CALCULATION OF THE RELIABILITY OF EXTENDED TRI-CONNECTED NETWORKS

P. O. Perminov, D. A. Migov

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

DOI: 10.24412/2073-0667-2024-2-5-15
EDN: VZCSXV

When analyzing the reliability of networks for various purposes, the apparatus of random graphs is usually used. The most common indicator of reliability is the probability of connectivity of a random graph with unreliable edges, which describes the reliability of a network in terms of the ability to establish a connection between each pair of network nodes. However, the problem of calculating the probability of network connectivity is NP-hard. To reduce the dimensional when carrying out precise calculations, methods based on the use of structural features of networks are widely used, primarily various methods of reduction and decomposition.

Networks with an extended structure are used in number of applications. These are, for example, networks located in extended objects — mines, ships, other objects. Linear wireless sensor networks, designed for monitoring various long-distance objects, such as pipelines, bridges, roads, also have an extended structure. Despite their linear physical structure, the topological graph of such a network can be either linear or non-linear, since wireless communication channels are possible not only between the nearest neighboring nodes. For example, if each node can communicate with three nodes on the right and three nodes on the left, we obtain a network containing a group of three-vertex cross separators.

If the graph of an extended network is linear, then calculating its probabilistic connectivity is not difficult. The use of a serial-parallel transformation, or other techniques, allows us to make the calculation within polynomial complexity. If the network graph is biconnected and contains a separators of two nodes, then the calculation can be significantly accelerated by using decomposition along these separators.

In this paper, we study the possibility of quickly calculating the reliability of extended three-connected networks using decomposition according to the previously proposed formula. Such decomposition will lead to the production of 10 new extended graphs of a smaller size. As experiments have shown, this approach is quite effective and makes it possible to calculate the reliability of extended networks, for which it is not possible to calculate the reliability using an accurate method.

Key words: network reliability, random graph, triconnected graph, probabilistic connectivity, factorization method, network decomposition, cut, separator.

The work was carried out within the framework of the project N 0251-2021-0005 of a state assignment of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS.

References

1. Zhukovskij M. E., Rajgorodskij A. M. Sluchajny'e grafy': modeli i predel'ny'e xarakteristiki // Uspexi matematicheskix nauk. 2015. T. 70. N 1 (421). P. 35–88.

2. Mochalov V. A., Mochalova A. V. Primenenie e'kspertny'x sistem dlya rascheta veroyatnosti svyaznosti mezhdu uzlami grafa // V sbornike: Gibridny'e i sinergeticheskie intellektual'ny'e sistemy'. Materialy' V Vserossijskoj Pospelovskoj konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem. Pod redakciej A. V. Kolesnikova. 2020. P. 226–235.

3. Rodionov A. S. Mozhno li dobit'sya dal'nejshego uskoreniya rascheta xarakteristik svyaznosti sluchajnogo grafa? // Problemy' informatiki. 2022. N 4 (57). P. 39–52.

4. Valiant L. The complexity of enumeration and reliability problems. // SIAM Journal on Computing. 1979. T. 8. N 3. P. 410–421.

5. Rodionova O. K., Rodionov A. S., Choo H. Network probabilistic connectivity: exact calculation with use of chains // Lecture Notes in Computer Science. 2004. T. 3045. C. 315–324.

6. Satyanarayana A., Wood R. K. A linear-time algorithm for computing K—terminal reliability in series-parallel networks // SIAM. J. Comput. 1985. T. 14. P. 818–883.

7. Migov D., Rodionova O., Rodionov A., Choo H. Network probabilistic connectivity: using node cuts // Springer Lecture Notes in Computer Science (in EUC Workshops). V. 4097, 2006, P. 702–709.

8. Tarxanova O. Yu., Shaxov V. V. K voprosu ocenki e'ffektivnosti besprovodny'x sensorny'x setej // Problemy' informatiki. 2020. N 1 (46). P. 35–65.

9. Farxadov M. P. O., Blinova O. V., Vas'kovskij S. V. Ocenka nadezhnosti sistemy' svyazi s podvizhny'mi uzlami // Datchiki i sistemy'. 2018. N 5 (225). P. 3–8.

10. Shaxov V. V., Chen X., Yurgenson A. N., Loshkarev A. V. K voprosu ocenki nadezhnosti linejny'x besprovodny'x sensorny'x setej // Problemy' informatiki. 2022. N 4 (57). P. 120–128.

11. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Lazarova-Molnar S. Failure impact on coverage in linear wireless sensor networks // 2013 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS), Toronto, ON, Canada. IEEE Press, 2013. P. 188–195.

12. Migov. D. A. Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata fiziko-matematicheskix nauk "Raschyot veroyatnosti svyaznosti sluchajnogo grafa s primeneniem sechenij". Novosibirsk: ICMMG SB RAS. 2008. 97 P.

13. Migov D. A. Ispolzovanie vershinnyx razrezov dlya tochnogo vychisleniya veroyatnosti svyaznosti seti // Trudy Mezhdunarodnoj konferencii "Vychislitelnye i informacionnye texnologii v nauke, texnike i obrazovanii" (Pavlodar, 20–22 sentyabrya 2006 goda) Tom II. S. 51–58.

14. Page L. B., Perry J. E. A Practical Implementation of the Factoring Theorem for Network Reliability // IEEE transactions on reliability. 1988. V. 37, N 3. P. 259–267.

15. D. Migov. Dekompoziciya seti po secheniyam pri raschyote eyo nadyozhnosti // Prikladnaya diskretnaya matematika. 2020. N 47. P. 62–86.

16. Burgos J. M. Factorization of network reliability with perfect nodes II: Connectivity matrix // Discrete Applied Mathematics. 2016. V. 198. P. 91–100.

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПРОТЯЖЕННЫХ ТРЕХСВЯЗНЫХ СЕТЕЙ

П. О. Перминов, Д. А. Мигов

Новосибирский государственный университет,
630090, Новосибирск, Россия
Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 621.311.1+519.17
DOI: 10.24412/2073-0667-2024-2-5-15
EDN: VZCSXV

Рассматривается задача расчета вероятности связности протяженных сетей с ненадежными каналами связи. Точный расчет данного показателя — NP-трудная задача, что делает его затруднительным для сетей реальной размерности.
Предполагается, что сеть имеет протяженную структуру, что характерно для сетей, расположенных в шахтах, кораблях, других протяженных обьектов, а также линейных беспроводных сенсорных сетей, предназначенных для мониторинга различных протяженных объектов, таких как трубопроводы. В отличие от ранее исследованного нами случая двусвязной сети, здесь мы предполагаем, что сеть трехсвязная и имеет группу поперечных сечений, т. е. вершинных разрезов.
Для ускорения расчета надежности подобных сетей предлагается использовать структурную декомпозиции сети на основе формулы разложения по трехвершинному сечению. Этот метод, с использованием рекурсивного обхода сечений, ускоряет расчет надежности протяженных сетей по сравнению с известными методами. Результаты численных экспериментов подтверждают эффективность предлагаемого подхода.

Ключевые слова: надежность сети, случайный граф, трехсвязный граф, вероятность связности, метод факторизации, декомпозиция сети, сечение, сепаратор.

Введение. При анализе надежности сетей различного назначения пользуются, как правило, аппаратом случайных графов [1]. Наиболее распространенным показателем надежности является вероятность связности вершин случайного графа с ненадежными ребрами, описывающая надежность сети с точки зрения возможности установления соединения между каждой парой узлов сети. Этот показатель является наиболее универсальным, позволяет описывать способность функционирования сетей различного назначения в условиях независимых отказов элементов [2–3]. Однако, задача расчета вероятности связности сети является NP-трудной [4]. Для снижения размерности при проведении точного расчета широко используются методы, основанные на использовании структурных особенностей сетей, в первую очередь — различные методы структурной редукции и декомпозиции [5–7].

Для ряда прикладных областей характерны сети с протяженной структурой. Это, в первую очередь, сети, расположенные в протяженных объектах — шахтах, кораблях и

Работа выполнена в рамках проекта № 0251-2021-0005 ПФИ ИВМиМГ СО РАН.

прочих объектах. Другой важный класс протяженных сетей — это беспроводные сенсорные сети [8–9], предназначенные для мониторинга различных протяженных объектов, таких как трубопроводы, мосты, дороги, и других объектов. Такие сети выделяют в особый класс — так называемые линейные беспроводные сенсорные сети [10]. Несмотря на их линейную физическую структуру, топологически граф такой сети может быть как линейным, так и нелинейным [11], так как возможны каналы беспроводной связи не только между ближайшими соседними узлами.

