

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАРШРУТОВ В САМООРГАНИЗУЮЩИХСЯ СЕТЯХ СВЯЗИ

Б. Х. Чинь<sup>1</sup>, А. И. Парамонов<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: alex-in-spb@yandex.ru

## Аннотация

**Предмет исследования.** В статье приводится исследование параметров кратчайших маршрутов в самоорганизующихся сетях (СОС) связи. **Метод.** Для исследования была построена имитационная модель структуры сети в Mathcad с использованием алгоритма Флойда-Уоршелла для нахождения маршрутов между всеми узлами сети. **Основной результат.** Рассмотрена доля транзитных узлов и ее зависимость от параметров сети, таких как количества узлов, радиус связи и плотность узлов. Также исследована зависимость связности сети в различных условиях, когда все узлы или только часть узлов могут выполнять функции транзита. **Практическая значимость.** Полученные результаты позволяют оценить необходимые структурные параметры сети.

## Ключевые слова

самоорганизующаяся сеть связи, кратчайший маршрут, алгоритм Флойда-Уоршелла, доля транзитных узлов, связность сети.

## Информация о статье

УДК 621.391

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 26.10.16, принята к печати 25.11.16.

**Ссылка для цитирования:** Чинь Б. Х., Парамонов А. И. Исследование параметров маршрутов в самоорганизующихся сетях связи // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Том 4. № 4. С. 81–88.

# RESEARCH OF PARAMETERS OF ROUTES IN SELF-ORGANIZING NETWORKS

B. Trinh<sup>1</sup>, A. Paramonov<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

\* Corresponding author: mokolbanev@mail.ru

**Abstract—Research Subject.** The article presents a research of parameters of the shortest routes in the self-organizing networks (SON). **Method.** As a method of study, has been built simulation model of network structure in Mathcad using Floyd-Warshall algorithm to find routes between all nodes of network. **Core results.** Consider the part of transit nodes, value its dependence on network parameters, such as number of nodes, communication range and nodes density. Beside, has been given performance of network connectivity's dependence in various situations, when all or a part of nodes can be carry out function of transit nodes. **Practical relevance.** These results allow us to estimate the necessary structural network parameters.

**Keywords—**Self-organizing networks, shortest route, Floyd-Warshall algorithm, part of transit nodes, network connectivity.

### Article info

Article in Russian.

Received 26.10.16, accepted 25.11.16.

**For citation:** Trinh B., Paramonov A.: Research of Parameters of Routes in Self-Organizing Networks // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss. 4. pp. 81–88 (in Russian).

## Введение

Самоорганизующиеся сети (СОС) [1], одна из технологий построения сетей связи. Как правило, СОС, как и другие сети связи обеспечивает функции доступа и функции транзита. Часто выделяют такие способы построения структуры сети как Ad Hoc и mesh (ячеистая). Фактически Ad Hoc сеть является самоконфигурируемой сетью. Ее узлы обеспечивают связь с соседними узлами и выполняют функции транзита трафика. Узлы mesh также могут выполнять функции маршрутизации, при этом не накладывается ограничений на структуру маршрутов. Многие сети используют принципы самоорганизации, такие как беспроводные сенсорные сети (*WSN-Wireless Sensor Networks*) [2], всепроникающие сенсорные сети (*USN-Ubiquitous Sensor Networks*) [3], сети для транспортных средств (*VANET-Vehicular Ad Hoc Networks*) [4], летающие сенсорные сети (*FANET-Fly Ad Hoc Networks*) [5] и т. д.

