

А. В. Шостак

Национальный аэрокосмический университет имени Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков, Украина

**ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ПОКРЫТИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ**

**Предметом** изучения в статье являются процессы синтеза топологической структуры беспроводной сенсорной сети (БСС). **Целью** является разработка имитационной модели для оценки коэффициента покрытия случайно расположенными узлами БСС. **Задача:** выполнить оценку коэффициента покрытия случайно расположенными узлами БСС. Используемыми **методами** являются: имитационное моделирование, метод Монте-Карло. Получены следующие **результаты**. Согласно разработанной имитационной модели выполнена оценка коэффициента покрытия случайно расположенными узлами БСС в зависимости от длины стороны квадрата плоской территории расположения БСС, числа сенсорных узлов сети, радиуса чувствительности и радиуса связи узла, с учетом и без учета граничного эффекта. Разработанная имитационная модель также позволяет определять связность БСС. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов состоит в следующем: усовершенствована имитационная модель для оценки коэффициента покрытия БСС при случайном расположении сенсорных узлов и контроле связности сети. Результаты проведенного вычислительного эксперимента позволяют выполнять оценку коэффициента покрытия беспроводной сенсорной сети при различном числе узлов сети, радиусе чувствительности и радиусе связи узла с учетом и без учета граничного эффекта.

**Ключевые слова:** беспроводная сенсорная сеть; коэффициент покрытия; связность сети; радиус действия сенсора; радиус чувствительности сенсора.

**Введение**

Под беспроводной сенсорной сетью (БСС) понимается распределенная, самоорганизующаяся сеть множества сенсоров и исполнительных устройств, взаимодействующих между собой посредством радиоканала. Как правило, БСС применяется для сбора данных с устройств, оснащенных сенсорами: датчиком рентгеновского излучения, влажности, температуры, освещенности и т.п. По организации БСС относятся к самоорганизующимся сетям, т.е. к сетям, состоящим из случайного, постоянно меняющегося числа узлов и связей между узлами, которые должны адаптивно подстраиваться для выполнения своих функций [1].

Обычно сенсорные узлы имеют ограниченные ресурсы – емкость источника питания, объем памяти, радиус чувствительности, радиус действия и вычислительные возможности процессора.

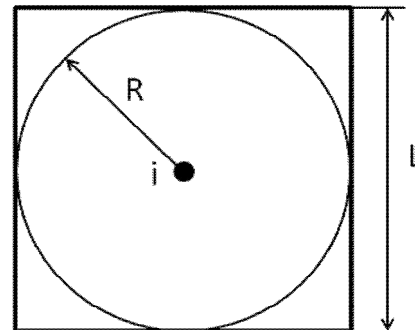
Наряду с такими характеристиками как время жизни БСС и связность сети сенсоров важную роль играет коэффициент покрытия  $R_{cov}$  сетью из  $n$  сенсорных узлов территории расположения БСС [2-5]. Очевидно, что заданное покрытие сетью территории является одним из основных требований, предъявляемых к размещению сенсоров БСС. В статье оценивается коэффициент покрытия сетью территории в зависимости от радиуса чувствительности сенсоров и количества покрывающих территорию сенсоров.

**Основная часть**

Рассмотрим множество одинаковых по своим характеристикам сенсорных узлов на плоской территории в виде квадрата со стороной  $L$ . Пусть  $R$  – радиус зоны обслуживания (или радиус чувствительности) сенсора, т.е. сенсор узла в центре окружности радиуса  $R$  обнаруживает изменение измеряемых характеристик внутри этой окружности.  $r$  – радиус связи узла, т.е. сенсорные узлы, расстояние

между которыми меньше  $r$ , являются связанными и могут непосредственно взаимодействовать друг с другом.

На рис. 1 показан один сенсорный узел  $i$ , находящийся в центре квадрата со стороной  $L$ . Если радиус чувствительности этого сенсора равен  $R=L/2$ , то в этом случае коэффициент покрытия квадрата со стороной  $L$  таким сенсором  $R_{cov}=\pi/4=0,7854$ .



