

CALCULATION OF EXPECTED COVERAGE AREA OF WIRELESS SENSOR NETWORK WITH IMPERFECT NODES

A. V. Kucherov, D. A. Migov*

Novosibirsk State University
630090, Novosibirsk, Russia

*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

Wireless sensor networks (WSN) are widely used for monitoring various objects. It can be a building, a certain area, a perimeter, a human body or an animal's body, and other objects. The nodes of such a network (sensors) contain transducers that can be very different. The data received from sensor is transferred to the sink via transit sensors using wireless communication. Sink in a WSN is the central functional node that receives and processes all data, or a gateway for data transmission to the base station for processing.

Let's represent the structure of a WSN in the form of a random un-oriented graph $G = (V, E, K)$, in which: V is a set of vertices, E is a set of edges, K is a set of a dedicated vertices of the graph (terminals) which corresponds to the WSN sinks. The sensors of a WSN are exposed to independent failures, what is described by the probability of the presence of each vertex in the graph (node reliability). In the scope of this paper it is assumed that communication channels are absolutely reliable. And sinks are also absolutely reliable.

In our previous work, we have reviewed such an index of a reliability for WSN with unreliable nodes as a probability of the possibility for network sinks to collect information from a certain number of sensors, which is limited from below by a predetermined threshold value. In this paper, we apply this approach for analysis of a reliable network coverage of some given monitoring area. Two reliability indexes are reviewed: expected value of the coverage area, and the probability that the monitoring area of is not less than the pre-defined threshold value. This area is formed by all points of the plane that are in the neighborhood of a workable sensor connected to the sink via workable nodes.

Algorithms are proposed for the accurate calculation of those indices based on the known factorization method. This technique partitions the probability space into two sets, based on the success or failure of one network's particular element (node or link). The chosen element is called factored element. So we obtain two subgraphs, in one of them factored element is absolutely reliable (branch of contraction) and in second one factored element is absolutely unreliable that is, absence (branch of removal). The probability of the first event is equal to the reliability of factored element; the probability of the second event is equal to the failure probability of factored element. Thereafter obtained subgraphs are subjected to the same procedure. The law of total probability gives expression for the network reliability.

A strategy of selecting the next element for factorization and various types of final graphs are also proposed and reviewed. In this case, it is necessary to take into account the performance of the connectivity condition of efficient sensors with sink and the availability of their sufficient quantity to cover a given area. In order to ensure connectivity with the sink of the current element during factorization in the course of its reliability increase, it is suggested to select the next element for factorization from adjacent nodes with absolutely reliable nodes which are connected to the sink using the same absolutely reliable sensors. The first element is taken from the adjacent with the sink. With

this selection strategy, there is no need for connectivity testing, and all absolutely reliable sensors automatically contribute to the coverage area. If there are no such elements, then we have received a final network.

To calculate the coverage area of final networks several approaches are proposed. Their comparative analysis is given. The pseudocodes of the proposed algorithms and a result of the numerical experiments are given.

Key words: wireless sensor network, network reliability, random graph, factoring method, connectivity, monitoring area.

References

1. Moore E. F., Shannon C. E. Reliable circuits using less reliable relays // *Journal of the Franklin Institute*. 1956. P. 281–297.
2. Page L. B., Perry J. E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability // *IEEE Trans. on Reliability*. 1998. Vol. 37. N 3. P. 259–267.
3. AboElFotouh H. M. F., Iyengar S. S., Chakrabarty K. Computing reliability and message delay for cooperative wireless distributed sensor networks subject to random failures // *IEEE Transactions on Reliability*. 2005. V. 54, N 1. P. 145–155.
4. Shazly M. H., Elmallah E. S., AboElFotouh H. M. F. A three-state node reliability model for sensor networks // *Proc. of IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'2010)*. Miami, USA. P. 1–5.
5. Migov D. A. Ob optimal'nom razmeshchenii stokov v besprovodnyh sensornyh setyah // *Russian Physics Journal*. 2015. V. 58. N 11/2. P. 40–46.
6. Özgür B., Akan I. F., Akyildiz I. H., Sankarasubramanian. Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks // *Proc. of the 4th ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2003)*. Annapolis, USA, 2003. P. 177–188.
7. Mahmood M. A., Winston K. G., Seah, Ian Welch. Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead // *Computer Networks*. 14 March 2015. Vol. 79. P. 166–187.
8. Marmol F. G., Perez G. M. TRMSim-WSN, Trust and Reputation Models Simulator for Wireless Sensor Networks // *In Proc. of IEEE Conf. on Communications, 2009. ICC '09*. Doi: 10.1109/ICC.2009.5199545
9. Cai W., Jin X., Zhang Y., Chen K., Tang J. Research on reliability model of large-scale wireless sensor networks // *Proc. of IEEE Int. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'2006)*. Wuhan, China, 2006. P. 1–4.
10. Shazly M. H., Elmallah E. S., Harms J. J., AboElFotouh H. M. F. On area coverage reliability of wireless sensor networks // *Proc. of IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN'2011)*. Bonn, Germany. P. 580–588.
11. Rodionov A. S. Kumulyativnye ocenki pokazatelej strukturnoj nadezhnosti seti i ih ispol'zovanie // *Problemy informatiki*. 2017. Vol. 1 (34). P. 15–24.

