

УДК 681.3: 658.56.

Ю.А. Кулаков, В.В. Воротников

Энергоэффективная иерархическая маршрутизация в самоорганизующихся динамических сетях

Предложен способ кластеризации узлов динамической сети, используемый для иерархической маршрутизации. Для выравнивания нагрузки на контроллеры кластеров реализована процедура самоорганизации коллизионных узлов. Приведена оценка эффективности самоорганизации мобильной сети по критерию суммарной энергетической эффективности передачи информации между узлами.

The method of clusterization of the dynamic network knots, used for the hierarchical routing, is offered. For smoothing of loading on clusters inspectors the procedure of the collision knots self-organizing is carried out. An efficiency estimation of the self-organizing mobile network is based on the criterion of total power efficiency of the information transfer between knots.

Запропоновано спосіб кластеризації вузлів динамічної мережі, яка використовується для ієрархічної маршрутизації. Для вирівнювання навантаження на контролери кластерів реалізовано процедуру самоорганізації колізійних вузлів. Подано оцінку ефективності самоорганізації мобільної мережі за критерієм сумарної енергетичної ефективності передачі інформації між вузлами.

Введение. *Mesh*-сети – новый класс широкополосных беспроводных сетей передачи мультимедийной информации находит широкое применение при построении локальных и распределенных беспроводных сетей (альтернатива *WiMAX*), при разворачивании мультимедийных сенсорных сетей и т.д.

Одним из главных принципов построения *mesh*-сети (стандарт *IEEE 802.11s*) есть принцип самоорганизации архитектуры, обеспечивающий такие возможности, как реализацию топологии сети *каждый с каждым*; устойчивость сети при отказе отдельных компонентов; масштабируемость сети – увеличение зоны информационного покрытия в режиме самоорганизации; динамическую маршрутизацию трафика, контроль состояния сети и т.д. [1–3].

Постановка проблемы

К достоинствам архитектуры *mesh*-сети относят: большую площадь и равномерность радиочастотного покрытия; мобильность – возможность установки на движущиеся транспортные средства (40...70 км/ч); живучесть – способность сети быстро самовосстанавливаться

при потере отдельных *mesh*-соединений; дешевые и доступные абонентские устройства.

Однако такие ограничения, как наличие автономных источников питания, обуславливающих длительность и/или дальность действия мобильных узлов; существующее конечное количество переприемов (*hops*) по *mesh*-сети до входа в проводную сеть не должно превышать трех–четырёх (иначе возрастает задержка, падает качество голосовой связи и снижается пропускная способность); наличие большего (в сравнении с не-*mesh* широкополосной беспроводной сетью) числа точек входа в проводную сеть при той же площади охвата, повышают актуальность решения некоторых задач маршрутизации [2]:

- поиска оптимальных маршрутов. Оптимальным считается маршрут доставки пакетов информации от узла–отправителя до узла–назначения, требующий минимальных суммарных затрат ресурсов (например, энергии) входящих в него узлов;

- маршрутизации с обеспечением максимального времени жизни сети, подразумевается срок ее эксплуатации до первого выхода из строя одного из узлов по причине истощения автономного источника питания. Решение этой задачи заключается в балансировке сетевого трафика в процессе передачи пакетов по всем не-

Ключевые слова: *mesh*-сеть, кластер, самоорганизация, иерархическая маршрутизация, энергетическая эффективность передачи.

обходимым маршрутам сети в целом и направлено на исключение образования точек повышенной нагрузки в узлах, входящих одновременно в несколько маршрутов.

Методы решения указанных задач должны поддерживать типы трафика *многие–к–одному* и *многие–ко–многим*, иметь распределенную реализацию с низкой алгоритмической сложностью и обладать высокой масштабируемостью.

Обзор последних исследований и публикаций

Проблеме маршрутизации в мобильных сетях посвящено множество исследований, анализирующих возможность применения протоколов маршрутизации трех классов: активных, реактивных и иерархических.

