

## ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ

УДК.621.395

**АДАПТИВНЫЙ АЛГОРИТМ КЛАСТЕРИЗАЦИИ  
ДЛЯ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ  
С МОБИЛЬНЫМИ УЗЛАМИ****А. Е. Кучерявый**, заведующий кафедрой сетей связи и передачи данных СПбГУТ, д.т.н., akouch@mail.ru**Н. А. Аль-Кадами**, аспирант кафедры сетей связи и передачи данных СПбГУТ, nas4yemen@gmail.com

Предлагается новый адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами под названием МАСА (Mobility Adaptive Clustering Algorithm). В разработанном алгоритме кластеризации мобильный сенсорный узел выбирает себя головным узлом кластера на основе простого точечного предиктора SPP (Single Point Predictor) для комбинированного критерия прогнозирования (алгоритм DCA). Другие узлы представляют собой члены кластера, определяемые на основе некоторого значения, указывающего на их пригодность для подключения к конкретному головному узлу (алгоритм MBC). Сочетание двух известных алгоритмов обеспечивает существенное увеличение длительности жизненного цикла сети, ее стабильности, а также уменьшение потери пакетов в кластере. Разработанный алгоритм предназначен, в том числе, и для использования в наземном сегменте летающих сенсорных сетей.

*Ключевые слова:* мобильные беспроводные сенсорные сети, простой точечный предиктор, комбинированный критерий прогнозирования, пригодность, жизненный цикл сети.

**Введение.** Сегодня развитие сетей связи осуществляется на основе концепции Интернета Вещей [1–3]. Технологической базой для реализации этой концепции являются беспроводные сенсорные сети (БСС) [4, 5]. БСС представляют собой самоорганизующиеся сети и состоят из множества распределенных в пространстве беспроводных сенсорных узлов (БСУ), предназначенных для мониторинга характеристик окружающей среды или объектов, расположенных в ней [6]. Ресурсы БСУ в БСС ограничены с точки зрения возможности обработки информации, пропускной способности, объема памяти, вычислительных возможностей, что существенно отличает БСС от других сетей [7].

Сенсорные узлы БСС довольно часто могут функционировать в условиях, когда отсутствует возможность гарантированного электропитания или даже замены батареи БСУ. Поэтому важнейшей характеристикой БСС является остаточная энергия.

Как правило, в сенсорных сетях узлы самоорганизуются в кластеры и головной узел выбирается для каждого из них. Головные узлы собирают данные с узлов — членов кластера, производят их обработку и передачу информации на шлюз или базовую станцию. Такое агрегирование данных в головных узлах значительно уменьшает энергопотребление в сети и увеличивает длительность жизненного цикла [8–10].

В статье представлен новый алгоритм для выбора головного узла кластера в БСС с мобильными узлами. Алгоритм основан на сочетании лучших свойств двух известных алгоритмов — DCA (Distributed Clustering Algorithm) [11, 12] и MBC (Mobility-Based Clustering) [13]. Новый алгоритм является адаптивным алгоритмом кластеризации для БСС с мобильными узлами, что отражено и в его названии МАСА (Mobility Adaptive Clustering Algorithm). Алгоритм МАСА

предполагается использовать, в том числе, и для построения наземного сегмента летающих сенсорных сетей [14].

**Состояние исследований в предметной области.** Вопросы разработки алгоритмов выбора головного узла в БСС уже более десяти лет занимают важное место в исследовательских работах по сетям связи. Большинство алгоритмов кластеризации разработано для БСС со стационарными узлами. Такие алгоритмы как LEACH [15], LEACH-C [16], HEED [17] и TEEN [18] эффективно используются для однородных и гетерогенных сенсорных сетей со стационарными узлами [19]. Для всех этих алгоритмов жизненный цикл сенсорной сети делится на раунды. Каждый раунд состоит из этапа формирования кластера и этапа передачи собранной головным узлом информации шлюзу или базовой станции.

