan, Model Design of Wireless Sensor Network Based on Scale-Free Network Theory [Текст] / Zhang, Xuyuan // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2009. WiCom '09. 5th International Conference on 24–26 Sept. 2009, Beijing, China.– Beijing.– 2009.– P. 1-4. doi: 10.1109/WICOM.2009.5303044
23. Songhua Hu, Power control strategy for clustering wireless sensor networks based on multi-packet reception [Текст] / Songhua Hu, Jianghong Han // Wireless Sensor Systems, IET.– 2014.– Vol. 4 No.3.– P. 122-129 doi: 10.1049/iet-wss.2013.0108
24. Агеев, Д. В. Моделирование информационных потоков в мультисервисной сети NGN при решении задач параметрического [Текст] Д. В. Агеев, А. Н. Копылев // Радиоелектроніка, інформатика, управління.– Запорожський національний технічний університет.– 2010. – № 2 (23). С. 48–52.
25. Иваненко В. А. Анализ протоколов передачи данных от узлов в беспроводных сенсорных сетях [Текст] / В. А. Иваненко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 2, №10(50).– С. 9–12.
26. Чекменев, В. А. Многокритериальная оптимизация систем обслуживания с ожиданием, функционирующих в условиях конкуренции входящих потоков [Текст] / В. А. Чекменев, Т. Д. Чекменева // Вестник Кемеровского государственного университета.– 2013.– №2-1 (54).– С. 97– 102
27. Галкин П. В. Аналіз моделей та оптимізації збору інформації в бездротових сенсорних мережах [Текст] / П. В. Галкин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– 2014. – Т. 5, №9(71).– С. 24–30 doi: 10.15587/1729-4061.2014.28008
28. Тараканов, Е. В. Экспериментальные исследования протокола передачи данных с приоритетами в беспроводной сенсорной сети в системе TOSSIM [Текст] / Е. В. Тараканов // Известия Томского политехнического университета.– 2012.– Т. 321, №5.– С. 223 - 227
29. Борисенко А. С. Методы оптимизации для mesh сети в ZigBee [Текст] / А. С. Борисенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий.– 2013.– Т. 1, № 9 (61). С. 24-29.

30. Гадышев В. А. Алгоритм распределения потоков в сетях передачи данных [Текст] / В. А. Гадышев, А. С. Крутолапов, Д. А. Сычев // Системы управления и информационные технологии.– 2011.– Т. 46, № 4.1.– С. 128-131.
31. Jiong Jin Application-Oriented Flow Control for Wireless Sensor Networks [Текст] / Jiong Jin, Wei-Hua Wang, Marimuthu Palaniswami // Networking and Services, 2007. ICNS. Third International Conference on 19-25 June 2007.– Athens.– 2007.– P 71 - 77 doi: 10.1109/ICNS.2007.37
32. Krishnamchari B. Networking Wireless Sensors [Текст] / B. Krishnamachari.– Cambridge: Cambridge University Press, 2005.– 202 p.
33. Chuanlin Zhang Constructing low-connectivity and full-coverage three dimensional sensor networks [Текст] / 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
34. Bai X. Full-Coverage and k-Connectivity (k=14,6) Three Dimensional Networks [Текст] / 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
35. Садков А. Н. Анализ связанности сенсорной сети с коллективной передачей информации [Текст] / А. Н. Садков, К. Г. Мишагин, В. А. Пастухов, А. Л. Умнов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского.– 2008.– № 6.– С. 70–76
36. Галкин П. В. Анализ энергопотребления узлов беспроводных сенсорных сетей [Текст] / П.В. Галкин // ScienceRise.– 2014. – № 2 (2).– С. 55-61. doi: 10.15587/2313-8416.2014.27246.
37. Recommendation Y.1541 Network performance objectives for IP-based services [Текст].– 2011.– ITU-T.– P. 1- 66
38. Прокопьев А. В. Самоподобие нагрузки в беспроводных сенсорных сетях для приложения сбора данных [Текст] / А.В. Прокопьев //65-я научно-техническая конференция посвященная Дню радио. (Апрель 2010).– М.: 2010
39. Мутханна А. С. Модели трафика для приложений передачи изображений во всепроникающих сенсорных сетях [Текст] / А. С. Мутханна, А. В. Прокопьев // Электросвязь.– 2013.– №1.– С. 28-31
40. Аль-Наггар Я. М. Алгоритм выбора головного узла кластера для всепроникающих сенсорных сетей с использованием нечеткой логики и диаграмм Вороного [Текст] / Я. М. Аль-Наггар // Электросвязь.– 2014.– № 9.
41. Кучерявый, А.Е. Летающие сенсорные сети [Текст] / А.Е. Кучерявый, А.Г. Владыко, Р. В. Киричек, А.И. Парамонов, А.В. Прокопьев, И.А. Богданов, А.А. Дорт-Гольц // Электросвязь, 2014. — №9. – С. 2-5.
42. Абакумов П. А. Алгоритм выбора головного узла кластера сенсорной сети в трехмерном пространстве [Текст] / П. А. Абакумов // Электросвязь.– 2014.– № 4.– С. 17-19.

