

УКД 621.391

ВЫБОР ГОЛОВНОГО УЗЛА КЛАСТЕРА В ОДНОРОДНОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ

А. Е. Кучерявый, советник генерального директора ЦНИИС, д. т. н.; kouch@komset.ru

А. Салим (Египет), аспирант СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Ключевые слова: сенсорная сеть, кластер, головной узел, алгоритм выбора, покрытие.

Введение. Беспроводные сенсорные сети (БСС) являются основой построения так называемого *и*-общества [1, 2], их появление принципиально изменит роль сети в жизни человека и общества. Множество приложений БСС [3] предопределило и второе их название — USN (Ubiquitous Sensor Network).

Беспроводные сенсорные сети относятся к классу самоорганизующихся сетей [4], при классификации которых выделяются целевые (Ad Hoc) и ячеистые (Mesh) сети. По аналогии с существующими сетями связи общего пользования (ССОП) целевые и ячеистые сети определяют сети доступа (Ad Hoc), в которых возможны одноранговые, или одношаговые (one hop), а также транзитные (Mesh) соединения. В последних преобладают многогранговые или многошаговые соединения (multi hop), предусматривающие наличие в узлах сети функции маршрутизации.

Архитектура БСС. В соответствии со стандартами IEEE [5] для подобных сетей предусматриваются следующие типовые архитектуры: звезда, «кластерное дерево» и ячеистая. На рис. 1 изображена архитектура «кластерное дерево», в которой организуются кластеры с головными узлами. При этом в кластере при обнаружении какого-либо события сенсорный узел передает информацию своему головному узлу, а дальнейшая передача информации в направлении, например, ССОП может осуществляться непосредственно через шлюз, или через иные головные кластерные узлы к шлюзу. Шлюз между БСС и ССОП необходим в связи с использованием различных протоколов: Zig Bee [6] — для сенсорных сетей и IP-протоколов — для пакетных ССОП.

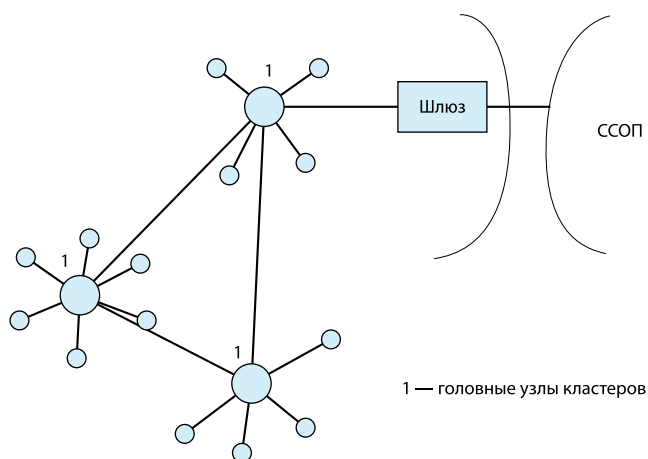
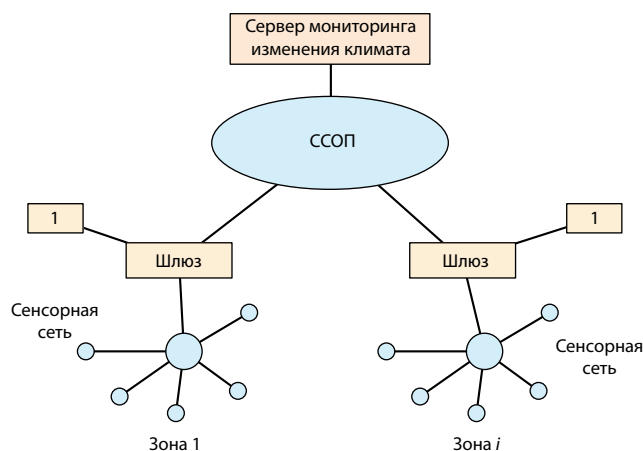


Рис. 1

Архитектура «кластерное дерево», как правило, используется при создании БСС, размещаемых на достаточно большой территории с целью мониторинга тех или иных явлений. На рис. 2 в качестве примера приведена архитектура БСС для мониторинга процессов изменения климата, разрабатываемая в рамках деятельности Сектора стандартизации МСЭ

[7]. Заметим, что задача мониторинга процессов изменения климата по масштабам является планетарной и чрезвычайно важной уже сегодня.