Если граф протяженной сети является линейным, то расчет ее вероятности связности не представляет труда — использование последовательно-параллельного преобразования [6] или других приемов позволит сделать расчет за полиномиальную трудоемкость. Если граф сети — двусвязный и содержит сечение (сепараторы) из двух узлов, то расчет значительно ускорится использованием декомпозиции по этому сечению [7]. Однако, если сеть имеет протяженную структуру, то и граф ее может содержать множество поперечных сечений, каждое из которых разделяет граф на также протяженные компоненты. Эффективные алгоритмы расчета надежности таких сетей, основанные на рекурсивном использовании декомпозиции по двухвершинному сечению, изучались нами ранее в [12].

В данной статье мы изучаем возможность быстрого расчета надежности протяженных трехсвязных сетей при помощи декомпозиции по формуле из [13]. Например, если в линейной беспроводной сенсорной сети каждый узел может связываться с тремя узлами справа и тремя узлами слева [11], получаем сеть, содержащую группу трехвершинных поперечных сечений. В отличие от случая с сечением из двух вершин, когда мы при рассмотрении очередного сечения мы переходим к 4 новым протяженным графам меньшего размера, декомпозиция приведет к получению 10 новых протяженных графов меньшего размера. Однако, как показано в экспериментах, такой подход является достаточно эффективным и позволяет делать расчет надежности протяженных сетей, для которых посчитать надежность не представляется возможным точным методом, в данном случае — методом факторизации [14].

1. Основные определения и обозначения. Рассмотрим неориентированный граф $G = (V,E)$, где V — это множество вершин, а E — множество ребер графа G. Пусть для каждого ребра задана вероятность его присутствия в графе, при этом предполагается, что вершины абсолютно надежны.

Элементарным событием будем называть частную реализацию графа, определяемую исправностью или отказом каждого ребра.

Вероятность элементарного события равна произведению вероятностей присутствия исправных ребер, умноженному на произведение вероятностей отсутствия отказавших ребер.

Произвольное событие (событие есть объединение некоторых элементарных событий) будем называть *успешным*, если в каждом элементарном событии, входящем в это событие, вершины могут быть связаны исправными ребрами.

Вероятность связности графа G, $R_K(G)$ есть вероятность того, что вершины связаны исправными ребрами, то есть вероятность события, состоящего из всех успешных событий и только из них.

2. Декомпозиция сети по сечению. Предположим, что графа G содержит сечение (сепаратор) из трех вершин, которое разделяет его на два подграфа G_1 и G_2 (рис. 1). В таком случае расчет $R(G)$ может быть существенно ускорен при помощи соответствующей формулы, для представления которой понадобятся следующие обозначения [15].

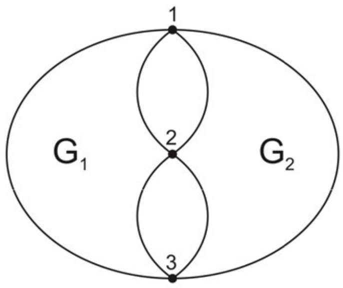

Рис. 1. Граф с сечением из трех вершин

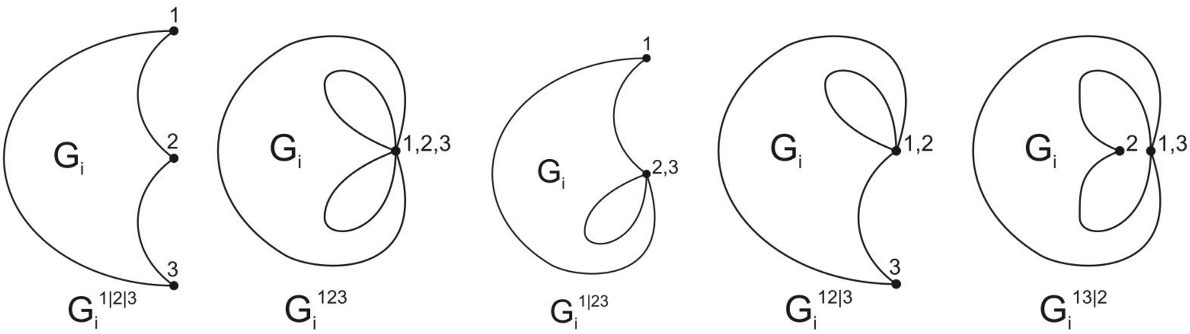

Рис. 2. Графы, стянутые по разбиениям

Через S обозначим множество всех разбиений множества вершин сечения. Произвольное разбиение $\{\{v_1 \dots v_l\}, \dots \{u_1 \dots u_t\}\} \in S$ будем обозначать для простоты изложения как:

$$v_1 \dots v_l | \dots | u_1 \dots u_t = \{\{v_1 \dots v_l\}, \dots \{u_1 \dots u_t\}\}.$$