Беспроводные СОС имеют динамическую структуру, в которой количество узлов и их взаимные отношения могут изменяться в достаточно широких пределах. Это усложняет процесс определения топологии и организацию маршрутизации. При этом, выдвигается требование автоматического поиска наилучшего маршрута (группы маршрутов) для обеспечения одного или нескольких качественных параметров процесса приема/передачи. Поэтому поиск маршрутов (группы маршрутов) между узлами сети является одной из основных задач в СОС связи. Кроме того, параметры маршрутов, такие как связность (количество маршрутов), длина маршрута, число скачков в маршруте, и доля транзитных узлов (доля узлов сети, участвующих в маршрутизации) существенно влияют на качество обслуживания трафика СОС связи [6]. В данной статье приведены результаты исследования влияния состава сети (параметров сети) на маршруты (долю транзитных узлов), а также приведена оценка необходимой доли узлов с функциями транзита, которая обеспечивает достаточно высокую вероятность связности связи [7].

### Постановка задачи

Основными различиями между СОС связи и сетями с жестко определенной топологией являются: (I) не существует центральный орган, отвечающий за адресацию; (II) узлы сети могут присоединяться/покидать сеть или перемещаться произвольным образом. Кроме того, структура самоорганизующихся сетей зависит от маршрутов между узлами сети. Маршруты зависят от параметров сети, таких как количества узлов, радиуса связи и плотности узлов, и также от выбора протокола маршрутизации для данной сети [8].

Для выяснения влияния параметров сети на параметры маршрутов, мы приводим анализ структуры самоорганизующихся сетей в общем случае, когда узлы распределяются случайным образом по некоторой заданной территории, а зона связи узла описывается кругом с заданным радиусом. Параметрами маршрутов являются длина маршрута, число скачков (транзитов), доля транзитных узлов, нагрузки на транзитные узлы, и т. д. В рамках данной статьи, приводим результаты анализа доли транзитных узлов и оценку ее зависимости от параметров сети. Кроме того, также рассмотрены зависимости связности сети в различных условиях, когда все узлы или только их часть узлов могут выполнять функции транзита. Задача исследования длины маршрута, числа скачков в маршруте и зависимости качества обслуживания от параметров маршрута является предметом дальнейшего исследования.

Известно, что критериями выбора оптимального маршрута в СОС связи могут быть длина маршрута, число скачков в маршруте, минимальная скорость передачи или минимальное время задержки, время существования маршрута и т. д. В данной статье, мы используем критерий длины маршрута, как правило выбора.

### Метод исследования

Для исследования параметров маршрутов в СОС связи, была разработана имитационная модель в Mathcad с использованием алгоритма Флойда-Уоршелла для нахождения кратчайших маршрутов между всеми узлами сети. Алгоритма Флойда-Уоршелла является наиболее подходящим для нашей задачи, так как позволяет найти сразу все кратчайшие маршруты за  $n^2$  циклов. К тому же это очень простой с точки зрения реализации (изящный) алгоритм.

Принцип работы алгоритма Флойда-Уоршелла:

— Перенумеровать вершины графа от 1 до  $N$  целыми числами, определить матрицу  $D^0$ , каждый элемент  $d_{i,j}$  которой есть длина кратчайшей дуги между вершинами  $i$  и  $j$ . Если такой дуги нет, положить значение элемента равным  $\infty$ . Кроме того, положить значения диагонального элемента  $d_{i,i}$  равным 0.

— Для целого  $m$ , последовательно принимающего значения  $1 \dots N$  определить по элементам матрицы  $D^{m-1}$  элементы  $D^m$ . Для определения по известным элементам матрицы  $D^{m-1}$  элементов матрицы  $D^m$  в алгоритме Флойда-Уоршелла применяется рекурсивное соотношение:

$$d_{i,j}^m = \min \{ d_{i,m}^{m-1} + d_{m,j}^{m-1}; d_{i,j}^{m-1} \},$$

где  $d_{i,j}^m$  – элемент матрицы  $D^m$ ,  $d_{i,j}^{m-1}$  – элемент матрицы  $D^{m-1}$  найденной на предыдущем шаге алгоритма.

– Алгоритм заканчивается получением матрицы всех кратчайших путей  $D^N$ , где  $N$  – число вершин графа.