**Рис. 1.** Сенсорный узел  $i$  в центре квадрата со стороной  $L$

В общем случае под коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  территории  $n$  сенсорными узлами будем понимать отношение площади, формируемой на территории зонами покрытия  $n$  сенсоров с радиусом чувствительности  $R$ , к общей площади территории.

Существует два основных способа размещения сенсорных узлов на покрываемой территории – детерминированный и случайный [3, 6]. В первом случае узлы размещаются в заранее определенных точках области покрытия. При этом степень покрытия и связность сети обеспечивается за счет выбора координат этих точек. При случайном размещении узлов последние находятся в случайных точках области, при этом степень покрытия области сетью одинаковых сенсоров зависит от числа сенсоров  $n$ , радиуса чувствительности сенсора  $R$  и площади области.

В табл. 1 в соответствии с [3] и на основании результатов имитационного моделирования для различных размеров квадратной области  $L$  и для радиуса чувствительности  $R = 20$  приведена зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия сети  $R_{cov}$ . Первый столбец табл. 1 соответствует расчетным коэффициентам покрытия  $R_{cov}$  из [3] в зависимости от числа сенсоров сети  $n$  (столбец 3) для квадратной области с  $L=100$ . 2-й, 4-й, 6-й столбцы табл. 1 соответствуют рассчитанным с помощью имитационного моделирования оценкам коэффициента покрытия  $R_{cov}$  в зависимости от числа сенсоров сети  $n$  (столбцы 3, 5, 7) для различных размеров квадратной области  $L$ .

Т.е., например, для  $L = 100$  и  $R=20$  сеть из  $n=11$  узлов обеспечит коэффициент покрытия 0,695. При размере области  $L = 100$  32 узла обеспечивают коэффициент покрытия 0,957. Для  $L=200$  136 сенсоров обеспечат коэффициент покрытия 0,974, а для  $L = 300$  314 сенсоров обеспечат коэффициент покрытия 0,980.

Таблица 1. Зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  ( $R=20$ )

	L = 100		L = 200		L = 300	
$R_{cov}$	$R_{cov}$	$n$	$R_{cov}$	$n$	$R_{cov}$	$n$
0,1	0,104	1	0,110	4	0,100	8
0,2	0,198	2	0,184	7	0,189	16
0,3	0,281	3	0,274	11	0,280	25
0,4	0,358	4	0,353	15	0,368	35
0,5	0,424	5	0,453	21	0,467	48
0,6	0,534	7	0,541	27	0,562	63
0,7	0,623	9	0,642	36	0,655	82
0,8	0,695	11	0,745	48	0,762	110
0,9	0,817	16	0,852	68	0,867	157
0,99	0,957	32	0,974	136	0,980	314

На рис. 2 приведена зависимость числа узлов  $n$  (ось  $OY$ ) от коэффициента покрытия сетью  $R_{cov}$  (ось  $OX$ ) для различных  $L$ , построенная на основании данных из табл. 1.

Оценка коэффициента покрытия  $R_{cov}$  в таблице 1 выполнялась на основании вычислительного эксперимента.

Для оценки каждого значения коэффициента покрытия 1000 раз генерировалась сеть из  $n$  узлов с координатами, равномерно распределенными в квадрате со стороной  $L$ . Для каждого варианта размещения  $n$  узлов с помощью метода Монте-Карло считался коэффициент покрытия. Оценка коэффициента покрытия  $R_{cov}$  в табл. 1 соответствует результату усреднения коэффициентов покрытия для 1000 вариантов размещения  $n$  узлов в квадрате со стороной  $L$ .