Через $G_i^{\Phi} (\Phi \in S)$ обозначим граф G_i, стянутый по каждому элементу из Φ, то есть если u и v входят в один и тот же элемент Φ, то в графе G_i^{Φ} вершины u и v стянуты в одну. Всего имеется 5 разбиений, образующих множество S. Соответствующие графы, стянутые по разбиениям, приведены на рис. 2.

Тогда для графа G с сечением, состоящим из вершин $1, 2, 3$, которое разделяет его на два подграфа G_1 и G_2, справедлива формула:

$$\begin{aligned} R(G) = \frac{1}{2}\Big[& R(G_1^{1|23}) \left(R(G_2^{12|3}) + R(G_2^{13|2}) - R(G_2^{1|23}) \right) + \\ & R(G_1^{12|3}) \left(R(G_2^{1|23}) + R(G_2^{13|2}) - R(G_2^{12|3}) \right) + \\ & R(G_1^{13|2}) \left(R(G_2^{12|3}) + R(G_2^{1|23}) - R(G_2^{13|2}) \right) - \\ & R(G_1) \left(R(G_2^{12|3}) + R(G_2^{13|2}) + R(G_2^{1|23}) \right) - \\ & R(G_2) \left(R(G_1^{12|3}) + R(G_1^{13|2}) + R(G_1^{1|23}) \right) + \\ & R(G_1)R(G_2) \Big] + R(G_1)R(G_2^{123}) + R(G_1^{123})R(G_2). \end{aligned} \tag{1}$$

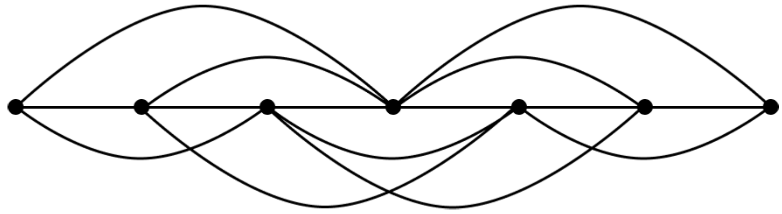

Рис. 3. Граф топологии ЛБСС с 7 узлами

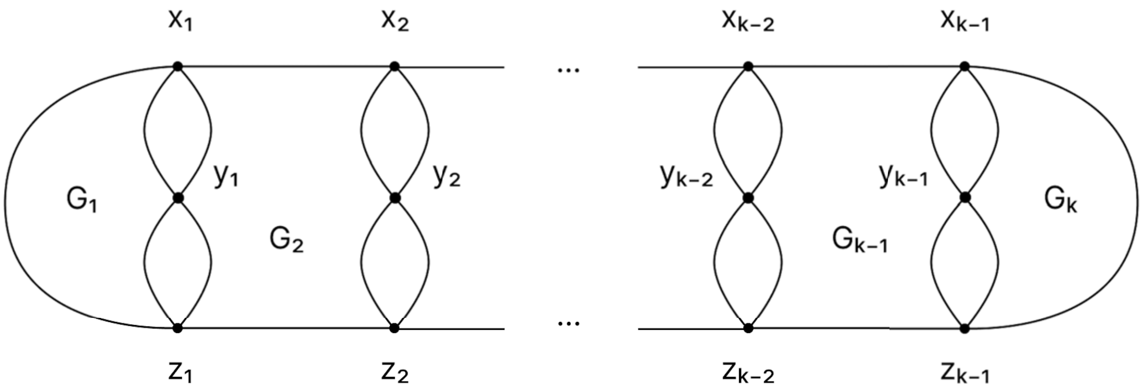

Рис. 4. Продольный трехсвязный граф

Эта формула была представлена нами впервые в 2006 в [13]. Позже, в 2016, она же была опубликована Х. М. Бургосом [16]. Как показали эксперименты, этот подход значительно сокращает расчет, несмотря на переход к рассмотрению 10 графов. В протяженных сетях может возникать множество таких сечений, последовательно разделяющих исходную сеть. Будем называть такие сечения поперечными. Например, в линейной беспроводной сенсорной сети, при наличии каналов беспроводной связи между каждым узлом и тремя узлами справа и слева (рис. 3), каждая тройка соседних узлов будет сечением, за исключением крайних троек.