Активные протоколы [4] лучше работают, если топология сети меняется медленно. И наоборот, когда сеть слишком динамична (например, из-за большой подвижности узлов), эти протоколы переполняют сеть дополнительными сообщениями, стремясь сохранить полный набор таблиц маршрутизации, обновляемых, несмотря на слишком большие изменения сети во времени. Эти протоколы не могут работать при слишком больших изменениях сети во времени, обычно из-за слишком большой подвижности узлов и/или слишком большого размера сети.

Реактивные протоколы [5] ищут пути только тогда, когда они необходимы, тем самым сокращая потери на маршрутизацию в сравнении с активными протоколами. Таким образом, их потери растут с ростом сетевого трафика, а не с изменением сети. Такие схемы могут хорошо работать в высокодинамичных сетях, если величина трафика не слишком высока.

Необходимость нахождения полного пути в реальном времени есть существенным ограничением для обоих этих классов протоколов.

Для применения иерархических протоколов сеть разбивается на кластеры [6–10]. Маршрутизация в пределах кластера проводится любым из перечисленных методов. Однако построение маршрута к узлу, находящемуся вне кластера узла–источника, выполняется путем передачи данных к указанному шлюзовому уз-

лу. (Здесь шлюзовой узел относится к другому кластеру, а не к фиксированной сети, и шлюзовые узлы также есть мобильными узлами). Затем данные передаются от кластера к кластеру через шлюзовые узлы, которые должны решить задачу маршрутизации между кластерами, пока не будет достигнут кластер, в котором находится узел–адресат. Затем данные передаются в узел–адресат с использованием межкластерного протокола. Такая иерархическая маршрутизация реализует маршрутизацию, применяемую в статическом Интернете.

При иерархической маршрутизации в сетях исключается необходимость в определении полного пути перед передачей данных. Однако они сталкиваются с проблемами, аналогичными проблемам, возникающим в активных протоколах, т.е. они не могут работать в слишком больших сетях и/или в слишком динамичных сетях. Причина заключается в том, что необходимо неоднократно решать проблему сетевого масштаба: выбора того, как объединить узлы в иерархические кластеры и как проложить путь между кластерами [2, 7].

Таким образом, известные методы выполняют кластеризацию сети без учета текущей нагрузки в соседних кластерах, а значит непригодны для крупномасштабных сетей. Поэтому *цель статьи* – самоорганизация сети, исключая формирование кластеров с повышенной текущей нагрузкой и обеспечивающая максимальное время жизни сети.

Формулировка задачи исследования

Предположим, что существует сеть из N мобильных узлов

$$X = \{x_0, x_1, \dots, x_{N-1}\}, \quad (1)$$

с известной функцией изменения энергетической мощности радиомодуля ΔE_x для $\forall x_i, i = 1 \dots N$:

$$\Delta E_x = f(r, \Delta I), 0 \leq r \leq r_{\max}, \quad (2)$$

где r – расстояние между узлом x_i и контроллером кластера; ΔI – объем передаваемой информации; r_{\max} – максимально возможный радиус действия узла.

Необходимо:

- определить множество возможных контроллеров кластеров:

$$Y = \{y_0, y_1, \dots, y_m\}, m \leq N/2, \quad (3)$$

где m – количество кластеров, при котором сеть, состоящая из N мобильных узлов, связная;

- разбить сеть на множество непересекающихся кластеров Q с контроллерами, имеющими максимальную степень связности S :

$$Q = \{q_{y_0}, q_{y_1}, \dots, q_{y_m}\}, \quad (4)$$

$$\forall q_{y_i} \in X, \exists y_i : S(y_i) \rightarrow \max;$$

- провести самоорганизацию узлов, при которой формируются оптимальная структура кластеров в условиях перемещения узлов из одного кластера в другой, изменения мощности радиомодулей узлов или перемещения контроллера кластера.

Перераспределение узлов мобильной сети по кластерам приведёт к изменению маршрутов передачи данных и, соответственно, объема передачи служебной информации внутри кластеров при неизменных начальных условиях.

Таким образом, задача самоорганизации сети (или оптимизации распределения узлов сети по кластерам) сводится к минимизации функции энергетической эффективности передачи данных, которую можно представить в виде:

$$\mathcal{E} = \frac{\Delta E_{\text{центр}}}{\Delta E_{\text{кластер}}}, \quad (5)$$

где $\Delta E_{\text{центр}}$ – изменение мощности передачи данных узла при централизованном управлении сетью от объема информации ΔI ; $\Delta E_{\text{кластер}}$ – изменение мощности передачи данных узла при иерархическом управлении сетью от объема информации ΔI .