На рис. 2 для передачи информации на сервер мониторинга изменения климата используются ресурсы ССОП и, это естественно, поскольку ССОП как раз и является сетью планетарного масштаба.



1 — локальные серверы мониторинга изменения климата

Рис. 2

Как видим, сенсорные сети могут быть достаточно разветвленными и содержать большое (в соответствии со спецификациями Zig Bee 64000) число сенсорных узлов. При этом сенсорные узлы могут как передавать информацию о конкретном событии к шлюзу сети, так и являться транзитными элементами при передаче этой информации. Очевидно, что в последнем случае сенсорный узел затрачивает большее количество энергии на каком-либо интервале времени. Энергетические возможности для сенсоров являются одними из важнейших параметров, так как зачастую сенсорные узлы располагаются в труднодоступных для более или менее постоянного обслуживания местах, например, системы мониторинга изменения климата.

Кластерная организация считается эффективной и масштабируемой для решения подобных задач [8, 9], но лишь при условии рационального выбора головного узла в кластерной сети в конкретный момент времени. Действительно, головной в момент t_1 сенсорный узел не обязательно должен быть им же в момент t_2 , ибо существующий головной узел уже может затратить достаточно большое количество энергии на передачу сообщений от всех сенсорных узлов кластера к моменту t_2 . Поэтому, в момент t_2 головным узлом в кластере может быть назначен и иной сенсорный узел, сохранивший к этому времени наибольший энергетический запас.

Существующие алгоритмы выбора головного узла. Одним из самых известных механизмов, обеспечивающих функционирование БСС и выбор головных узлов является алгоритм LEACH (Low Energy Adaptive Cluster Hierarchy) [8]. Он пре-

дусматривает вероятностный выбор сенсорного узла на роль головного в начале функционирования сенсорной сети, а впоследствии ротацию на основе энергетических характеристик сенсорных узлов. Подобное решение, естественно, продлевает длительность функционирования сенсорных узлов и сети в целом, но, как будет показано далее, по результатам моделирования не решает задачи обеспечения лучшего покрытия в течение достаточно длительного времени. И это в общем-то естественно, поскольку при создании LEACH такая задача и не ставилась.

Существует достаточно много алгоритмов, которые в той или иной степени пытаются улучшить LEACH. Это алгоритмы, основанные на максимуме остаточной энергии [10,11], местоположении узла-кандидата в головной кластерный узел по отношению к другим узлам [12], информации о топологии сети в текущий момент времени [13–15]. Алгоритм HEED (Hybrid Energy — Efficient Distribution) использует гибридный критерий для выбора головного узла на основе анализа остаточной энергии и расположения близлежащих узлов [11]. Все эти алгоритмы как и LEACH, направлены в первую очередь, на максимизацию длительности функционирования сенсорных узлов и сети в целом.

Однако, с развитием сенсорных сетей появились и другие задачи, требующие пристального внимания. Например, задача о качестве обслуживания (QoS), являющееся важнейшей метрикой для любой сети, в том числе и сенсорной. Действительно, очень важна проблема увеличения срока жизни сенсорной сети. Однако, если эта сеть не будет выполнять свои функции в требуемом объеме, то и сама задача увеличения срока жизни сенсорной сети, не удовлетворяющей требованиям по QoS, стохастична.

В системах мониторинга одним из важнейших требований является его непрерывность, т.е. обеспечение мониторинга параметров на всем пространстве или процессе. Исходя из сказанного, в данной работе была поставлена цель разработать алгоритм выбора головного узла кластера, который обеспечивал бы лучшее покрытие заданной для мониторинга области двумерного пространства (плоскости) в течение достаточно длительного периода. Этот подход означает в целом оптимизацию как срока жизни БСС, так и выполнения БСС своих функциональных задач с заданным QoS в течение достаточно длительного периода времени.