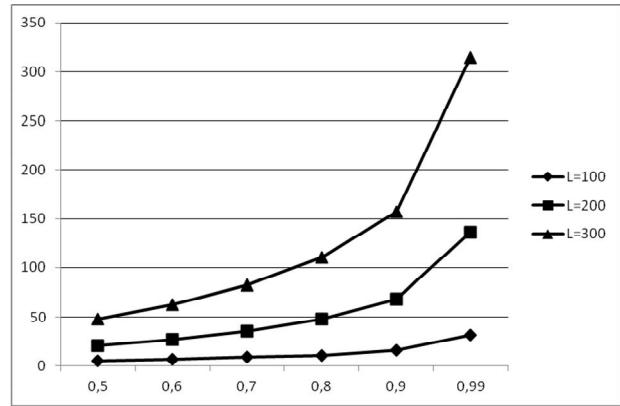


Рис. 2. Зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$

В табл. 2 для размера области  $L=200$  и различных радиусов чувствительности сенсора  $R$  приведена зависимость коэффициента покрытия  $R_{cov}$  от числа узлов сети  $n$ . Так для обеспечения  $R_{cov} = 0,5$  в области  $L=200$  при  $R=10$  потребуется 94 сенсора, при  $R=20$  потребуется 24 сенсора, а при  $R=30$  потребуется 11 сенсоров.

Таблица 2. Зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  для различных  $R$  ( $L=200$ )

	R=10	R=20	R=30
$R_{cov}$	$n$	$n$	$n$
0,5	94	24	11
0,6	125	32	15
0,7	164	42	19
0,8	220	56	26
0,9	317	80	38
0,99	650	173	83

На рис. 3 приведена зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  для размера сети  $L=200$  при различных радиусах чувствительности сенсора  $R$ , построенная в соответствии с данными табл. 2.

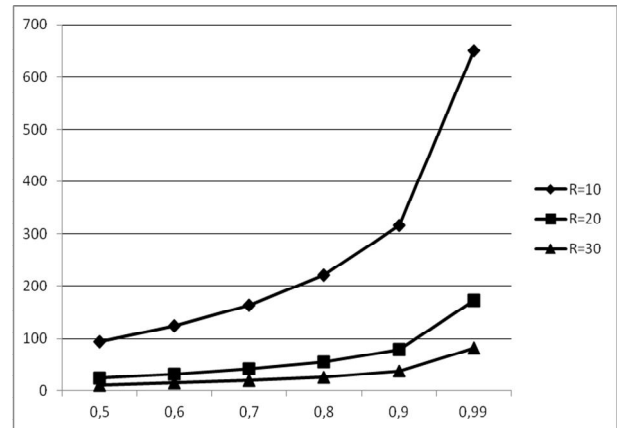


Рис. 3. Зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  при различных радиусах  $R$

В табл. 3 для размера области  $L=200$  и радиуса чувствительности сенсора  $R=20$  приведена зависимость коэффициента покрытия  $R_{cov}$  от числа узлов сети  $n$  для двух случаев – без учета граничного эффекта (столбец 2) и с учетом (столбец 3).

При учете граничного эффекта сенсоры реально размещаются в квадратной области со стороной  $(L-R)$ , а без учета – в квадратной области со стороной  $L$  [3].

На рис. 4 приведена зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  для размера сети  $L=200$  и радиуса чувствительности сенсора  $R=20$  с учетом и без учета граничного эффекта, построенная в соответствии с данными табл. 3.