Для решения поставленной задачи в статье предлагается осуществить децентрализованную кластеризацию узлов мобильной сети в два этапа: инициализации сети и самоорганизации.

Для этого введем следующие ограничения:

- сеть должна быть связной, т.е. для всех узлов $\forall x_i, i=1 \dots N$ существовал хотя бы один контроллер кластера $\exists y_i : i \geq 1$, расстояние до ко-

торого l_{y_i} меньше максимального радиуса действия приемопередающего модуля $d(E_x) > l_{y_i}$;

- величина затухания сигнала обратно пропорциональна квадрату частоты сигнала или квадрату расстояния между узлами, и для изотропных передающей и приемной антенн мобильных узлов отношение мощности в точке приема P_R к мощности в точке передачи P_T рассчитывается без учета помех [7]:

$$P_R / P_T = (\lambda / 4\pi r)^2 = (c / 4\pi * \pi * f)^2, \quad (6)$$

где $c = 3 * 10^8$ м/с – скорость электромагнитных волн в вакууме; f – рабочая частота, r – расстояние между корреспондирующими узлами.

- максимальная скорость перемещения узлов должна быть одинакова.

Этап инициализации сети.

- Все узлы на максимальном энергетическом уровне рассылают HELLO-сообщение с целью определения доступных узлов в радиусе максимального действия соты.

- Определяется максимальное значение узлов, подлежащих кластеризации.

- Путем постепенного уменьшения мощности излучения модулей беспроводной связи узлов, добиваются регулярной структуры сети, при которой все узлы доступны и сеть связная.

Этап определения контроллеров кластеров.

- На уровне мощности излучения модулей беспроводной связи узлов все узлы рассылают HELLO-сообщение с целью определения доступных узлов в радиусе действия соты.

- По ответам, полученным от соседних узлов, каждый узел определяет максимально возможное количество узлов, которое может быть подключено к нему, а также по выбранной метрике рассчитывает вес кластера, центром которого он может быть.

- Узлы рассылают *каждый–каждому* информацию о доступных узлах и весах возможных кластеров.

Этап самоорганизации сети.

- Кластеризация сети начинается с узла сети, имеющего максимальное значение возможных связей.

- Если количество возможных соединений соседнего узла больше, чем собственное коли-

чество соединений, узел, получивший информацию, оповещает о том, что он готов присоединиться к такому кластеру.

- В случае если текущий узел может быть присоединен к нескольким кластерам одновременно, он определяется как *коллизийный*. Этот узел рассылает сообщение потенциальным центрам кластеров о том, что отношение его к конкретному кластеру неопределенно, и затем выполняется процедура адаптации (выравнивания) весов конкурирующих кластеров.

- Для этого *коллизийный* узел анализирует информацию о весах потенциальных кластеров, сортирует их по убыванию и отправляет сообщение о присоединении к кластеру с минимальным весом и отключении от остальных конкурирующих кластеров.

- В случае перемещения узлов из одного кластера в соседний осуществляется *мягкий handover* одним из известных методов. После чего центры кластеров, в которых произошли изменения, повторяют процесс самоорганизации локально.

Пример. Пусть дана сеть из 30 мобильных узлов ($N = 30$), распределенных на одной территории (рис. 1).

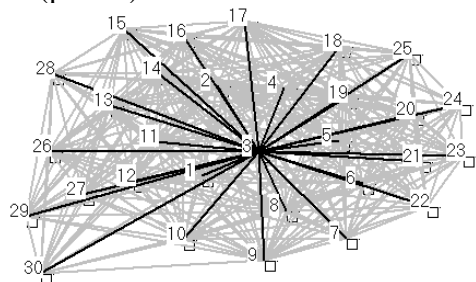
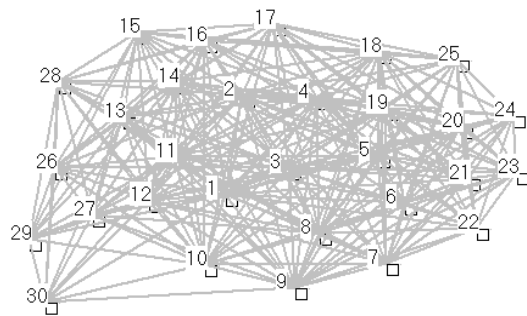