Вопросам покрытия сенсорной сетью некоторого пространства также посвящен ряд работ. Например, в [16] предлагается определять необходимую плотность расположения сенсоров для полного покрытия на основе физических характеристик сенсорных узлов и целей их использования. Минимальное число сенсорных узлов, необходимых для k -покрытия (k — доля от полного покрытия), с высокой вероятностью определяется в [17], где учтено, что отказ сенсорного узла или его нахождение в спящем режиме независимы и равновероятны.

Для последующего решения поставленной в статье задачи по выбору головного узла однородной кластерной сенсорной сети с обеспечением лучшего покрытия в течение достаточно длительного времени используем результаты работ по разработке алгоритма покрытия СРС (Check Perimeter Coverage) [18].

Покрытие по периметру. Рассмотрим подробнее алгоритм СРС. Предположим, что существует набор сенсоров $S = s_1, s_2, \dots, s_n$ в плоскости A . Каждый из сенсоров $s_i, i = 1, n$ определяется

координатами (x_i, y_i) на плоскости A и имеет радиус действия r_i , т.е. может обеспечивать мониторинг любого требуемого объекта или процесса на расстоянии r_i от сенсора s_i .

Введем следующие определения.

Определение 1. Рассмотрим любые два сенсора s_i и s_j . Точка периметра s_j является периметрически покрытой посредством s_i , если эта точка находится внутри области покрытия s_i .

Определение 2. Рассмотрим любой сенсор s_i . Будем говорить, что s_i является k -периметрически покрытым, если все точки периметра s_i являются периметрически покрытыми как минимум k сенсорами помимо самого сенсора s_i . Соответственно, сегмент периметра s_i сенсора является k -периметрически покрытым, если все точки сегмента периметрически покрыты как минимум k сенсорами помимо самого сенсора s_i .

На рис. 3 изображено покрытие сегмента периметра сенсора s_i сенсором s_j .

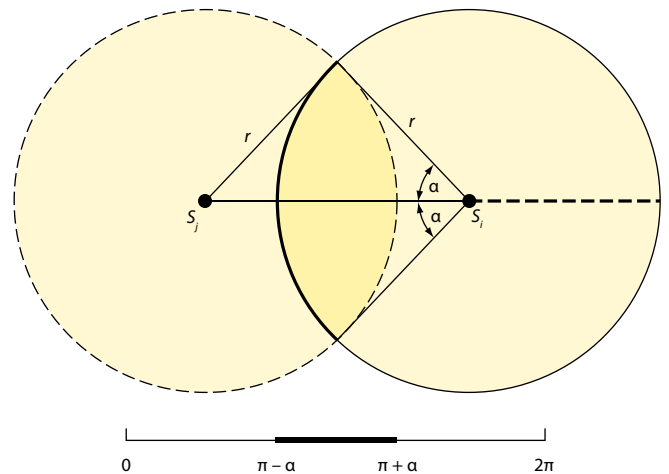


Рис. 3

Рассмотрим два сенсора, расположенных на плоскости с координатами (x_i, y_i) и (x_j, y_j) соответственно. Заметим, что