Рассмотрим общий случай, когда сеть содержит группу подобных сечений. Граф соответствующей структуры будем называть продольным трехсвязным. Структура подобного графа приведена на рис. 4. Ниже мы приводим формальное определение этого объекта.

Пусть $G_1, G_2, \ldots, G_k$ — последовательность связных графов, таких, что:
1) Графы G_i, G_{i+1}, то есть соседние графы, имеют ровно три общие вершины x_i, y_i, z_i и не имеют общих ребер;
2) Графы G_i, G_j при $|i-j| > 1$ не имеют общих элементов.
Тогда граф $G = \bigcup_{i=1}^{k} G_i$ назовем *продольным трехсвязным графом*, а подграфы $G_i, i = 1, \ldots, k$ — его *компонентами*.

Каждая тройка вершин $\{x_i, y_i, z_i | 1 \leqslant i \leqslant k-1\}$ образует сечение в графе G. Множество $\bigcup_{i=1}^{k-1}\{\{x_i, y_i, z_i\}\}$ назовем *продольным 3-сечением* в графе G $\{x_i, y_i, z_i\}$ — *компонента* продольного сечения или *поперечное сечение*. Продольное сечение является *максимальным*, если к нему не может быть добавлено ни одно трехвершинное сечение так, чтобы оно осталось продольным. Два поперечных сечения $\{x_i, y_i, z_i\}$ и $\{x_j, y_j, z_j\}$ *соседние*, если $|i-j| = 1$.

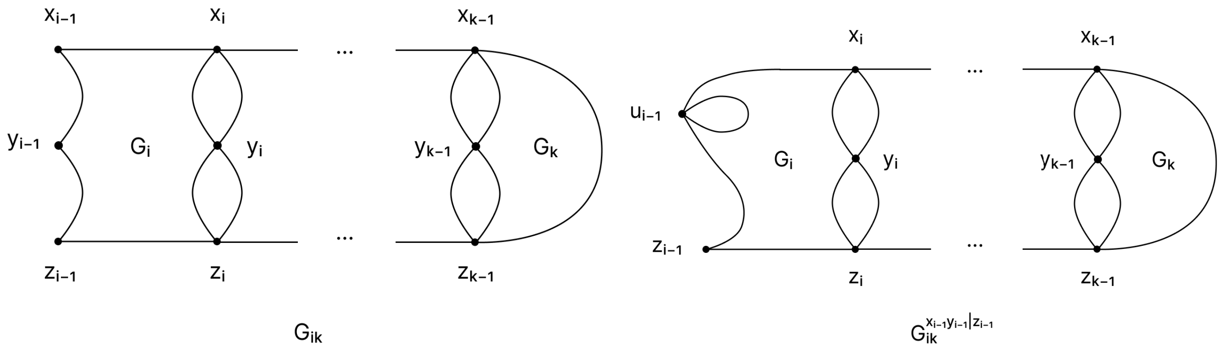

Рис. 5. Примеры промежуточных трехсвязных продольных графов

При использовании формулы (1) при последовательном переборе компонент продольного сечения, кроме G_i, будут возникать подграфы $G_i^{\Phi,\Psi}$, $\Phi, \Psi \in \{1|23, 12|3, 13|2, 123, 0\}$. Кроме того, будут возникать новые продольные трехсвязные графы вида (рис. 5)

$$G_{ik} = \bigcup_{i \leqslant j \leqslant k} G_j, 1 \leqslant i \leqslant k;$$

$$G_{ik}^{\Phi} = G_i^{\Phi,0} \bigcup_{i+1 \leqslant j \leqslant k} G_j, 1 < i \leqslant k,$$

где для краткости 0 соответствует отсутствию стягиваний, то есть $0 = 1|2|3$ при $i = 2, \ldots, k-1$, либо же отсутствию вторых 3-сечений для крайних случаев, и Φ отвечает за стягивание вершин с левой стороны графа G_i, а Ψ — с правой. При дальнейшем применении формулы (1) к новым продольным трехсвязным графам будут возникать графы вышеописанного типа.