Рис. 1. Пример сети, подлежащей кластеризации

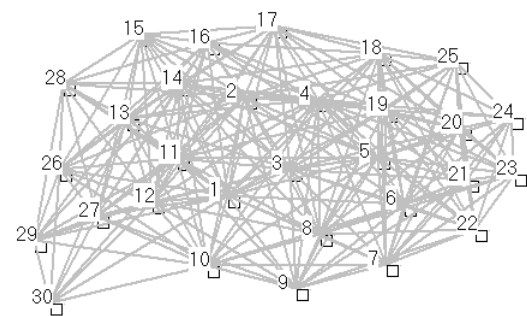
Главное условием сети – наличие многочисленных связей между узлами, типа *каждый с каждым*. Например, узлу под номером три доступны все узлы сети (рис. 1).

Путем постепенного уменьшения мощности приемопередающих модулей достигается регулярная структура сети, при которой все узлы, подлежащие кластеризации доступны и сеть связная (рис. 2).

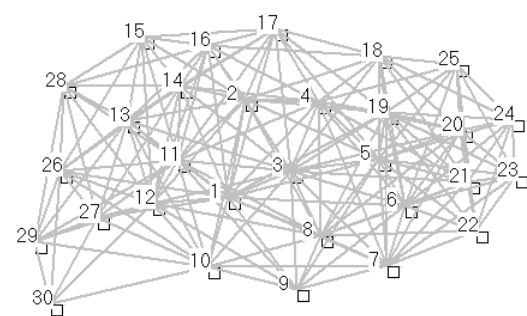
На рис. 2, д изображена сеть, сформированная узлами при промежуточном уровне действия ППМ, подлежащая в дальнейшем кластеризации.



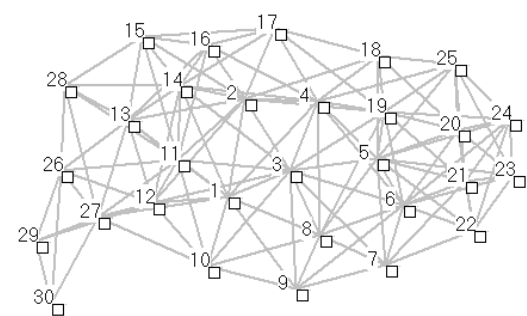
а



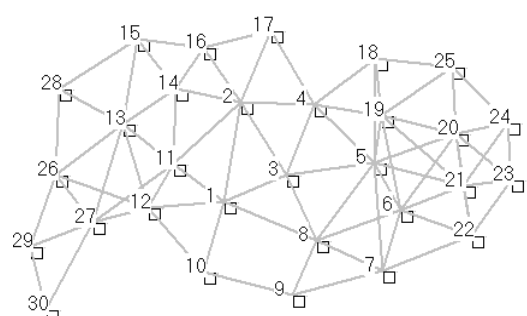
б



в



г



д

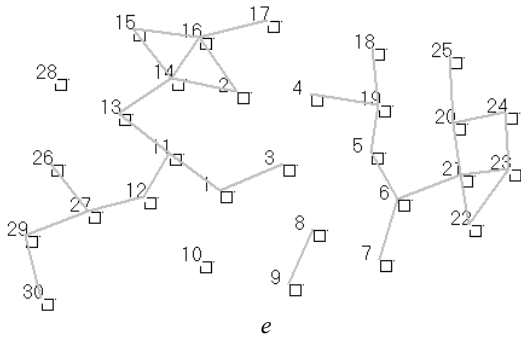


Рис. 2. Определение доступности узлов сети при уменьшении радиуса действия приемопередающих устройств: *a* – максимальный уровень действия; *b-d* – промежуточные уровни; *e* – минимальный уровень

Для выбора контроллеров кластеров используется показатель связности, у какого узла он больший, тот выступает в роли потенциально-го контроллера кластера.