РАСЧЕТ ОЖИДАЕМОЙ ПЛОЩАДИ ПОКРЫТИЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ С НЕНАДЕЖНЫМИ УЗЛАМИ

А. В. Кучеров, Д. А. Мигов*

Новосибирский государственный университет
630090, Новосибирск, Россия

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 519.17+519.24

Рассматривается беспроводная сенсорная сеть, в которой сенсоры подвержены случайным отказам. Сеть задается с помощью случайного графа с ненадежными вершинами, распределенными в двумерной области. Для каждого узла заданы его координаты и вероятность исправной работы, а также радиус окрестности, в пределах которой сенсор ведет мониторинг. В качестве показателей надежности рассматриваются математическое ожидание площади области покрытия и вероятность того, что площадь области мониторинга не меньше заданного наперед порогового значения. Предлагаются точные методы для расчета данных показателей. Для вычисления площади покрытия в частных реализациях сети предложено несколько подходов. Представлены результаты численных экспериментов

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, надежность сети, случайный граф, факторизация, связность, область мониторинга.

Введение. Беспроводные сенсорные сети (БСС) широко используются для мониторинга различных объектов. Это может быть здание, определенная область, периметр, человеческое тело или тело животного и другие объекты. Узлы такой сети (сенсоры) содержат датчики, которые могут быть самыми разнообразными. Данные, полученные сенсором, передаются в сток через транзитные сенсоры посредством беспроводной связи. Сток в БСС является центральным функциональным узлом, принимающим и обрабатывающим все данные, или шлюзом для передачи данных на обработку базовой станции. Как правило, БСС содержит один или несколько стоков.

Для анализа надежности сетей различного назначения, как правило, используется аппарат случайных графов [1–2]. При рассмотрении ненадежных беспроводных сенсорных сетей также пользуются различными моделями на основе случайных графов [3–5]. Например, в [3] рассматривается случай ненадежных сенсоров, а надежность сети определяется как вероятность существования пути от стока (в предположении, что сток единственный) к по крайней мере одному неотказавшему сенсору в заданном кластере (targeting cluster). В другой работе этих же авторов [4] исследуется модель, в рамках которой каждый узел БСС может находиться в одном из трех состояний: работоспособном, отказавшем и способном только быть транзитным узлом для передачи данных от других сенсоров к стоку.

Работа поддержана РФФИ. Коды проектов № 17-47-540997, № 18-07-00460.

Третье состояние возможно при отказе датчиков в узле с сохранением модуля для беспроводной связи.

В работе [6] надежность оценивается в успешно переданных/обработанных пакетах данных, что является трудно вычисляемой величиной и требует значительного объема вычислений посредством имитационного моделирования. Похожий подход рассматривается также и другими авторами [7–8]. Также рассматриваются и различные подходы к надежному покрытию сетью заданной области [9–10]

В нашей прошлой работе [5] рассматривается такой показатель надежности для БСС с ненадежными узлами как вероятность возможности стокам сети собирать информацию с определенного числа сенсоров, которое ограничено снизу заданным пороговым значением. В данной статье мы применяем подобный подход к анализу надежного покрытия сетью некоторой заданной области мониторинга. Рассматриваются два показателя надежности: математическое ожидание площади области покрытия и вероятность того, что площадь области мониторинга не меньше заданного наперед порогового значения. Предлагаются алгоритмы для точного расчета данных показателей на основе известного метода факторизации. Предлагается также стратегия выбора очередного элемента для факторизации и рассмотрены различные виды конечных графов. Для вычисления площади покрытия в частных реализациях сети, определяемых присутствием или отсутствием каждого из сенсоров, предлагается несколько подходов.