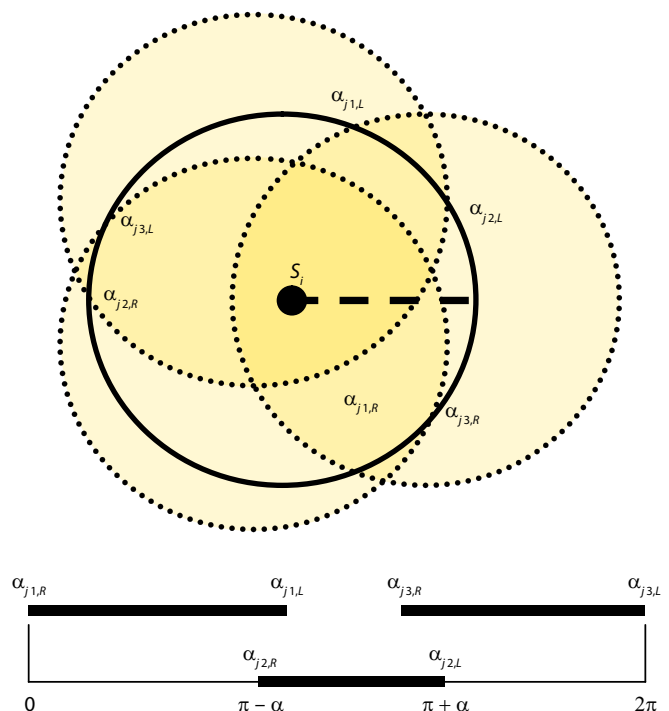


Рис. 4

$$d(s_i, s_j) = \sqrt{|x_i - x_j|^2 + |y_i - y_j|^2}$$

есть расстояние между s_i и s_j . Если $d(s_i, s_j) > 2r$, то s_j не может внести никакого вклада в покрытие периметра s_i . В ином случае покрытие периметра сенсора s_i сенсором s_j может быть определено в соответствии с рис. 3. Без потери общности положим, что s_j покрывает сегмент правой части периметра s_i ($y_i = y_j, x_i > x_j$). При этом угол α находится из уравнения:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{d(s_i, s_j)}{2r}\right).$$

Таким образом, дуга s_i , определяемая углом $[\pi - \alpha, \pi + \alpha]$, является сегментом периметра сенсора s_i , покрытого сенсором s_j .

Данный подход может быть обобщен и на множественное покрытие периметра сенсора s_i различными сенсорами из множества сенсоров, расположенных на плоскости A . Покрытие периметра сенсора s_i множеством сенсоров изображено на рис. 4.

Проверка покрытия периметра s_i может быть осуществлена с помощью алгоритма CPC [18].

Алгоритм 1. Алгоритм проверки периметрического покрытия CPC

Input: Sensor node s

Output: «True» s full Perimeter Coverage,
«False» s not full Perimeter Coverage.

1. Find $N(s) = \{s_j: d(s_i, s_j) \leq 2r\}$
2. **FOR** every s_j in $N(s)$ **do**
 - a. Determine the angle of s_j 's is arch, denoted by $[\alpha_j, L, \alpha_j, R]$, that is perimeter-covered by s_j .
 - b. Place the points α_j, L and α_j, R on the line segment $[0, 2\pi]$
3. **END FOR**
4. Sort all these points in an ascending order into a list L .
5. Mark each point as a left or right boundary of a coverage range.
6. Traverse the line segment $[0, 2\pi]$ by visiting each element in the sorted list L from the left to right and determine the perimeter coverage of s .
7. **IF** line without cutting i.e L without empty element **Then**
 - a. Return «True».
8. **ELSE**
 - a. Return «False».
9. **END IF**

Алгоритм выбора головного узла в кластерной сенсорной сети. Рассмотрим новый алгоритм, обеспечивающий лучшее покрытие в течение достаточно длительного времени и объединяющий решение двух задач: лучшего покрытия на основе периметрического подхода и выбора головного узла с учетом его энергетических характеристик.

Предлагаемый алгоритм назван CHSC (Cluster Head Selection for Coverage) — выбор головного узла в кластере для покрытия. В алгоритме CHSC вводится понятие кластерного радиуса r_{cl} .

На рис. 5 изображена однородная кластерная сенсорная сеть, покрывающая полностью некую плоскость A . Как уже отмечалось, любой из обычных сенсорных узлов (на рис. 5 изображен как член кластера) может стать головным, как впрочем и наоборот. Параметр r_{cl} в определенной степени вносит упорядоченность в структуру кластерной сен-

сорной сети на рис. 5. При этом любой сенсорный узел в пределах своего кластера обращается к головному узлу напрямую (one-hop), в то время как передача информации от головного узла к шлюзу может быть и многошаговой (multi-hop).