Применение упомянутых алгоритмов для эффективной кластеризации в БСС с мобильными узлами не нашло широкого применения. Последнее связано с тем, что мобильность членов кластера, и что еще принципиальнее — мобильность головного узла, приводят к нестабильности сформированного кластера в рамках одного раунда. Вместе с тем мобильность БСУ может быть использована и для улучшения некоторых характеристик сети. Например, в [20] свойством мобильности предложено пользоваться для улучшения связности сети, а в [21 и 22] — для защиты БСС от потоков ложных событий.

Алгоритм LEACH для БСС с мобильными узлами LEACH-M [23] позволил улучшить характеристики сети, но не настолько как алгоритмы с предсказанием DCA [11, 12], GMAC [24]. В [11, 12] предложен распределенный алгоритм кластеризации (DCA), основанный на применении комбинированного критерия прогнозирования (PCC). В DCA каждый сенсорный узел вычисляет прогнозируемое значение PCC в соответствии с каким-либо предиктором (простым, экстраполяционным, комбинированным). Комбинированный критерий прогнозирования включает в качестве параметров связность, покрытие, мобильность и остаточную энергию. Значение PCC передается всем близлежащим узлам в радиусе кластера и головной узел выбирается по его максимальному значению.

В [24] предложен алгоритм для кластеризации групп мобильных устройств GMAC с использованием информации о топологии сети и предсказании направления движения БСУ. Это предсказание позволяет определить вместе или отдельно перемещаются отдельные сенсоры и группы БСУ. Число кластеров в GMAC фиксировано. В статье предложены оценки для определения оптимального размера группы и, соответственно, числа кластеров. Головной узел кластера выбирается на основе остаточной энергии и группы мобильности, к которой принадлежит БСУ.

В [25] предложен алгоритм кластеризации, позволяющий использовать временные интервалы TDMA (если они

свободны) не только членам кластера, но и не его членам, оказавшимся вследствие мобильности проходящими через поле данного кластера.

В алгоритме МВС головной узел выбирается традиционным способом — по значениям остаточной энергии и мобильности. Что касается члена кластера, то он выбирает наиболее подходящий для себя головной узел на основе так называемого значения пригодности, которое может гарантировать стабильное взаимодействие с головным узлом кластера. Последнее позволяет уменьшить потери пакетов и одновременно снизить потребление энергии из-за менее частого изменения членства в конкретном кластере.

С учетом результатов, полученных в [11–13], при разработке нового алгоритма МАСА используем: выбор головного узла на базе комбинированного критерия прогнозирования с применением простого точечного предиктора; вступление в члены кластера по значениям пригодности из алгоритма МВС.

**Модель для исследования алгоритма МАСА.** При разработке алгоритма МАСА была принята следующая модель сети:

- сенсорная сеть является гомогенной, т.е. все БСУ обладают одинаковыми базовыми параметрами (начальная энергия, радиус действия);
- топология сети изменяется, и БСУ могут перемещаться со скоростью от 0 до 2 м/с (типичные значения при исследованиях мобильных сенсорных сетей);
- БСУ осуществляют свою активность без централизованного управления;
- базовая станция находится в стационарном состоянии и радиоканал симметричен.

Заметим также, что наибольшая эффективность алгоритма может быть достигнута, когда число покидающих кластер за время раунда БСУ равно числу прибывающих в кластер. Существенное значение имеет выбор модели мобильности БСУ. Такие стандартные модели, как случайный выбор пути перемещения, обхода, направления движения и т.п., не гарантируют чисто случайного перемещения, поскольку поведение мобильных БСУ зависит от конфигурации сети и используемого сценария ее функционирования [26].

Дальше будем использовать модель мобильности, близкую к мобильности человека в роли пешехода в реальных условиях. Еще раз отметим, что скорости перемещения узлов в сенсорных сетях с мобильными сенсорными сетями ограничиваются 2 м/с, что соответствует скорости быстро идущего пешехода. Распределение мобильных узлов по диапазону изменения скорости перемещения от 0 до 2 м/с производится случайным образом. Для каждого из узлов при этом действует приведенный ниже алгоритм определения мобильности.