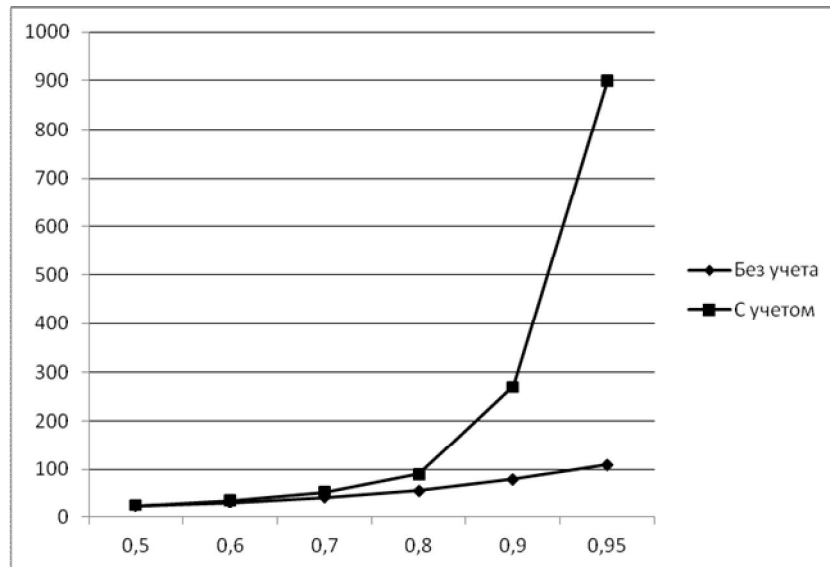


Рис. 4. Зависимость между числом узлов  $n$  и покрытием сети  $R_{cov}$  с учетом и без учета граничного эффекта

В приведенных выше оценках коэффициента покрытия  $R_{cov}$  (табл. 1-3) связность сети не контролировалась, т.е. сеть сенсоров могла быть как связанной так и не связанной.

В табл. 4 для стороны квадрата  $L=200$ , радиуса чувствительности узла  $R=20$ , радиуса связи узла  $r=40$  и без учета граничного эффекта приведена зависимость коэффициента покрытия  $R_{cov}$  от числа узлов  $n$  с оценкой числа связанных БСС на 10000 сгенерированных случайным образом вариантов.

Так для обеспечения  $R_{cov} = 0,501$  при  $R=20$  и  $r=40$  потребуется 24 сенсора, причем из 10000 сгенерированных вариантов БСС только 14 оказались связными.

## Выводы

Результаты проведенного вычислительного эксперимента позволяют выполнять оценку коэффициента покрытия БСС при различном числе узлов сети  $n$ , радиусе чувствительности  $R$  и радиусе связи узла  $r$  с учетом и без учета граничного эффекта.

Таблица 3. Зависимость между числом узлов  $n$  и коэффициентом покрытия  $R_{cov}$  без учета и с учетом граничного эффекта ( $L=200, R=20$ )

$R_{cov}$	$n$	$n$
1	2	3
0,5	24	25
0,6	32	36
0,7	42	53
0,8	56	91
0,9	80	270
0,95	110	900

Таблица 4. Зависимость коэффициента покрытия  $R_{cov}$  от числа узлов  $n$  с оценкой числа связанных БСС

$R_{cov}$	$n$	Связных БСС из 10000 вариантов
1	2	3
0,501	24	14
0,602	32	140
0,700	42	940
0,797	56	4062
0,894	80	8092
0,990	173	9978

Перспективным направлением дальнейших исследований может являться разработка алгоритмов построения связанных БСС с детерминированным распределением координат узлов сети на произвольной территории с заданным коэффициентом покрытия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети / А. Е. Кучерявый, А. В. Прокопьев, Е. А. Кучерявый. – СПб.: Любавич, 2011. – 312 с.

2. Шостак А.В. Оценка вероятности связности беспроводной сенсорной сети / А. В. Шостак // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава, ПНТУ, 2017. – Вип. 2(42). – С. 158-160.
3. Xing X. A square-based coverage and connectivity probability model for WSNs / X. Xing, G. Wang, J. Li // International Journal of Sensor Networks. – 2015. – Vol. 19, No. 3/4. – P. 161-170.
4. Sun Z. Optimization coverage of wireless sensor networks based on energy saving / Z. Sun, H. Li, H. Chen, W. Wei // International Journal of future generation communication and networking. – 2014. – Vol. 7, No. 4. – P. 35-48.
5. Ruban, I. Перерозподіл навантаження базових станцій в мобільних мережах зв'язку / I. Ruban, H. Kuchuk, A. Kovalenko // Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості. – № 1 (1). – С. 75-81, режим доступу : <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075>.
6. Денисенко В. С. Модифікація алгоритма побудови кратчайшого остовного дерева для беспроводной сенсорной сети / В. С. Денисенко, А. В. Шостак // Системи обробки інформації. – Харків : ХНУПС, 2010. – Вип. 2 (83). – С. 75-77.