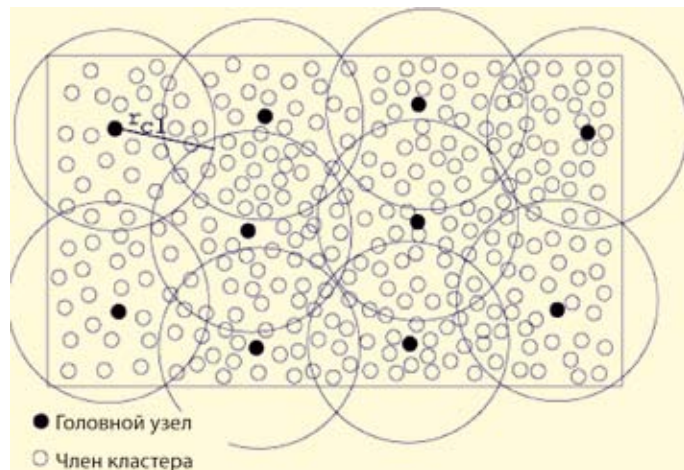


Рис. 5

Алгоритм CHSC вначале собирает информацию об остаточной энергии для всех сенсорных узлов (если остаточная энергия $E(s_i)$ i -го сенсорного узла равна 0, то этот узел, естественно, исключается из дальнейшего функционирования в сенсорной сети). Информация об остаточной энергии рассылается каждым сенсорным узлом в области $2r_{sens}$, где r_{sens} — радиус действия сенсорного узла в сети при выполнении функций мониторинга. После получения информации от всех соседей каждый сенсорный узел выполняет алгоритм CPC (для проверки периметрического покрытия). Принимая во внимание, что сенсорные узлы находятся в статическом положении, ближайшие узлы должны обмениваться информацией о своем местоположении только один раз — в начале жизненного цикла сенсорной сети.

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_{cl} . Решение об объявлении себя головным узлом принимается на основе возможности обеспечения лучшего покрытия и наличия достаточной энергии:

$$E(s_i) > E_{th},$$

где E_{th} — пороговое значение необходимой энергии для головного узла в кластере. Информационное сообщение содержит информацию о местонахождении нового головного узла кластера. После получения сообщения от этого узла все сенсорные узлы в пределах r_{cl} исключают себя из дальнейшего рассмотрения на роль головного узла.

Каждый сенсорный узел содержит 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 может случиться, что два сенсорных узла с подходящими характеристиками объявляют себя головными в пределах одного и того же r_{cl} . Тогда головной узел

в конечном итоге определяется по наибольшей остаточной энергии.

Алгоритм 2. Алгоритм выбора головного узла для покрытия CHSC.

1. $S = \{s: E(s) > 0\}$, $E(s)$ – residual energy of sensor node s
2. $S_{CH} = \{\}$
3. $CL(s_i) = \{\}$ // The members of cluster heads s_i
4. **While** $S \neq \{\}$ **do**
 - a. **If** $(CPC(s_i) == True)$ and $(E(s_i) > E_{th})$ **then**
 - i. $S_{CH} = S_{CH} \cup s_i$
 - ii. $N(i) = \{s: d(s, s_i) < r_{cl}\}$
 - iii. $CL(s_i) = N(i) \cup s_i$
 - iv. $S = S \setminus N(s_i)$
 - b. **End if**
5. **End while**
6. **For** every s_i in S_{CH} **do**
 - a. $\forall s \in CL(s_i)$ do sends Join message to cluster head
7. **End for**

Результаты моделирования. Моделирование осуществлялось на C#NET. Сенсорные узлы предполагаются однородными по своим свойствам. В процессе моделирования реализуются два сценария: первый посвящен анализу влияния эффекта изменения параметра r_{cl} на число головных кластерных узлов и длительность полного покрытия при использовании алгоритма CHSC, а второй – сравнению предложенного алгоритма CHSC с известным базовым алгоритмом LEACH [8].

В обоих случаях в качестве плоскости A используется квадрат $200 \text{ м} \times 200 \text{ м}$, число сенсоров в момент начала жизни сети составляет 400. Шлюз с ССОП расположен в центре сети.