1. Случайным образом в соответствии с равномерным распределением выбирается скорость перемещения узла.

2. Случайным же образом выбирается направление перемещения.

3. В выбранном направлении с выбранной скоростью БСУ может перемещаться в течение заданного периода времени и на определенное расстояние. После того, как достигнута заданная граница перемещения по времени или по расстоянию, выбирается новое направление перемещения.

4. Затем возможно некоторое время ожидания (до конца раунда).

5. Возвращение к первому шагу.

Для распространения электромагнитных волн также принимается стандартная модель для БСС. При этом для оценки потерь учитывается положение БСУ: находятся они в зоне прямой видимости (LOS) или нет (NonLOS) [27].

**Комбинированный критерий прогнозирования.** В соответствии с реализацией алгоритма DCA критерий включает критерии связности, покрытия, мобильности и остаточной энергии. Комбинированный критерий прогнозирования  $CC(s_i)$  для БСУ  $s_i$  в момент времени  $t$  определяется по формуле:

$$CC(s_i) = \alpha ConC(s_i) + \beta CovC(s_i) + \frac{\gamma}{1 + MC(s_i)} + \zeta REC(s_i), \quad (1)$$

где  $\alpha + \beta + \gamma + \zeta = 1$ .

В [11, 12] рассмотрены три эвристических предиктора: простой точечный предиктор SPP (Single Point Predictor), линейный экстраполяционный предиктор LEP (Linear Extrapolation Predictor) и гибридный предиктор HP (Hybrid Predictor). Исследование показало, что SPP обеспечивает наибольший по длительности жизненный цикл сенсорной сети. Комбинированный критерий прогнозирования (PCC) должен быть предсказан в текущее время  $t$  в соответствии с историей этого критерия;

$$HCC = [(CC_1, t_1), (CC_2, t_2), \dots, (CC_n, t_n)], \quad (2)$$

где  $t_1 < t_2 < \dots < t_n$ .

Простой точечный предиктор SPP всегда предсказывает следующее значение как предыдущую величину HCC:

$$PCC = SPP(t_c) = CC_n. \quad (3)$$

**Алгоритм МАСА.** Как и большинство алгоритмов, разработанный алгоритм МАСА содержит две фазы: фазу формирования кластеров, на которой создаются множество кластеров и расписание TDMA, и фазу стационарного состояния, когда головные узлы собирают информацию и передают их на шлюз или базовую станцию.

**Фаза формирования кластера.** Выбор головного узла кластера. С начала каждого раунда каждый БСУ вычисляет свои предикторы PCC в соответствии с простым точечным предиктором SPP. После этого на втором шаге алгоритма вычисленное значение PCC передается в радиусе действия всем близлежащим БСУ.

Формирование кластера состоит из трех фаз.

1. Объявление головного кластера. После выбора головного узла кластера, БСУ передает широковещательное сообщение о том, что он стал головным. В сообщении указывается его местоположение, доступная скорость передачи в пределах своей дальности и т.п.

2. Запрос на присоединение к головному узлу. Точно так же, как и в алгоритме МВС [13], каждый БСУ в сети выбирает наиболее подходящий головной узел кластера для присоединения на основе значения пригодности. Его используют для указания эффективности присоединения к тому или иному кластеру конкретного БСУ. Значение пригодности:

$$W_{ij} = a \frac{E_{j-current}}{E_{max} N_{j-current}} + b \left( 1 - \frac{d_{ij}}{R_{tran}} \right) + c \frac{\Delta t_{ij}}{t_{frame}}, \quad (4)$$

где  $W_{ij}$  — значение пригодности, присвоенное сенсорному узлу  $i$  и указывающее его пригодность для связи с головным узлом кластера  $j$ ;  $E_{j-current}$  — текущая энергия головного узла кластера  $j$ ;  $N_{j-current}$  — количество членов кластера  $J$  после присоединения сенсорного узла  $i$  к головному узлу кластера  $j$ ;  $d_{ij}$  — расстояние между сенсорным узлом  $i$  и головным узлом кластера  $j$ ;  $\Delta t_{ij}$  — расчетное время взаимосвязи между сенсорным узлом  $i$  и головным узлом кластера  $j$ ;  $t_{frame}$  — длительность кадра данных.