1. Базовые определения и обозначения. Будем представлять структуру БСС в виде случайного неориентированного графа $G = (V, E, K)$, в котором: V — множество вершин, E — множество ребер, K — множество выделенных вершин графа (терминалов, полюсов). Вершины графа G соответствуют узлам сети, ребра — связям между узлами, а выделенные вершины — стокам. Через N обозначим количество вершин графа, через M — количество ребер. Предполагается, что сеть содержит хотя бы один сток.

Сенсоры БСС подвержены независимым отказам, что описывается значениями вероятностей присутствия каждой вершины в графе. Далее эта характеристика будет называться надежностью узла. В рамках данной работы предполагается, что каналы связи являются абсолютно надежными. Надежность узла v обозначим как p_v . Стоки также полагаются абсолютно надежными. Предполагается, что сеть остается работоспособной при отказе определенного количества сенсоров при сохранении покрываемой сетью площади. Данная область образуется всеми точками плоскости, находящимися в окрестности мониторинга какого-либо работоспособного сенсора, связанного со стоком посредством работоспособных узлов.

Определим элементарное событие Q как частную реализацию графа, определяемую присутствием или отсутствием каждой из вершин. Через V_Q обозначим множество исправных вершин в реализации Q . Пространство элементарных событий обозначим Ω .

Вероятность элементарного события равна произведению вероятностей присутствия исправных вершин, умноженному на произведение вероятностей отсутствия отказавших вершин:

$$P(Q) = \prod_{v \in V_Q} p_v \prod_{v \notin V_Q} (1 - p_v). \quad (1)$$

Определим случайную величину $S : \Omega \rightarrow R$ следующим образом: $S(Q)$ — это площадь мониторинга сети Q . Как уже упоминалось, данная область образуется всеми точками,

находящимися в окрестности какого-либо работоспособного сенсора, связанного со стоком (выделенным узлом сети) посредством работоспособных узлов.

Элементарное событие Q будем называть успешным, если площадь покрываемой сетью области не меньше, чем заданное пороговое значение: $S(Q) \geq p_{threshold}$.

Произвольное событие или объединение некоторых элементарных событий будем называть успешным, если оно состоит только из успешных элементарных событий.

Рассмотрим два показателя надежности БСС. Первый — это математическое ожидание площади покрытия,

$$M_S(G) = \sum_Q (S(Q) \times P(Q)), \quad (2)$$

второй — вероятность того, что область мониторинга не меньше заданного наперед порогового значения, т. е. вероятность события, образованного всеми успешными элементарными событиями. Будем обозначать данный показатель как $R_S(G)$:

$$R_s(G) = \sum_Q P(Q), \quad (3)$$

где $Q \in \Omega : S(Q) \leq p_{threshold}$; $p_{threshold}$ — пороговое значение.

2. Точный расчет надежности беспроводной сенсорной сети.

2.1. *Метод факторизации.* Точный расчет различных показателей сетевой надежности осуществляют, как правило, при помощи так называемого метода факторизации (Мура-Шеннона, ветвления) [1–2]. В основе метода лежит разбиение вероятностного пространства на два подмножества. Для этого выбирается произвольный ненадежный элемент сети. Далее рассматриваются две новые сети, в одной из которых элемент абсолютно надежен, в другой — отсутствует, т. е. удаляется. Вероятность получения первой сети равна надежности элемента, вероятность второго — вероятности отказа элемента. Полученные сети рекурсивно подвергаются факторизации, при этом формула полной вероятности выражает надежность сети при факторизации. Рекурсии продолжаются до получения абсолютно ненадежной сети, либо до получения сети, надежность которой можно вычислить без дальнейшей факторизации. Такую сеть будем называть конечной. Расчет предложенных показателей надежности БСС можно делать по тому же принципу. Формулы полной вероятности в таком случае принимают следующий вид:

$$R_S(G) = p_v R_S(G_v^*) + (1 - p_v) R_s(G \setminus v), \quad (4)$$

$$M_S(G) = p_v M_S(G_v^*) + (1 - p_v) M_s(G \setminus v), \quad (5)$$

где: G_v^* — граф G , в котором узел v абсолютно надежен; $G \setminus v$ — граф, полученный путем удаления узла v .

Однако в данном случае необходимо учитывать выполнение условия связности работоспособных сенсоров со стоком и наличие достаточного их количества для покрытия области заданной площади. Чтобы обеспечить связность со стоком текущего элемента при факторизации в процессе его онадеживания, предлагается выбирать следующий элемент для факторизации из смежных с абсолютно надежными узлами, связанных со стоком посредством таких же абсолютно надежных сенсоров. Первый элемент берется из смежных стоку.