Без этапа самоорганизации для покрытия всей сети необходимо минимум 13 кластеров (таблица), обеспечивающих более 70 процентов возможных соединений (рис. 3).

Таблица Характеристики кластеров сети

Контроллер кластера	5	20	6	13	21	2	19	11	12	4	1	8	27
Степень связности узла	9	8	8	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6
Вес кластера	630	501	448	464	410	462	447	367	377	384	397	406	403

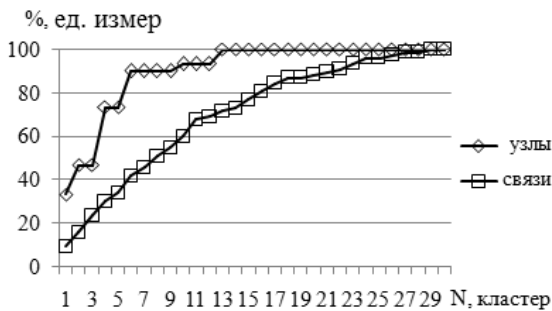


Рис. 3. Доступность узлов сети при использовании *N* кластеров

На этом этап инициализации начальной топологии сети завершен. Связная сеть, созданная при минимальном энергетическом уровне (рис. 2, *d*), – отправная точка этапа самоорганизации сети.

Этап самоорганизации узлов сети начинается с рассылки *HELLO*-сообщений с целью определения доступных узлов в радиусе действия соты.

Судя по ответам, полученным от соседних узлов, каждый узел определяет максимально возможное количество соседних узлов, которые могут быть подключены к нему, по выбранной метрике рассчитывается вес кластера, центром которого он рассматривается (рис. 4).

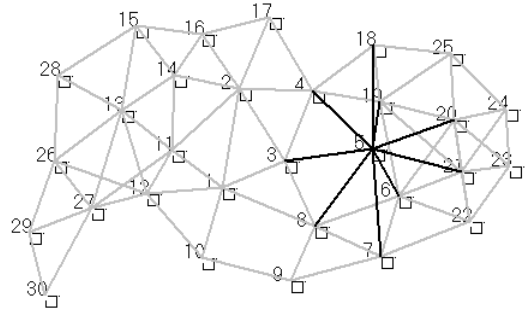


Рис. 4. Анализ возможности использования пятого узла КК

В таблице показаны значения характеристик КК сети с топологией рис. 3, *d*. Узлы отсортированы в порядке уменьшения степени связности. Самоорганизация сети начинается с узла сети, имеющего максимальное значение степени связности (рис. 4).

К кластеру, который создается пятым узлом, подключаются узлы: № 3, 4, 6, 7, 8, 18, 19, 21.

Центром следующего кластера выбирается узел под номером 20 со степенью связности восемь. Вес этого кластера 501. В его состав могут войти узлы № 6, 19, 21, 22, 23, 24, 25.

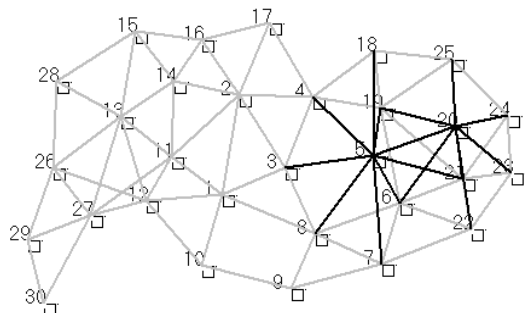


Рис. 5. Кластеры с пятым и 20-м центральными узлами имеют «коллизийные» узлы

В случае если текущий узел может быть присоединен к нескольким кластерам одновременно, он определяется как *коллизийный*. Тогда такой узел рассылает сообщение потенциальным контроллерам кластеров о том, что его принадлежность не определена. Затем выполняется процедура адаптации (выравнива-

ния) весов кластеров–«конкурентов». Коллизионными будут узлы девять, 19, 21 (рис. 5).