В формуле (4)  $a + b + c = 1$  постоянные коэффициенты  $a$ ,  $b$  и  $c$  могут принимать значения из интервала  $(0, 1)$  и представляют весовое значение каждого из факторов (энергии, расстояния, времени).

3. Подтверждение головного узла. После получения запроса члена кластера на присоединение головной узел кластера посылает подтверждение БСУ о его членстве в кластере и назначает ему слот времени, в течение которого этот БСУ может передавать информацию головному узлу кластера. Расписание транслируется на все БСУ в кластере.

**Фаза стационарного состояния.** Каждый БСУ просыпается за один временной интервал до запланированного временного интервала для передачи информации в соответствии с расписанием TDMA и возвращается в спящий режим после своего временного интервала. Головной узел кластера должен сохранять свою активность постоянно, чтобы отправить сообщение на запрос данных, получить данные от БСУ, а также отправлять и получать другие необходимые для поддержания сети сообщения.

Поскольку рассматриваемая сенсорная сеть состоит из мобильных узлов, то в фазе стационарного состояния сети важным процессом является возможный переход БСУ из старого кластера в новый. Процесс этого перехода показан на рис. 1. При этом, когда головной узел кластера не принимает данные от члена кластера, он удаляет его из расписания передачи. В то же время, если БСУ (член кластера) не получает запрос на получение данных от своего головного узла, этот узел будет пытаться передать сообщение на другой головной узел кластера. Для этого в каждом головном узле кластера предусмотрено определенное число свободных интервалов времени для передачи информации.

Кроме того, головной узел кластера и БСУ имеют информацию о примерном времени передачи информации и можно заранее проверить будет ли БСУ оставаться в кластере, когда в его временном интервале придет запрос на передачу информации. Если есть уверенность в том, что БСУ не останется в кластере, узел должен передать запрос на присоединение к новому кластеру и стараться избежать больших потерь пакетов, прежде чем он потеряет связь с текущим головным узлом.

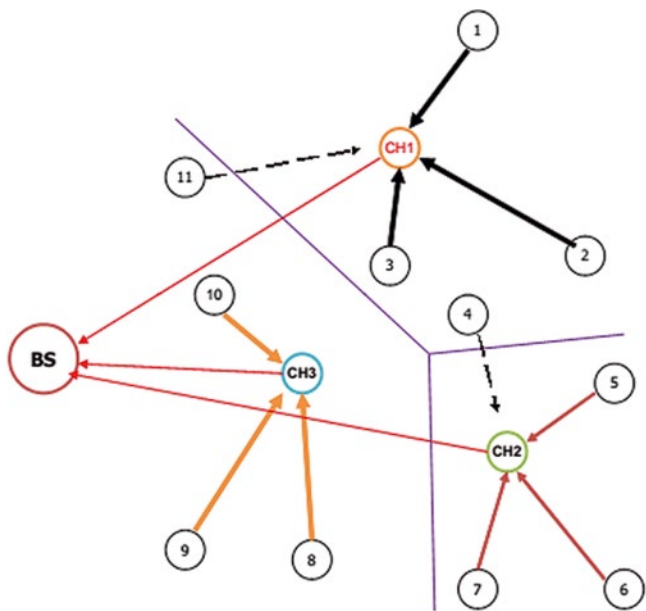


Рис. 1. БСУ оставляет старый кластер и присоединяется к новому

На рис. 1 узел 11 присоединяется к кластеру 1, в то время как узел 4 покидает кластер. Головной узел кластера 1 удаляет узел 4 из расписания TDMA и добавляет узел 11 в TDMA, которое корректируется на основе расчетного времени подключения  $\Delta t$  между членом кластера и головным узлом кластера в порядке возрастания [13].