Надійшла до редакції 05.03.2015

## П. В. ГАЛКІН

Харківський національний університет радіоелектроніки, м.Харків

### МОДЕЛЬ І АЛГОРИТМ УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ В БЕЗДРОВОЇ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У статті запропонована модель бездротової сенсорної мережі (БСМ) на основі теорії гіперграфів із застосуванням кластеризації мережі. Виявлено, що основним чинником, що впливає на тривалість, швидкість і живучість мережі, є інформаційні потоки між усіма вузлами. Введено поняття пікомережа. Сформульовано задачу кластеризації БСС та отримано її рішення на основі визначення елементів зони покриття пікомережі. Процес збору даних з усієї пікомережі здійснюється в рамках зони Z, яка визначається сумою площ зон кластерів і залежить від кількості кластерів, які входять до пікомережі. Також запропоновано алгоритм вибору головного вузла кластера з урахуванням порогового значення необхідної енергії для головного вузла з використанням введенного поняття похідного кластерного радіуса в пікомережі. Для мінімізації інформаційного потоку в БСМ обґрунтовано використання методу агрегації даних на базі агрегатора мережі, підпорядкованого координатору. Запропоновано підходи управління інформаційним потоком в кластерах, пікомережі і між ними. Для управління потоком всередині кластера передбачається використовувати ідею Fisheye State Routing (FSR). Для управління інформаційним потоком всередині пікомережі пропонується використовувати принцип гібридної маршрутизації. Для управління безліччю інформаційних потоків, які виникають між пікомережами, пропонується використовувати метод множинних батьків, в котрому повідомлення не передаються через один і той же маршрут, як у класичному випадку, а через два або більше вузла пікомережі.

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, збір інформації, гіперграф, модель, похідний радіус кластера, кластеризація, пікомережа.

**P.V. GALKIN**

Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv

**MODEL AND ALGORITHM INFORMATION MANAGEMENT IN WIRELESS SENSOR NETWORK**

The paper proposes a model of the wireless sensor network (WSN) based on the theory of hypergraphs with the use of clustering network. The main factor influencing the duration, speed and network survivability are information channels between all nodes. The concept of a piconet was introduced. We formulated the problem of clustering FSU and obtained its solution on the basis of determining the elements of the coverage piconet. The process of collecting data from the entire piconet is carried out within the zone Z, which is determined by the sum of the areas of zones and clusters and depends on the number of clusters that are included in the piconet. We also proposed an algorithm for selection of the cluster head node based on the threshold value of the necessary energy for the headend using a derivative of this concept of cluster radius in the piconet. To minimize the information flow in the FSU we justified the use of the method of data aggregation based on network aggregator subordinate coordinator. We propose the approaches for management of information-flow both in clusters and between piconets. To control the flow within the cluster it is supposed to use the idea of Fisheye State Routing (FSR). To control the information flow within the piconet we offer using the principle of hybrid routing. For the management of multiple information streams, that occur between piconets, we propose a method of multiple parents, in which the messages are not transmitted through the same route as in the classical case, but through two or more nodes of a piconet.

**Keywords:** *wireless sensor networks, information gathering, hypergraph model, derived cluster radius, clustering, piconet.*