При такой стратегии выбора нет необходимости делать проверку связности, а все абсолютно надежные сенсоры автоматически вносят вклад в площадь покрытия. Если таких элементов нет, то мы получили конечную сеть. При расчете ожидаемой площади покрытия в таком случае производится расчет площади, соответствующей полученному событию. При расчете вероятности покрытия заданной площади каждый раз по ветви онаживания необходимо проверять, не достигла ли площадь мониторинга заданного порогового значения. Если да, то выход из функции с возвращением единицы. Также каждый раз по ветви удаления необходимо проверять, возможно ли набрать площадь мониторинга до заданного порогового значения с помощью еще не рассмотренных узлов. Если нет, то выход из функции со возвращением нуля.

Таким образом, метод представляет собой рекурсивный обход по графу, в котором для каждого конечного элементарного события строится новая структура сети и ведется расчет площади с помощью одного из 4-х рассмотренных далее методов покрытия этой сети, в зависимости от связности частей сети со стоком. Ниже приводятся псевдокоды алгоритмов факторизации для расчета двух рассматриваемых показателей надежности.

2.2. *Псевдокод алгоритмов.* Введем ряд обозначений:

- `nodeRel` — множество надежностей элементов, используется для отслеживания уже посещенных вершин;
- `getNode` — множество индексов вершин;
- `getRelations(index)` — целочисленная функция, возвращает множество индексов связанных вершин с `index`;
- `getReliability(index)` — вещественная функция, возвращает значение надежности элемента `index`;
- `drawCircle` — индекс метода подсчета площади;
- `countSquare(nodeRel, Realization, drawCircle)` — вещественная функция расчета площади;
- `Realization` — входной параметр, определяет тип площади;
- `recursiveMethod(nodeRel, drawCircle)` — математическое ожидание площади покрытия;
- `recursiveDiffMethod(nodeRel, drawCircle)` — показатель надежность сети с пороговым значением;
- `getCoverageFlag()` — вещественная функция, возвращает значение установленного порогового значения.

Вещественная функция `recursiveMethod(nodeRel, drawCircle)` возвращает значение $M_S(G)$. Ниже приведен псевдокод.

```

function recursiveMethod(nodeRel, drawCircle)
  result ← 0
  v ← 0
  for all u ∈ getNode do
    if nodeRelu = 1 then
      while relations = (i, ..., e) ∈ getRelations(nodes) do
        // для всех связанных вершин с текущей
        if (nodeRelie > 0) and (nodeRelie < 1) then
          v ← ie // выбор вершины
          Break

```

```

        end if
    end while
    end if
    if  $v > 0$  then Break
    end if
end for
if  $v > 0$  then //если найдена вершина
     $nodeRel_v \leftarrow 1$ 
     $result \leftarrow getReliability(getNodes_v) \times recursiveMethod(nodeRel, drawCircle)$ 
     $nodeRel_v \leftarrow 0$ 
     $result \leftarrow (1 - getReliability(getNodes_v)) \times recursiveMethod(nodeRel, drawCircle)$ 
else if  $v = 0$  then
     $result \leftarrow countSquare(nodeRel, Realization, drawCircle)$ 
end if
Return result
end function

```

Вещественная функция $recursiveDiffMethod(nodeRel, drawCircle)$ возвращает $R_S(G)$.
Ниже приведен псевдокод.

```

function recursiveDiffMethod( $nodeRel, drawCircle$ )
     $result \leftarrow 0$ 
     $v \leftarrow 0$ 
     $square \leftarrow countSquare(nodeRel, Realization, drawCircle)$ 
    if  $square > getCoverageFlag( )$  then
         $result \leftarrow 1$ 
    else
        for all  $nodes_u \in getNodes$  do
            if  $nodeRel_u = 1$  then
                while  $relations = (i, \dots, e) \in getRelations(nodes_u)$  do // для всех связанных
                    вершин с текущей
                        if ( $nodeRel_{ie} > 0$ ) and ( $nodeRel_{ie} < 1$ ) then
                             $v \leftarrow ie$  //выбор вершины
                            Break
                        end if
                    end while
                end if
            end if
        end for
        if  $v > 0$  then Break
        end if
    end for
    if  $v > 0$  then //если найдена вершина
         $nodeRel_v \leftarrow 1$ 
         $result \leftarrow getReliability(getNodes_v) \times recursiveDiffMethod(nodeRel, drawCircle)$ 
         $nodeRel_v \leftarrow 0$ 
         $result \leftarrow (1 - getReliability(getNodes_v)) \times recursiveDiffMethod(nodeRel,$ 
 $drawCircle)$ 
    end if
end function