**Результаты моделирования.** Моделирование проведено на языке C#.NET с использованием численных характеристик (типовых) сенсорной сети. БСУ случайным образом распределены на плоскости  $400 \times 400$  м, и число сенсоров изменяется от 200 до 400 с шагом 50. Параметры сети и их значения, используемые при моделировании, сведены в таблице. Алгоритм MACA сравнивается с алгоритмами LEACH-M и DCA по длительности жизненного цикла сенсорной сети, длительности периода стабильности и числу успешно переданных пакетов. На рис. 2 отображены экранные формы, показывающие процесс кластеризации.

Таблица. Параметры моделирования

Параметр	Обозначение	Значение
Начальная энергия на узел	$E$	2 Дж
$T_x/R_x$	$E_{elec}$	50 нДж/бит
Постоянное усиление	$e_{fs}$	10 пДж/бит/м
Мультисетевая постоянная	$e_{fs}$	0,0013 пДж/бит/м
Потери на участках (экспоненциальные)	$\sqrt{\frac{e_{fs}}{\epsilon_{mp}}}$	87
Радиус сенсора	$r$	25 м
Широкополосная зона вещания	$R$	$2r$
Радиус кластера	$1 - hop$	$2r$
Скорость передачи данных	9600	бит/с
Радиус связности	$2r$	50 м
Размеры поля (X, Y)	(400, 400)	м

**Длительность жизненного цикла сети.** Может быть рассчитана исходя из следующих параметров:

- время от начала функционирования сети до гибели первого БСУ (FND);
- время от начала функционирования сети до момента времени, когда в живых остается заданный процент БСУ (PNA);
- длительность периода времени до гибели последнего БСУ [9].

На рис. 3 приведены результаты моделирования для случая, когда в живых остается 40% БСУ. Из рисунка видно, что во всем диапазоне изменения размера сети длительность жизненного цикла сенсорной сети при использовании алгоритма MACA существенно выше, чем для LEACH-M и DCA.

**Период стабильности.** Длительность интервала времени от начала функционирования сети до гибели первого БСУ (FND) называют еще периодом стабильности. На рис. 4 приведены сравнительные характеристики периода стабильности для алгоритмов MACA и DCA. Алгоритм LEACH не выдерживает конкуренции с этими алгоритмами.

Как видно из результатов моделирования (рис. 4), период стабильности для нового алгоритма кластеризации больше, чем для алгоритма DCA. Результаты моделирования также