На рис. 6 представлена зависимость среднего числа головных узлов в сети от параметра r_{cl} . Как видим, при значении $r_{cl} = 20 \text{ м}$ число головных узлов (кластеров) в сети очень велико (60), однако при этом обеспечивается наилучшее покрытие во времени. На рис. 7 длительность полного покрытия при значении $r_{cl} = 20 \text{ м}$ более, чем в 2 раза больше длительности полного покрытия при $r_{cl} = 50 \text{ м}$. Заметим, что при $r_{cl} = 20 \text{ м}$ средняя численность узлов в кластере примерно равна 7 (включая головной).

Для сравнения алгоритмов LEACH и предложенного в этой статье CHSC примем значение $r_{cl} = 40 \text{ м}$ (среднее из рассмотренных выше).

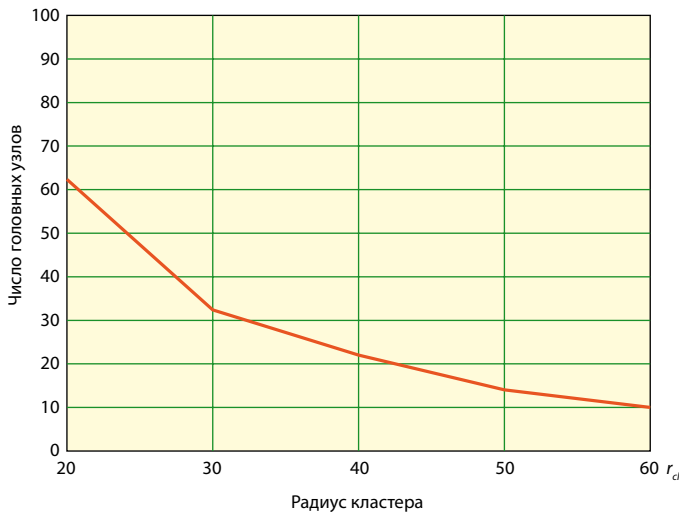


Рис. 6

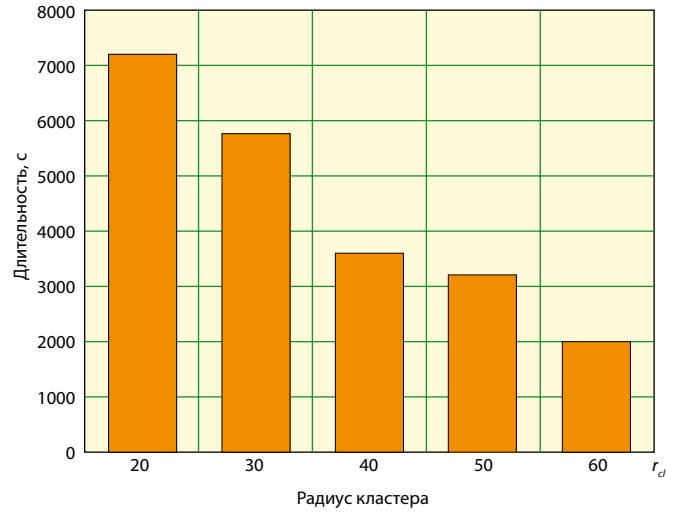


Рис. 7

На рис. 8 приведено сравнение LEACH и CHSC по длительности k -покрытия ($k = 100, 90$ и 80%) сети. Как видим из рисунка, предложенный алгоритм значительно увеличивает длительность существенного покрытия сети. Длительность покрытия больше и при $k = 100\%$, а в случаях $k = 90$ и 80%