```

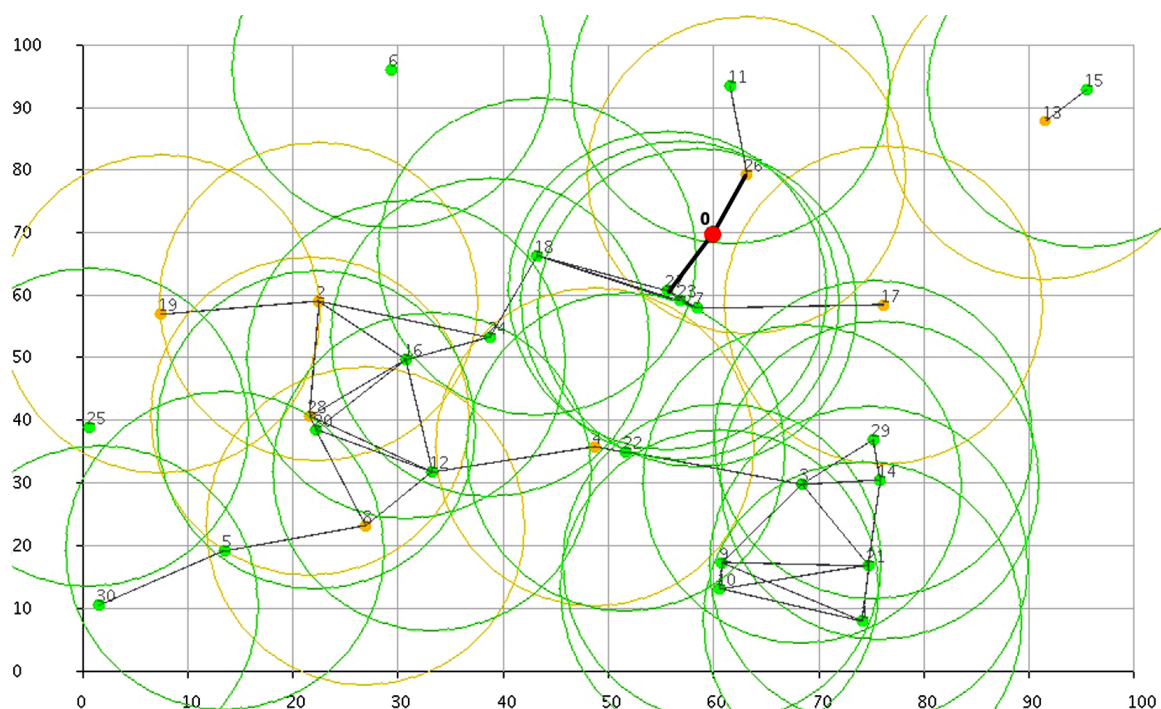


Рис. 1. Структура тестовой БСС

end if

Return result

end function

2.3. *Разные методы учета площади.* Мы предлагаем 4 метода подсчета площади в частных реализациях, которые мы обозначили как *test*, *image*, *matrix – simpleCircle*, *matrix – midpointCircle*.

— *Test*. Площадь каждого элемента рассматривается как единичное значение. Не учитывает пересечения областей покрытия для каждого из узлов. Используется для расчета такого показателя надежности, как математическое ожидание числа узлов, связанных с выделенным узлом [11].

— *Image*. Концепция метода заключена в преобразовании реализации графа в представление графа на языке DOT. Далее граф в формате файла .dot считывается программой. Программа создает дочерний процесс — вызывает стороннюю программу Graphviz, которая считывает соответствующий .dot файл и строит растровую реализацию графа с закрашенными областями покрытия каждого сенсора. Далее происходит подсчет количества закрашенных точек (пикселей) соответствующей реализации и вычисляется относительная площадь мониторинга реализации как отношение закрашенных пикселей ко всем. Данный метод достаточно медленный, так как он включает в себя операции чтения и записи в ПЗУ. А также операции записи в буфер обмена, что является критической секцией для обработки данных (запись/чтение изображений) в многопоточном режиме. Однако, данное узкое место можно устранить путем использования своего буфера обмена для поддержки многопоточного режима.

— *matrix, simpleCircle*. Метод подсчета площади, основанный на заполнении матрицы элементами, образующимися при закрашивании окружностей. Окружность строится по

Таблица 1

Результаты работы для разных методов подсчета площади

Метод	$p = 0,99$ (все узлы)	$p = 0,9$ (все узлы)	$p = 0,7$ (все узлы)
\tilde{R}_{image}	0,958492	0,948649	0,871747
$\tilde{R}_{simpleCircle}$	0,862326	0,827243	0,713897
$\tilde{R}_{midpointCircle}$	0,862657	0,827620	0,714426

формуле $x^2 + y^2 \leq r^2$. Данный метод допускает ошибки при отрисовке окружности, что дает менее точный результат, но уменьшает затрачиваемое процессорное время на обработку матрицы.