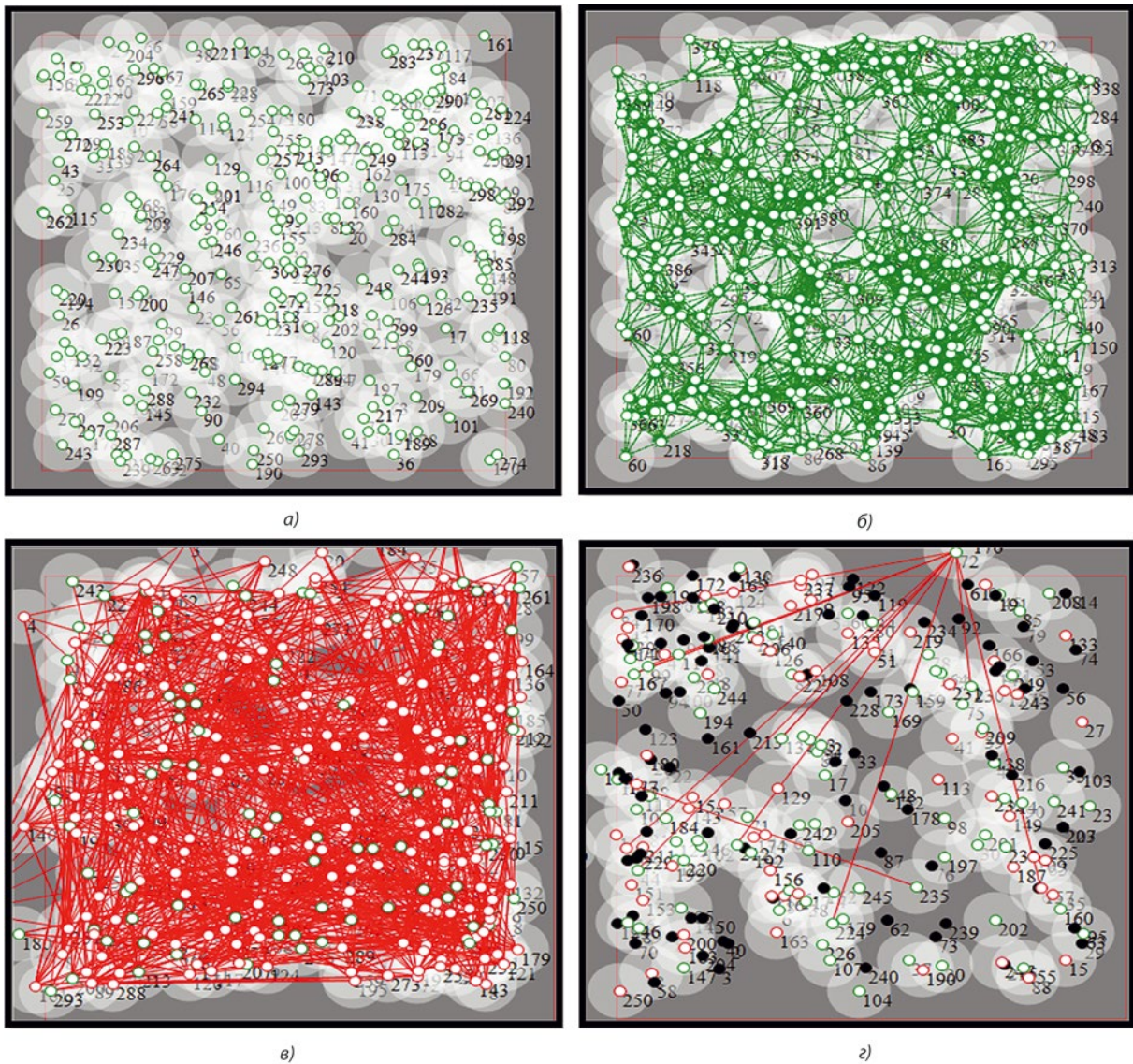


Рис. 2. Экранные формы при моделировании: а — случайное размещение БСУ; б — широкополосное оповещение РСС; в — кластеризация; г — сенсорная сеть в процессе функционирования