3. Тестовые результаты разработанных алгоритмов. В данной главе представлен алгоритм *3-Cuts Long*, который основан на результатах, полученных в предыдущей главе, а также проанализированы результаты численных экспериментов. Вычисления были выполнены на ПЭВМ с процессором Apple M1, 3.22 GHz, RAM: 8Gb.

3.1. *Описание алгоритма.* Ниже представлены результаты сравнения времени расчета для трех методов, включая расчет без использования декомпозиции по сечениям (метод факторизации *Factoring* [14]), усиленный последовательно-параллельным преобразованием [5] и окончанием рекурсивных вызовов на графах с пятью вершинами. Два других метода (3-*Cuts Long* и 3-*Cuts*) используют этот метод для расчета надежности компонент. Для нахождения максимального продольного сечения необходимо перебрать все тройки узлов сети с проверкой на связность графа после удаления каждой из них, что занимает $O(MN^3)$ операций.

Полученный алгоритм 3-*Cuts* можно описать тремя основными пунктами:

1) Поиск продольного сечения продольного графа G;

2) Декомпозиция графа по выбранному сечению из 3 узлов;

3) Расчет надежности графов $R(G_{ik}^{\Phi})$ рекурсивно переходом к п. 2;

4) Расчет надежности графов $R(G_i^{\Phi,\Psi})$ каким-либо точным методом;

5) Вычисление $R(G)$ по формулам (1).

Отдельно стоит описать первый пункт указанного выше алгоритма:

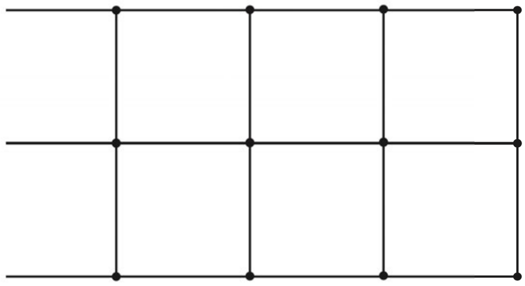

Рис. 6. Решетка 3×5

Таблица 1

Решетки $3 \times L$

L	*3-Cuts Long*			*3-Cuts*	*Factoring*	*R(G)*
	$\beta = 5$	$\beta = 6$	$\beta = 7$	β_*		
8	0.0003 s	0.0004 s	0.0005 s	0.0009 s	0.000529 s	0.462632
18	0.009 s	0.01 s	0.005 s	0.035 s	23.718 s	0.236108
20	0.04 s	0.09 s	0.03 s	0.088 s	214.411 s	0.206388

Сперва скажем, что продольное сечение хранится так, что для каждой внутренней компоненты G_i графа G хранятся тройки номеров вершин для сечения слева и сечения справа. То есть продольный граф — это $2 + 2(k - 2)$ троек, где k — число компонент продольного графа.

Таким образом, поиск продольного сечения (алгоритм *CutCut*) для графа G можно описать следующими пунктами:

1) находим 3-сечение в графе G и формируем подграфы G_1, G_2:

2) если существуют соседние сечения, то проверяем, чтобы новое сечение не пересекалось с соседними;

3) проверяем, чтобы каждое старое сечение оставалось в одном из новых подграфов, и старые сечения лежали в разных подграфах;

4) вызываем алгоритм *CutCut* для G_1;

5) добавляем в продольное сечение 3-сечение (тройку) для G_1 и 3-сечение для G_2;

6) вызываем алгоритм *CutCut* для G_2.

Этот же параметр был использован и для расчета надежности рекурсивно с пересчетом компонент алгоритмом 3-*Cuts*. Экспериментально было получено, что оптимально выбирать для такого алгоритма β равным приблизительно половине вершины, что логично, так как исходный граф G будет разбит 3-сечением на приблизительно одинаковые подграфы (по количеству вершин), что позволяет за одно время расчитывать каждый подграф. Таким образом, оптимальное β обозначим, как β_*, и $\beta_* \approx \frac{|V|}{2}$.

Заключение. 3.2. *Численные эксперименты.* Численные эксперименты были проведены на графах решетках $3 \times L$ при $L = 8, 18, 20$. Вероятность присутствия каждого ребра положим равной 0,75. В таблице 1 приведены время работы алгоритмов для расчета надежности указанных решеток и вычисленное значение надежности. Видно, что с ростом L расчет факторизацией уже не представляется возможным. Использование же подхода с декомпозицией делает такой расчет достаточно быстрым, применение же продольных сечений и алгоритма *3-Cuts Long* позволяет дополнительно ускорить расчет.