## REFERENCES

1. Kucheryavy, A.E., Prokopiev, A.V. and Kucheryavy, A.V. (2011), *Self-organizing networks*, Lubavitch, St.P., 312 p.
2. Shostak, A.V. (2017), "Evaluation of the probability of connectivity of a wireless sensor network", *Control, navigation and communication systems*, No. 2 (42), pp. 158-160.
3. Xing, X., Wang, G. and Li, J. (2015), "A square-based coverage and connectivity probability model for WSNs", *International Journal of Sensor Networks*, Vol. 19, No. 3/4, pp.161-170.
4. Sun, Z., Li, H., Chen, H. and Wei W. (2014), "Optimization coverage of wireless sensor networks based on energy saving", *International Journal of future generation communication and networking*, Vol. 7, No. 4, pp. 35-48.
7. Ruban, I., Kuchuk, H. and Kovalenko A. (2017), "Redistribution of base stations load in mobile communication networks", *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, No. 1(1), pp. 75-81, available at: : <http://dx.doi.org/10.30837/2522-9818.2017.1.075>.
5. Denisenko, V.S. and Shostak, A.V. (2010), "Modification of the algorithm for constructing the shortest spanning tree for a wireless sensor network", *Information processing systems*, No. 2 (83), pp. 75-77.

Received (Надійшла) 02.04.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.05.2018

## Оцінка коефіцієнта покриття бездротової сенсорної мережі

А. В. Шостак

**Предметом** вивчення в статті є процеси синтезу топологічної структури бездротової сенсорної мережі (БСМ). **Метою** є розробка імітаційної моделі для оцінки коефіцієнта покриття випадково розташованими вузлами БСМ. **Завдання:** виконати оцінку коефіцієнта покриття випадково розташованими вузлами БСМ. Використовуваними **методами** є: імітаційне моделювання, метод Монте-Карло. Отримані наступні **результати**. Згідно з розробленою імітаційною моделлю виконано оцінку коефіцієнта покриття випадково розташованими вузлами БСМ в залежності від довжини сторони квадрата плоскою територією розташування БСМ, числа сенсорних вузлів мережі, радіусу чутливості і радіуса зв'язку вузла, з урахуванням і без урахування граничного ефекту. Розроблена імітаційна модель також дозволяє визначати зв'язність БСМ. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: вдосконалена імітаційна модель для оцінки коефіцієнта покриття БСМ при випадковому розташуванні сенсорних вузлів і контролі зв'язності мережі. Результати проведеного обчислювального експерименту дозволяють виконувати оцінку коефіцієнта покриття бездротової сенсорної мережі при різній кількості вузлів мережі, радіусі чутливості і радіусі зв'язку вузла з урахуванням і без урахування граничного ефекту.

**Ключові слова:** бездротові сенсорні мережі, коефіцієнт покриття, зв'язність мережі, радіус дії сенсора, радіус чутливості сенсора.

## Estimation of coverage factor of a wireless sensor network

A. V. Shostak

The **subject matter** of the study in the article are the processes of synthesis of the topological structure of the wireless sensor network (WSN). The **goal** is to develop a simulation model for estimating the coverage factor of randomly located WSN nodes. The **task**: to carry out an estimation of the coverage factor by randomly located WSN nodes. The **methods** used are: simulation modeling, Monte Carlo method. The following **results** are obtained. According to the developed simulation model, the coverage factor of randomly located WSN nodes is evaluated depending on the side length of the flat area of the WSN location, the number of sensor nodes of the network, the radius of sensitivity and the communication radius of the node, taking into account and without taking into account the boundary effect. The developed simulation model also allows to determine the connectivity of the WSN. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows: the simulation model for estimating the coverage factor of the WSN with a random arrangement of sensory nodes and monitoring the connectivity of the network has been improved. The results of the computational experiment make it possible to evaluate the coverage coefficient of a wireless sensor network for a different number of network nodes, the radius of sensitivity and the radius of communication of a node with and without the boundary effect.

**Keywords:** wireless sensor network; coverage factor; network connectivity; radius of the sensor; radius of sensitivity of the sensor.