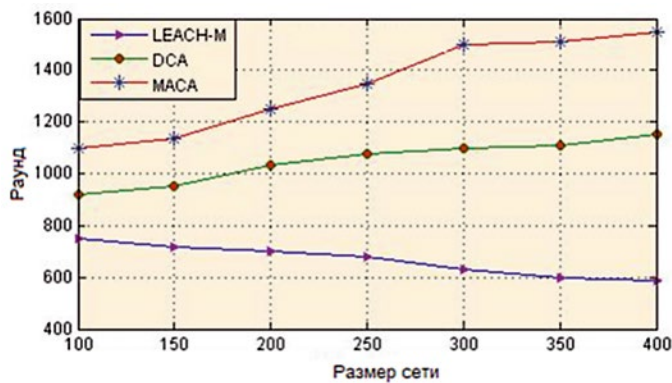


Рис. 3. Длительность жизненного цикла для MACA, DCA и LEACH-M

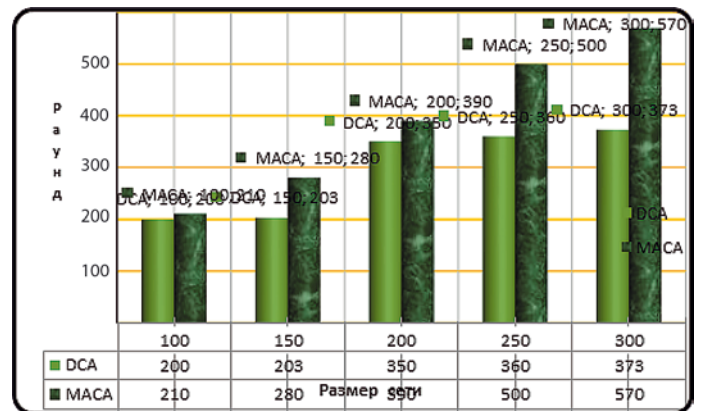


Рис. 4. Период стабильности для MACA и DCA

показывают, что период стабильности для обоих алгоритмов возрастает с увеличением размера сети.

**Число успешно переданных пакетов.** Улучшение производительности сети, измеряемой в данном случае путем оценки числа переданных пакетов, является важным показателем для сравнения алгоритмов кластеризации. Как видно

из рис. 5, по значению среднего числа успешно переданных пакетов алгоритмы MACA и DCA практически равны.

С учетом того, что разработанный алгоритм MACA превосходит по длительности жизненного цикла и периода стабильности алгоритм DCA, алгоритм MACA рекомендуется

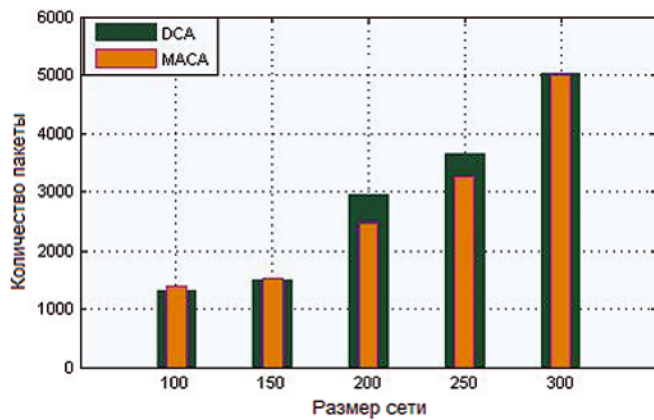


Рис. 5. Среднее число успешно переданных пакетов для MACA и DCA

к применению для наземных фрагментов летающих сенсорных сетей [14].

**Выводы.** 1. Новый адаптивный алгоритм кластеризации для БСС с мобильными сенсорными узлами получен путем сочетания положительных свойств двух известных ранее алгоритмов DCA и MBC. При выборе головного узла кластера используется комбинированный критерий прогнозирования из алгоритма DCA, а для присоединения членов кластера к головному узлу — значение пригодности из алгоритма MBC.

2. Результаты моделирования показали, что предложенный алгоритм по длительности жизненного цикла намного превосходит широко известный алгоритм LEACH-M. Длительность жизненного цикла алгоритма MACA больше, чем и для алгоритма с прогнозированием DCA, который, в свою очередь, превосходит LEACH-M. Алгоритм MACA превосходит алгоритм DCA по длительности периода стабильности, а по числу успешно переданных пакетов оба алгоритма приблизительно равны.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-07-09431а «Разработка принципов построения и методов самоорганизации для летающих сенсорных сетей».*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А.Е. Интернет Вещей // Электросвязь.— 2013.— № 1.
2. Гольдштейн Б.С., Кучерявый А.Е. Сети связи пост-NGN.— С.— Петербург: БХВ, 2013.
3. Росляков А.В., Ваняшин С.В., Гребешков А.Ю., Самсонов М.Ю. Интернет Вещей.— Самара, ПГУТИ, 2014.
4. Кучерявый А.Е., Кучерявый Е.А. От e-России к и-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь.— 2005.— № 5.
5. Кучерявый А.Е., Парамонов А.И., Кучерявый Е.А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета.— М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
6. Кучерявый А.Е., Прокопьев А.В., Кучерявый Е.А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011.
7. Hill J.L. System Architecture for Wireless Sensor Networks.— University of California, Berkeley.— Spring 2003.
8. Raghavendra C.S., Prasanna V.K. Distributed Signal Processing in Wireless Sensor Networks, ADA437824.— August 2005.
9. Asharioun H., Asadollahi H., Ismail A.S., Ramadass S. Lifetime Comparison on Location Base Routing in Wireless Sensor Networks // International Journal of Information and Education Technology.— April 2012.— Vol. 2, № 2.