Таблица 2

Графы для ЛБСС

$\lvert V \rvert$	*3-Cuts Long*			*3-Cuts*	*Factoring*	*R(G)*
	$\beta = 5$	$\beta = 6$	$\beta = 7$	β_*		
20	0.0005 s	0.0004 s	0.0013 s	0.0009 s	0.048 s	0.951241
28	0.0008 s	0.001 s	0.0013 s	0.009 s	11.93 s	0.947482
36	0.011 s	0.009 s	0.003 s	0.127 s	2991 s	0.943739

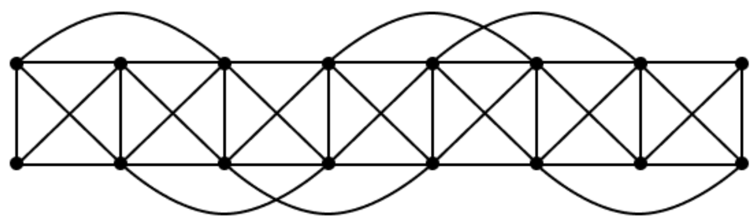

Рис. 7. Граф для ЛБСС в удобном представлении, $\lvert V \rvert = 16$

Также были рассмотрены графы, которые напрямую относятся к линейным беспроводным сенсорным сетям. Узлы графов таких сетей могут быть расположены на одной прямой и имеют каналы связи не только с соседними узлами (см. рис. 8).

Такие графы можно изобразить и более удобным способом (см. рис. 9), где уже наглядно можно увидеть наличие продольного трехвершинного сечения. Для экспериментов были выбраны графы, где каждый узел, кроме крайних, был связан с тремя узлами слева и с тремя узлами справа. Для всех ребер таких графов надежность положим равной 0,75. Время работы алгоритмов на таких графах и их надежности указаны в табл. 2.

Результаты показывают, что разумное время вычисления надежности на таких графах дают алгоритмы 3-*Cuts Long* и 3-*Cuts*, при это с ростом числа вершин алгоритм 3-*Cuts Long* показывает большее ускорение относительно 3-*Cuts*.

В работе предложены новые способы повышения эффективности разработанных ранее методов расчета вероятности связности множества вершин случайного неориентированного графа с абсолютно надежными вершинами и ненадежными ребрами, основанных на декомпозиционном подходе. В частности, была развита идея совместного расчета методом факторизации вероятностей связности подграфов, получающихся при декомпозиции по 2-сечению исходного случайного графа, которая возникла из наблюдений об их структурной схожести. В итоге было разработано и протестировано три новых алгоритма. Согласно проведенным экспериментам, два из трех алгоритмов совместного расчета показывают на всех тестах лучшие вычислительные и временные результаты, нежели имеющийся на текущий момент метод независимого расчета, что может свидетельствовать о целесообразности их применения и последующего развития.

Дальнейшие исследования по рассматриваемой теме могут быть связаны с проведением более обширных тестирований, дополнительными модификациями и оптимизациями предложенных алгоритмов, основанных на изучении стратегий факторизации, обобщением результатов для варианта 3-сечений и более общих случаев, а также с расчетом иных показателей надежности сетей, в том числе с расчетом вероятности связности некоторого подмножества вершин графа.

Список литературы

1. Жуковский М. Е., Райгородский А. М. Случайные графы: модели и предельные характеристики // Успехи математических наук. 2015. Т. 70. № 1 (421). С. 35–88.

2. Мочалов В. А., Мочалова А. В. Применение экспертных систем для расчета вероятности связности между узлами графа // В сборнике: Гибридные и синергетические интеллектуальные системы. Материалы V Всероссийской Поспеловской конференции с международным участием. Под редакцией А. В. Колесникова. 2020. С. 226–235.

3. Родионов А. С. Можно ли добиться дальнейшего ускорения расчета характеристик связности случайного графа? // Проблемы информатики. 2022. № 4 (57). С. 39–52.

4. Valiant L. The complexity of enumeration and reliability problems. // SIAM Journal on Computing. 1979. T. 8. N 3. P. 410–421.