— *matrix, midpointCircle*. Метод подсчета площади, основанный на алгоритме средней точки окружности.

Метод *image* представляет собой наглядный метод — каждое состояние графа сохраняется в виде параметризованной структуры графа на языке dot и растрового изображения области покрытия соответствующей реализации сети. При этом имеется большой недостаток — количество затрачиваемого процессорного времени велико. Его актуальное предназначение — калибровка дополнительных входных параметров. *simpleCircle* является быстрым методом подсчета площади, но учитывает ошибки отрисовки. Является менее точным, нежели *midpointCircle*, который является оптимальным методом для подсчета площади.

3. Численные эксперименты. Входная БСС задана графом, обозначенным на рис. 1. Граф сгенерирован с помощью свободно распространяемой утилиты TRMSim-WSN [8]. Количество вершин $N = 30$. Красная вершина с нулевым индексом — сток. Предполагается, что окрестности, в которых сенсоры ведут мониторинг, имеют одинаковый радиус для всех сенсоров. На рисунке для каждого сенсора приведена и соответствующая окрестность.

Ниже приведены значения математического ожидания относительной площади мониторинга, за единицу взята общая площадь рассматриваемой области. Рассмотрены различные методы подсчета площади и различные значения надежности сенсоров p .

Абсолютные значения площади в принятых единицах измерения можно вывести основываясь на формуле:

$$R_{countMethod} = \tilde{R}_{countMethod} \times \widetilde{Square}_{All|Max_{countMethod}} \times \frac{Square_{Max}}{Accuracy \times imageScale}, \quad (6)$$

где, $\widetilde{Square}_{All|Max_{countMethod}}$ — относительное значение площади от максимально возможного ($p = 1$ для всех узлов); $Square_{Max}$ — максимальная область площади; $Accuracy$ — значение точности, зависит от размера сетки. Например, при значении сетки 100×100 , где сетка — ограничение области покрытия, $Accuracy = 100$. $imageScale$ — множитель масштабирования для полученных растровых изображений.

Использовались следующие входные параметры:

- $Square_{Max} = 100 \times 100 = 10000$;
- $Accuracy = 100$;
- $imageScale = 2$.

Полученные $\widetilde{Square}_{All|Max_{countMethod}}$ для графа на рис. 1 в ходе работы программы:

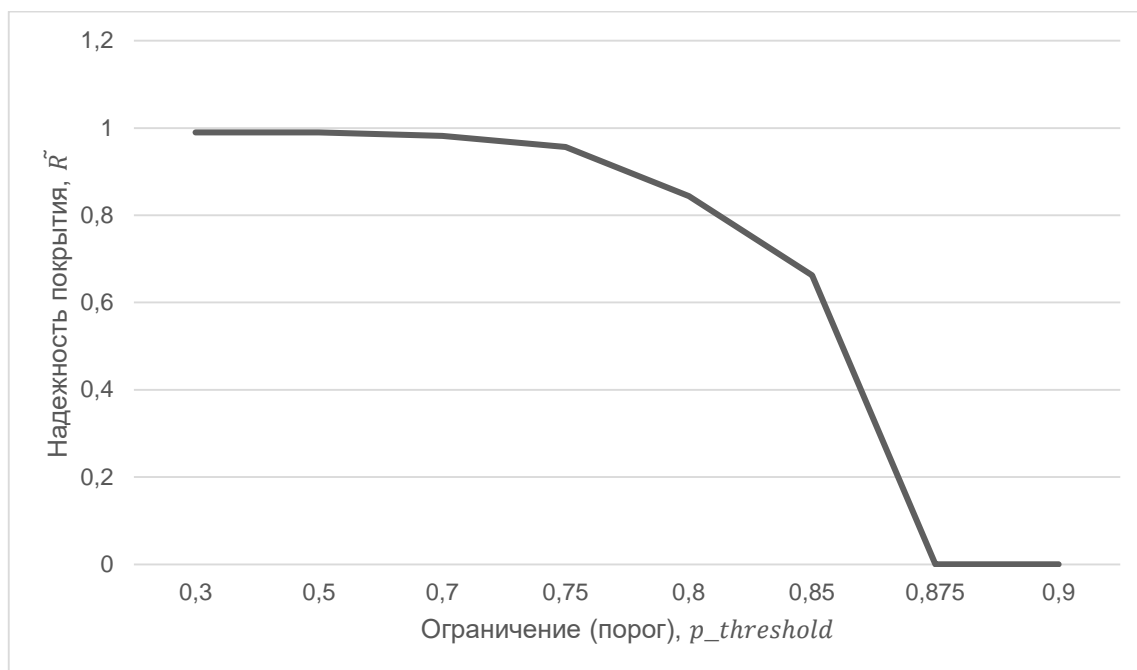


Рис. 2. Зависимость надежности покрытия от порогового значения

Таблица 2

Результаты работы для разных методов подсчета площади

Метод	$p = 0,99$ (все узлы)	$p = 0,9$ (все узлы)	$p = 0,7$ (все узлы)
\tilde{R}_{image}	26,502974	26,230808	24,104414
$\tilde{R}_{simpleCircle}$	16,722398	16,042061	13,844033
$\tilde{R}_{midpointCircle}$	16,841480	16,157459	13,947595

$$- Square_{All|Max_{image}} = 0,553014;$$

$$- Square_{All|Max_{simpleCircle}} = 0,387844;$$

$$- Square_{All|Max_{midpointCircle}} = 0,390456.$$

Далее можно посчитать абсолютные значения:

— для $p = 0,99$:

$$- R_{image} = 0,958492 \times 0,553014 \times 50 = 26,502974;$$

$$- R_{simpleCircle} = 0,862326 \times 0,387844 \times 50 = 16,722398;$$

$$- R_{midpointCircle} = 0,862657 \times 0,390456 \times 50 = 16,841480;$$

— для $p = 0,9$:

$$- R_{image} = 0,948649 \times 0,553014 \times 50 = 26,230808;$$

$$- R_{simpleCircle} = 0,827243 \times 0,387844 \times 50 = 16,042061;$$

$$- R_{midpointCircle} = 0,82762 \times 0,390456 \times 50 = 16,157459;$$

— для $p = 0,7$:

$$- R_{image} = 0,871747 \times 0,553014 \times 50 = 24,104414;$$

$$- R_{simpleCircle} = 0,713897 \times 0,387844 \times 50 = 13,844033;$$

$$- R_{midpointCircle} = 0,714426 \times 0,390456 \times 50 = 13,947595.$$

Для подсчета вероятности того, что область мониторинга не меньше заданного наперед порогового значения, использовался метод подсчета площади *Image*. Основываясь на полученных результатах, был построен график зависимости надежности покрытия от порогового значения для точного метода.

Отметим, что некоторые вершины графа являются изначально отрезанными. Поэтому при высоких значениях порога вероятность того, что область мониторинга не меньше этого порогового значения, имеет нулевое значение.

Заключение. В работе рассмотрена задача подсчета анализа надежности беспроводной сенсорной сети с точки зрения надежного покрытия сетью заданной области. Предполагается, что область, покрываемая сетью, образуется всеми точками плоскости, находящимися в окрестности мониторинга какого-либо работоспособного сенсора, связанного со стоком посредством работоспособных узлов. Рассмотрены два показателя надежности: математическое ожидание площади области покрытия и вероятность того, что площадь области мониторинга не меньше заданного наперед порогового значения. Предлагаются алгоритмы для точного расчета данных показателей на основе известного метода факторизации и стратегия выбора очередного элемента для факторизации, рассматриваются различные виды конечных графов. Для вычисления площади покрытия в частных реализациях сети, определяемых присутствием или отсутствием каждого из сенсоров, предлагается четыре подхода.