10. Dietrich I., Dressler F. On the Lifetime of Wireless Sensor Networks.— Department of Computer Science, University of Erlangen, Germany.— 2009.
11. Koucheryavy A., Salim A. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks / Proceedings, ICUMT 2009. International Conference IEEE on Ultra Modern Telecommunications.— S-Petersburg, Russian.—2009.
12. Koucheryavy A., Salim A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks / Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, ICACT 2010.— Phoenix Park, Korea.— 2010.
13. Deng S., Li J., Shen L. Mobility-based clustering protocol for wireless sensor networks with mobile nodes: 1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096; 2. Department of Physics and Telecommunications Engineering, Hunan City University, Yiyang, Hunan 413000, 10.1049/iet-wss.2010.0084.— 2011.
14. Кучерявый А.Е., Владыко А.Г., Киричек Р.В. и др. Летающие сенсорные сети // Электросвязь.— 2014.— № 9.
15. Heinzelman W.R. et al. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks / Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences.— January 2000.
16. Heinzelman W.R. Application-Specific protocol architectures for wireless networks [D].— Boston: MIT, Doctor thesis.— 2000.
17. Younis O., Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad-hoc sensor networks // IEEE Transactions on Mobile Computing.— 2004.— № 3 (4).
18. Manjeshwar A., Grawal D.P. TEEN: A protocol for enhanced efficiency in wireless sensor networks / Proceedings of the 15th Parallel and Distributed Processing Symposium.— San Francisco.— 2001.— Vol. 3.
19. Аль-Кадами Н.А. Оценка и сравнительный анализ алгоритмов маршрутизации для гомогенных и гетерогенных беспроводных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. Электронный научный журнал.— СПб ГУТ, 2014.— Вып. 3 (7).
20. Wang Y.-C., Wu F.-J., Tseng Y.-C. Mobility Management Algorithms and Applications for Mobile Sensor Networks // Wireless Communications and Mobile Computing.— 2012.— Vol.12, issue 1.
21. Богданов И.А., Парамонов А.И., Кучерявый А.Е. Характеристики жизненного цикла мобильной сенсорной сети при различных потоках ложных событий // Электросвязь.— 2013.— № 1.
22. Bogdanov I., Koucheryavy A., Paramonov A. The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion. Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems / 14<sup>th</sup> International conference, NEW2AN 2013 and 6<sup>th</sup> Conference, ruSMART 2013. LNCS 8121, Springer.— Russia, St. Petersburg.— 27–29 August 2013.
23. Kim D.S., Chung Y.J. Self-organization routing protocol supporting mobile nodes for wireless sensor network / Proceedings. First International MultiSymposium on Computer and Computational Sciences.— Hangzhou, China.— June 2006.
24. Benmansour T., Moussaoui S. GMAC: Group Mobility Adaptive Clustering Scheme for Mobile Wireless Sensor Networks. International Symposium on Programming and Systems (ISPS) / Proceedings, Algiers, Algeria.— 25–27 April 2011.
25. Samer A.B., CheeK N.K., Mohd F.R. et al. Cluster based routing protocol for mobile nodes in wireless sensor network / Proceedings, Third International Conference on Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks.— Waterloo, Ontario, Canada.— August 2006.
26. [http://www.routingprotokolle.de/Routing/mobility\\_random\\_walk.htm](http://www.routingprotokolle.de/Routing/mobility_random_walk.htm)
27. Wang J., Kim J.U., Shu L. et al. A Distance-Based Energy Aware Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks // Sensors (Basel).— October 2010.— Vol.10, issue 10.