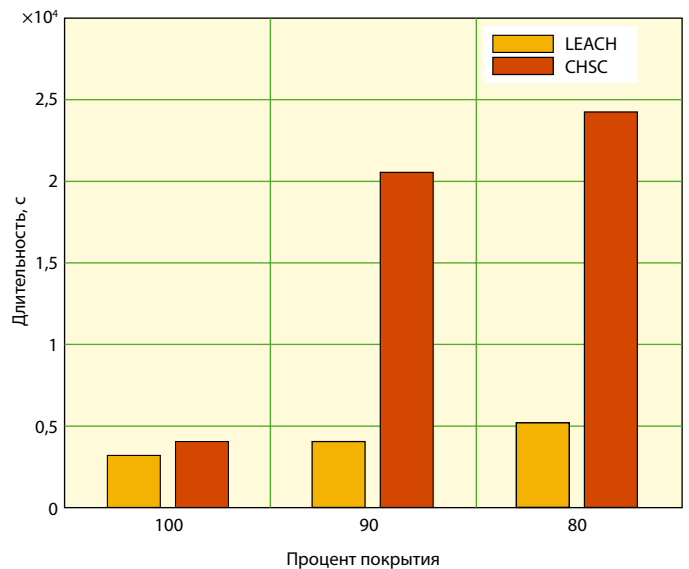


Рис. 8

длительность k -покрытия при использовании алгоритма CHSC превосходит длительность k -покрытия при LEACH в несколько раз.

Одновременно улучшается и такая важная характеристика как число одновременно живущих сенсорных узлов. На рис. 9 приведено сравнение числа живущих узлов при использовании алгоритмов LEACH и CHSC в зависимости от числа циклов моделирования.

Выводы. 1. Одной из основных архитектур при создании сенсорных сетей является кластерное дерево. Для кластерного дерева первоочередная задача – выбор головного узла в кластере.

2. Существующие алгоритмы выбора головного узла в кластере основаны на максимизации срока жизни сенсорной сети в целом. При этом базовый алгоритм LEACH использует для достижения поставленной цели минимизацию потребления энергии сенсорными узлами.

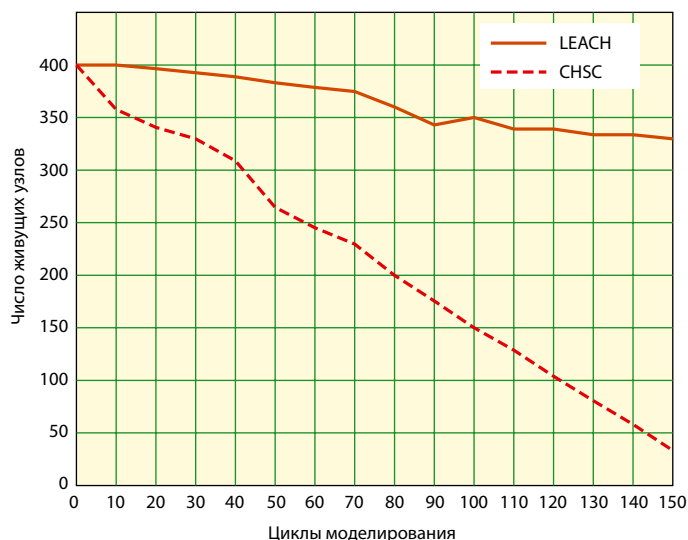


Рис. 9

3. С развитием сенсорных сетей, в первую очередь для целей мониторинга, помимо собственно задачи максимизации срока жизни сенсорной сети появляется задача ее функционирования с заданным качеством. Для сенсорных сетей, предназначенных для обеспечения мониторинга, заданное качество ассоциируется, в первую очередь, с наибольшей по времени зоной покрытия.