Модуль разности весов кластеров–«конкурентов» равен $|630 - 501| = 129$ у.е. Коллизионный узел анализирует информацию о весах потенциальных кластеров и отправляет сообщение о присоединении к кластеру с меньшим весом, и переходит в состояние резервного во всех остальных кластерах–«конкурентах».

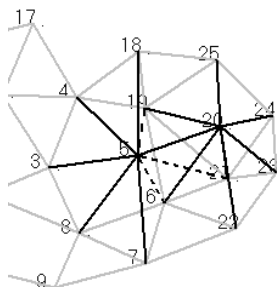


Рис. 6. Узлы № 6, 19, 21 в кластере с пятым контроллером переведены в резервное состояние (пунктирная линия)

Так, присоединившись к кластеру с меньшим весом (рис. 6), разность весов кластеров–«конкурентов», с центральными узлами пятым и 20-м уменьшилась $|470 - 501| = 31$ у.е.

Процесс самоорганизации повторяется, пока все узлы не будут распределены по кластерам. Результат реализации алгоритма показан на рис. 7.

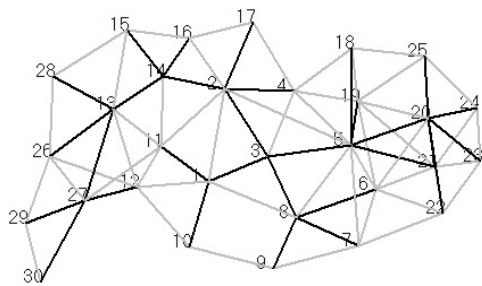


Рис. 7. Результат самоорганизации узлов сети в кластеры

Определено, что в результате самоорганизации для 100 процентов покрытия узлов сети необходимо вместо 13 кластеров девять с центральными узлами 20(501), 5(470), 2(382), 13(339), 1(251), 14(223), 8(212), 3(201), 27(138). Эти контроллеры кластеров формируют опорную сеть доступа (рис. 8).

Оценим энергетическую эффективность кластеризации на примере передачи информации между 24 и 29 мобильным узлом.

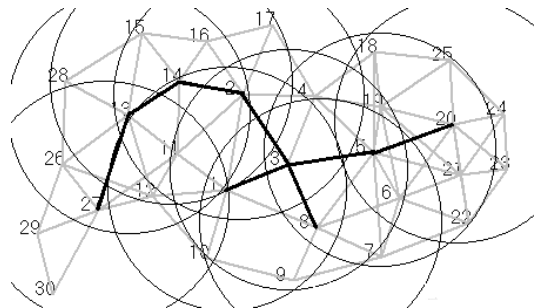


Рис. 8. Опорная сеть контроллеров кластеров

Для этого надо знать, при какой мощности передачи обеспечивается необходимое отношение сигнал/шум в точке приема или какое количество энергии расходуется узлом для передачи данных на указанное расстояние в зависимости от переданной информации ΔI .

Линейное расстояние между указанными узлами для рассмотренного примера составило $r_{24 \rightarrow 29} = 410$ у.е.

Пусть передача информации ΔI осуществляется с мощностью, обеспечивающей необходимый уровень отношения сигнал/шум в точке приема (6). Отсюда, при централизованном управлении сетью, затраченная энергия рассчитывается, как:

$$\Delta E_{\text{центр}} = P_R * \Delta I = \frac{P_T * (4 * \pi * r_{24 \rightarrow 29})^2}{\lambda^2} * \Delta I.$$

При иерархическом управлении сетью, когда узлы самоорганизуются в кластеры, затраченная для передачи энергия распределяется между узлами сети и рассчитывается, как:

$$\Delta E_{\text{кластер}} = \sum_{i=1}^N P_{Ri} * \Delta I = \frac{P_T * (4 * \pi)^2}{\lambda^2} * \Delta I (r_{1 \rightarrow 2}^2 + \dots + r_{i-1 \rightarrow i}^2 + \dots + r_{N-1 \rightarrow N}^2),$$

где N – количество контроллеров кластеров, задействованных в построении маршрута передачи.