5. Rodionova O. K., Rodionov A. S., Choo H. Network probabilistic connectivity: exact calculation with use of chains // Lecture Notes in Computer Science. 2004. T. 3045. C. 315–324.

6. Satyanarayana A., Wood R. K. A linear-time algorithm for computing K—terminal reliability in series-parallel networks // SIAM. J. Comput. 1985. T. 14. P. 818–883.

7. Migov D., Rodionova O., Rodionov A., Choo H. Network probabilistic connectivity: using node cuts // Springer Lecture Notes in Computer Science (in EUC Workshops). V. 4097, 2006, P. 702–709.

8. Тарханова О. Ю., Шахов В. В. К вопросу оценки эффективности беспроводных сенсорных сетей // Проблемы информатики. 2020. № 1 (46). С. 35–65.

9. Фархадов М. П. О., Блинова О. В., Васьковский С. В. Оценка надежности системы связи с подвижными узлами // Датчики и системы. 2018. № 5 (225). С. 3–8.

10. Шахов В. В., Чен Х., Юргенсон А. Н., Лошкарев А. В. К вопросу оценки надежности линейных беспроводных сенсорных сетей // Проблемы информатики. 2022. № 4 (57). С. 120–128.

11. Mohamed N., Al-Jaroodi J., Jawhar I., Lazarova-Molnar S. Failure impact on coverage in linear wireless sensor networks // 2013 International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS), Toronto, ON, Canada. IEEE Press, 2013. P. 188–195.

12. Мигов. Д. А. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук «Расчет вероятности связности случайного графа с применением сечений». Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. 2008. 97 с.

13. Мигов Д. А. Использование вершинных разрезов для точного вычисления вероятности связности сети // Труды Международной конференции «Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании» (Павлодар, 20–22 сентября 2006 года). Том II. С. 51–58.

14. Page L. B., Perry J. E. A Practical Implementation of the Factoring Theorem for Network Reliability // IEEE transactions on reliability. 1988. V. 37, N 3. P. 259–267.

15. Мигов Д. А. Декомпозиция сети по сечениям при расчете ее надежности // Прикладная дискретная математика. 2020. № 47. С. 62–86. DOI: 10.17223/20710410/47/6.

16. Burgos J. M. Factorization of network reliability with perfect nodes II: Connectivity matrix // Discrete Applied Mathematics. 2016. V. 198. P. 91–100.

Перминов Павел Олегович — бакалавр ММФ НГУ, магистрант первого курса ММФ НГУ, e-mail: `p.perminov@g.nsu.ru`.

Перминов Павел окончил в 2023-м году механико–математический факультет Новосибирского государственного университета по направлению «Математика и компьютерные науки» (02.03.01, бакалавриат), защитив выпускную квалификационную работу на тему «Быстрые методы расчета надежности протяженных сетей». В настоящее время является студентом магистратуры механико–математического факультета Новосибирского государственного

университета по направлению «Математика и механика» (01.04.00, магистратура). Проходит специализацию в Институте вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук. Является лауреатом 61-й Международной научной студенческой конференции МНСК–23, Новосибирск. Область научных интересов включает в себя теорию графов и методы анализа надежности сетей.

Perminov Pavel graduated in 2023 from the Department of Mechanics and Mathematics of Novosibirsk State University (Novosibirsk, Russia) in the direction of "Mathematics and Computer Science" (02.03.01, bachelor's degree), having defended his final qualifying work on the topic "Fast methods for calculating the reliability of extended networks". Currently, he is a master's student of the Faculty of Mechanics and Mathematics of Novosibirsk State University in the direction of "Mathematics and Mechanics" (01.04.00, Master's degree). He is specializing at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. He is a laureate of the third degree of the 61st International Scientific Student Conference ISSC–23, Novosibirsk. His research interests include graph theory and network reliability analysis.

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

Денис Мигов окончил в 2003 году 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 применением 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. и в 2015 г, также неоднократно становился призером различных конференций. Область его научных интересов включает в себя теорию графов, методы анализа надежности сетей, структурную оптимизацию сетей, переупорядочивание разреженных матриц, 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 is twice a laureate of the Name Prize of the Government of the Novosibirsk Region in 2011 and in 2015; he also repeatedly became a prize-winner of various conferences. His scientific interests are in graph theory, network reliability analysis, network topology optimization, spares matrix reordering, wireless sensor networks, and parallel algorithms on graphs and networks.

Дата поступления — 06.12.2023