Список литературы

1. Moore E. F., Shannon C. E. Reliable circuits using less reliable relays // Journal of the Franklin Institute. 1956. P. 281–297.
2. Page L. B., Perry J. E. A practical implementation of the factoring theorem for network reliability // IEEE Trans. on Reliability. 1998. Vol. 37. N 3. P. 259–267.
3. AboElFotouh H. M. F., Iyengar S. S., Chakrabarty K. Computing reliability and message delay for cooperative wireless distributed sensor networks subject to random failures // IEEE Transactions on Reliability. 2005. V. 54, N 1. P. 145–155.
4. Shazly M. H., Elmallah E. S., AboElFotouh H. M. F. A three-state node reliability model for sensor networks // Proc. of IEEE Global Telecommunications Conf. (GLOBECOM'2010). Miami, USA. P. 1–5.
5. Мигов Д. А. Об оптимальном размещении стоков в беспроводных сенсорных сетях // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. Т. 58. № 11/2. С. 40–46.
6. Özgür B., Akan I. F., Akyildiz I., Yegorov S., Sankarasubramanian. Event-to-Sink Reliable Transport in Wireless Sensor Networks // Proc. of the 4th ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc 2003). Annapolis, USA, 2003. P. 177–188.
7. Mahmood M. A., Winston K. G., Seah, Ian Welch. Reliability in wireless sensor networks: A survey and challenges ahead // Computer Networks. 14 March 2015. Vol. 79. P. 166–187.
8. Marmol F. G., Perez G. M. TRMSim-WSN, Trust and Reputation Models Simulator for Wireless Sensor Networks // In Proc. of IEEE Conf. on Communications, 2009. ICC '09. Doi: 10.1109/ICC.2009.5199545
9. Cai W., Jin X., Zhang Y., Chen K., Tang J. Research on reliability model of large-scale wireless sensor networks // Proc. of IEEE Int. Conf. on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM'2006). Wuhan, China, 2006. P. 1–4.
10. Shazly M. H., Elmallah E. S., Harms J. J., AboElFotouh H. M. F. On area coverage reliability of wireless sensor networks // Proc. of IEEE Conf. on Local Computer Networks (LCN'2011). Bonn, Germany. P. 580–588.

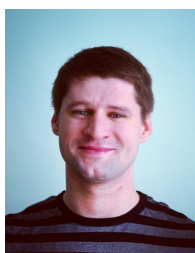
11. Родионов А. С. Кумулятивные оценки показателей структурной надежности сети и их использование // Проблемы информатики. 2017. № 1 (34). С. 15–24.



Кучеров Александр Владимирович — магистрант Новосибирского государственного университета; e-mail: zinkutal@yandex.ru.

Кучеров Александр в 2016 году окончил факультет автоматизации и приборостроения в Национальном техническом университете „Харьковский политехнический институт“, получив квалификацию бакалавра „Системный программист“. В настоящее время является инженером-программистом в компании „.wrk“ и работает над магистерской диссертацией „Разработка методов анализа надежности беспроводных сенсорных сетей“ в Новосибирском государственном университете.

Kucherov Alexander received the bachelor diploma of „system programmer“ in applied automation & device engineering from National Technic University „Kharkiv Polytechnic Institute“, Kharkiv, Ukraine, 2016. In June 2018 received master's degree in Computer Science and Engineering „Software Systems Development Technology“ from NSU, Novosibirsk, Russia. Currently he is an engineer-programmer at .wrk company, and he is working on the master's thesis "Development of methods for analysis the reliability of wireless sensor networks" in Novosibirsk State University.



Мигов Денис Александрович — канд. физ.-мат. наук, старш. науч. сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН; e-mail: mdinka@rav.sscs.ru.

Денис Мигов в 2003 году окончил Механико-математический факультет Новосибирского государственного университета, получив квалификацию „Математик, системный программист“ по специальности „Прикладная математика и информатика“. В 2008 году защитил диссертацию „Расчет вероятности связности случайного графа с примени-

ем сечений“ на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 — „Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ“ в диссертационном совете при Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. В настоящее время является старшим научным сотрудником лаборатории Системного моделирования и оптимизации указанного института. Денис Мигов является дважды лауреатом Именной премии правительства Новосибирской области: в 2011 г. в номинации „Информационные и телекоммуникационные технологии“ за цикл работ по теме „Разработка методов расчета показателей надежности сетей связи“; и в 2015 г. за выдающиеся научные достижения в номинации „Лучший молодой исследователь“. Также он неоднократно становился призером различных конференций. Область его научных интересов включает в себя теорию графов, методы расчета надежности сетей, структурную оптимизацию сетей, беспроводные сенсорные сети и параллельные алгоритмы на графах и сетях.

Denis Migov received the diploma of mathematician and programmer in applied mathematics and informatics from the Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia, in 2003. In 2008, he received Ph.D. (Candidate of science) degree in the field of Mathematical modeling, numerical methods, and program complexes from the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. He is a senior research fellow at the Laboratory of System modeling and optimization of the named institute. Denis Migov has received the Award for the cycle of works „Calculating reliability of networks in conditions of different constraints“ by the Novosibirsk Region Government in 2011. In 2015, he has received the Award by the Novosibirsk Region Government for outstanding scientific achievements in the nomination „The best young researcher“. Denis Migov repeatedly became

the winner of various conferences. His scientific interests are in graph theory, network reliability calculation, network topology optimization, wireless sensor networks, and parallel algorithms on graphs and networks.

Дата поступления — 21.06.2018