В случае передачи того же объема информации ΔI через транзитные узлы опорной сети контроллеров кластеров $20 \rightarrow 5 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 14 \rightarrow 13 \rightarrow 27 \rightarrow 29$, длина всего маршрута $r_{\Sigma} = 72 + 74 + 71 + 55 + 53 + 85 + 56 = 466$ усл. ед.

Тогда энергетическая эффективность кластеризации определяется, как:

$$\Theta = \frac{\Delta E_{\text{центр}}}{\Delta E_{\text{кластер}}} = \frac{\frac{P_T * (4 * \pi * r_{24 \rightarrow 29})^2 * \Delta l}{\lambda^2}}{\frac{P_T * (4 * \pi)^2 * \Delta l (r_{1 \rightarrow 2}^2 + \dots + r_{i-1 \rightarrow i}^2 + \dots + r_{N-1 \rightarrow N}^2)}{\lambda^2}} =$$

$$= \frac{r_{24 \rightarrow 29}^2}{(r_{24 \rightarrow 20}^2 + r_{20 \rightarrow 5}^2 + r_{5 \rightarrow 3}^2 + r_{3 \rightarrow 2}^2 + r_{2 \rightarrow 14}^2 + r_{14 \rightarrow 13}^2 + r_{13 \rightarrow 27}^2 + r_{27 \rightarrow 29}^2)} =$$

$$= \frac{168100}{31896} = 5,27.$$

Заключение. Предложенный иерархический способ управления маршрутизацией в *mesh*-сети позволяет распределить затраченную энергию для передачи информации между транзитными контроллерами кластеров. Для рассмотренного примера, затраты энергии на передачу информации между узлами сети при централизованном управлении в 5,27 раз больше, чем суммарные затраты при иерархическом. Поэтому перспективен переход к двухуровневому управлению сетью на базе шлюзов доступа.

Самоорганизация узлов мобильной сети в кластеры с контроллерами, выполняющими функции шлюзов между кластерными зонами, позволяют выровнять текущую нагрузку и способствуют минимизации объема управляющего трафика.

1. *IEEE P802.11s / D1.08. Amendment: Mesh Networking* // IEEE, Jan., 2008. – 512 p.
2. Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия *WiMAX*. Путь к 4G. – М.: Техносфера, 2009. – 668 с.
3. Романюк В.А. Иерархическая маршрутизация в мобильных радиосетях // Зв'язок. – 2002. – № 1. – С. 38–42.

4. *A Weighted Clustering Algorithm for Mobile Ad Hoc Networks* // Cluster Computing. – 2002. – № 5. – P. 193–204.
5. Shuhui Y., Jie W., Jiannong C. Connected k-Hop Clustering in Ad Hoc Networks. – <http://www.pdf-search-engine.com/clustering-in-ad-hoc-networks-pdf.html>
6. Suchismita Ch., Santanu K.R. TACA: A Topology Adaptive Clustering Algorithm For Mobile Ad Hoc Networks. – <http://www.pdf-search-engine.com/clusteringin-adhoc-networks-pdf.html>
7. *Применение метода агрегации данных в задаче нахождения узлов с дополнительной функциональностью.* / Я.Р. Гринберг, И.И. Курочкин, А.В. Корх и др. // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2013. – № 2. – С. 27–39. – <http://www.jitcs.ru>
8. Бойко Е.А. Кластеризация социальных сетей с помощью алгоритма кластеризации *BSP* // Восточно-Европейский журнал технологий. – 2012. – № 3/11(57). – С. 34–36.
9. *Метод структуризации в задачах самодиагностирования распределенных вычислительных систем* / Д.Г. Буханов, В.М. Поляков, В.Г. Рубанов и др. // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2013. – № 5(64). – С. 130–134.
10. Кулаков Ю.А., Бабикер Мухаммед Ель Амин. Адаптивный алгоритм формирования доменов в динамических системах // Вісн. НТУ «КПІ»: Інформатика, управління та обчислювальна техніка. – 2006. – № 45. – С. 57–66.

Поступила 17.10.2013

Тел. для справок: 044 454-9292, +38 0412 251-296,
096 373-4865 (Киев, Житомир)

E-mail: ya.kulakov@gmail.com, vvvorotnik@ukr.net

© Ю.А. Кулаков, В.В. Воротников, 2014