4. С помощью статистического моделирования доказано, что предложенный алгоритм CHSC, основанный как на минимизации потребления энергии, так и на обеспечении наибольшей по времени зоны покрытия на базе периметрического алгоритма CPC, обеспечивает лучшее, чем алгоритм LEACH, не только покрытие, но и характеристики жизненного цикла сенсорных узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Кучерявый Е. А. Сети связи общего пользования. Тенденции развития и методы расчета. — М.: ФГУП ЦНИИС, 2008.
2. Кучерявый А. Е., Кучерявый Е. А. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи//Электросвязь. — 2005. — № 5.
3. Молчанов Д. А., Кучерявый Е. А. Приложения беспроводных сенсорных сетей//Электросвязь. — 2005. — № 5.
4. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги//Электросвязь. — 2009. — № 1.
5. IEEE 802.15.4. 200 kbit/s max for interface toys, sensors and automation needs. — 2003.
6. Кучерявый Е. А., Молчан С. А., Кондратьев В. В. Принципы построения сенсоров и сенсорных сетей//Электросвязь. — 2006. — № 6.
7. Heang-Suk Oh et al. Consideration of the GHG monitoring Service Scenario on NGN/Com 13-C45-E, ITU-T. — Geneva, January 2009.
8. Heinzelman W., Chandrakasan A. and Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks//IEEE Transactions on Wireless Communication. — 2002. — Vol.1. — № 4.
9. Heinzelman W., Chandrakasan A. and Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocols for wireless microsensor networks/Proceedings of the Hawaii International Conference on Systems Sciences. — Jan. 2000.
10. Handy M. J., Haase M., Timmermann D. Low energy clustering hierarchy with deterministic cluster head selection/Proceedings of IEEE MWCN. — 2002.
11. Younis O., Fahmy S. Distributed clustering in ad-hoc sensor networks: a hybrid, energy-efficient approach//IEEE Transactions on Mobile Computing. — 2004. — Vol.3. — № 4.
12. Choi W., Das S. K. A framework for energy-saving data gathering using two-phase clustering in wireless sensor networks/Proceedings of MobicQuitous Networking Conference. — 2004.
13. Chatterjee M., Das S. K., Turgut D. WCA: a weighted clustering algorithm for mobile ad hoc networks//Cluster Computing. — 2002. — Vol.5. — № 2.
14. Qin M., Zimmermann R. An energy-efficient voting-based clustering algorithm for sensor networks. Proceedings of the Sixth International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing and First ACIS International Workshop on Self-Assembling Wireless Networks (SNPD/SAWN'05).
15. Shu T., Krunz M., Vruthula S. Power balanced coverage time optimization for clustered wireless sensor networks/Proceedings of MobicQuitous Networking Conference. — 2004.
16. Adlakh S., Srivastava M. Critical density threshold for coverage in wireless sensor networks/Proceedings IEEE WCNC. — 2003.
17. Kumar S., Lai T. H., Balogh J. On k-coverage in a mostly sleeping sensor network/Proceedings ACV MobicCom. — 2004.
18. Huang C., Tseng Y. The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network//Mobile Networks and Applications. — August 2005. — Vol.10. — № 4.

Получено 23.04.09

НОВОСТИ КОМПАНИЙ

Компания «МФИ Софт» подвела промежуточные итоги программы замены софтверных MVTS на решения нового поколения «РТУ-транзит» и объявила о ее продлении до 31 декабря 2009 г.

Согласно условиям программы, операторы, использующие лицензионную версию программного коммутатора MVTS, могут на льготных условиях перейти на решение «РТУ-транзит» и с минимальными затратами осуществить комплексную модернизацию оборудования для управления голосовым трафиком. «РТУ-транзит» — решение, отвечающее всем требованиям

к стабильности и отказоустойчивости при гарантии высокой производительности и качества связи.

Для всех участников программы, решивших заменить софтверный MVTS на решение «РТУ-транзит», «МФИ Софт» обеспечит поддержку в процессе тестирования и переноса конфигурации, дополнительное сервисное обслуживание и консультации.

С момента объявления программы перехода с MVTS на «РТУ-транзит» в ней приняли участие операторы разных стран мира, в том числе крупные российские компании. Решение о продлении сроков программы принято по прось-

бам операторов, заявивших о намерении участвовать в программе осенью 2009 г. В настоящее время переговоры по замене MVTS на «РТУ-транзит» проводятся с операторами России и СНГ, США, Европы и Юго-Восточной Азии.

«РТУ-транзит» — решение следующего поколения по отношению к классическому софтверному MVTS, обладающее усовершенствованными техническими и функциональными характеристиками, включая производительность, поддержку протоколов, резервирование и географическое распределение, а также обслуживание абонентов.