Имитационная модель исследования строится следующим образом: (I) узлы распределяются случайным образом по некоторой заданной территории; (II) задан радиус связи  $R$ , который одинаков для всех узлов сети, а зона связи узла представляет собой круг; (III) каждый из узлов должен иметь возможность функционировать как конечный и так транзитный узел.

На рис. 1 приведен пример модели исследования с 100 узлами, которые размещаются случайным образом по территории  $200 \times 200$  м. После работы алгоритма Флойда-Уоршелла, найдены кратчайшие маршруты между любыми парами узлов сети.

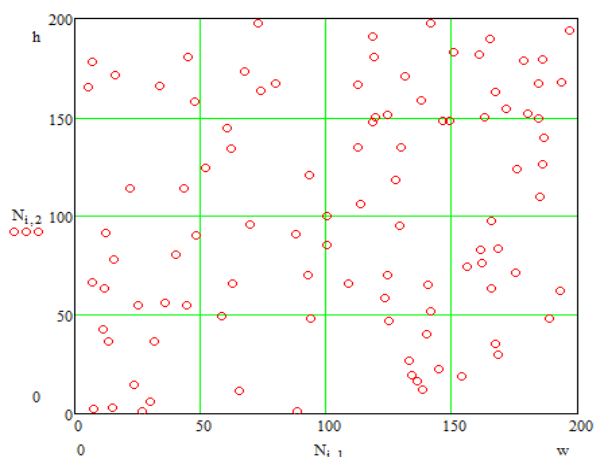


Рис. 1. Пример модели исследования с 100 узлами на территории  $200 \times 200$  м

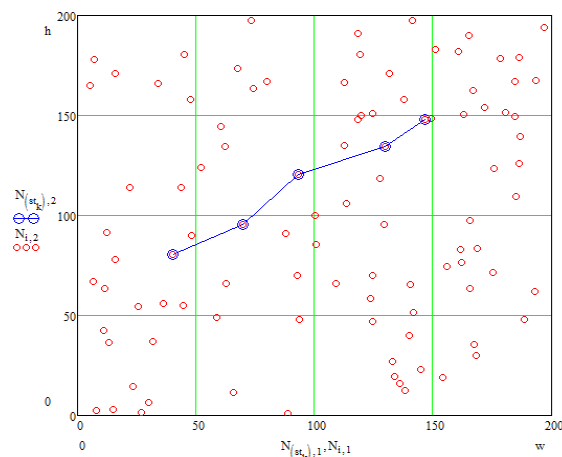


Рис. 2. Маршрут между двумя узлами сети после работы алгоритма

На рис. 2 приведен пример результата нахождения маршрута между двумя узлами сети. На рис. 3 приведен пример найденной матрицы кратчайших путей.

SP =

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	79	3	4	5	6	39	69	3	69
2	79	2	3	79	38	6	79	79	9	79
3	1	2	3	4	5	6	1	1	9	1
4	1	79	3	4	5	6	1	37	87	37
5	1	38	3	4	5	6	1	37	87	37
6	1	2	3	4	5	6	7	44	9	35
7	39	39	39	39	39	6	7	33	39	20
8	69	69	69	37	37	44	33	8	37	10
9	3	2	3	87	87	6	3	87	9	87
10	8	8	8	8	8	35	20	8	8	10
11	29	84	3	4	5	6	82	29	55	29
12	11	11	31	11	11	6	11	11	73	11
13	51	51	51	51	51	6	7	7	51	7
14	77	77	77	77	77	6	7	7	77	7
15	7	7	7	7	7	8	7	8	7	10
16	1	2	3	4	5	6	78	78	78	78

Рис. 3. Пример найденной матрицы кратчайших путей

### Анализ результатов моделирования

При анализе результатов моделирования, получены зависимости доли транзитных узлов и вероятности связности сети от параметров сети.

1. Зависимость доли транзитных узлов и вероятности связности сети от количества узлов (при  $R = 50$  м и территория  $200 \times 200$  м).

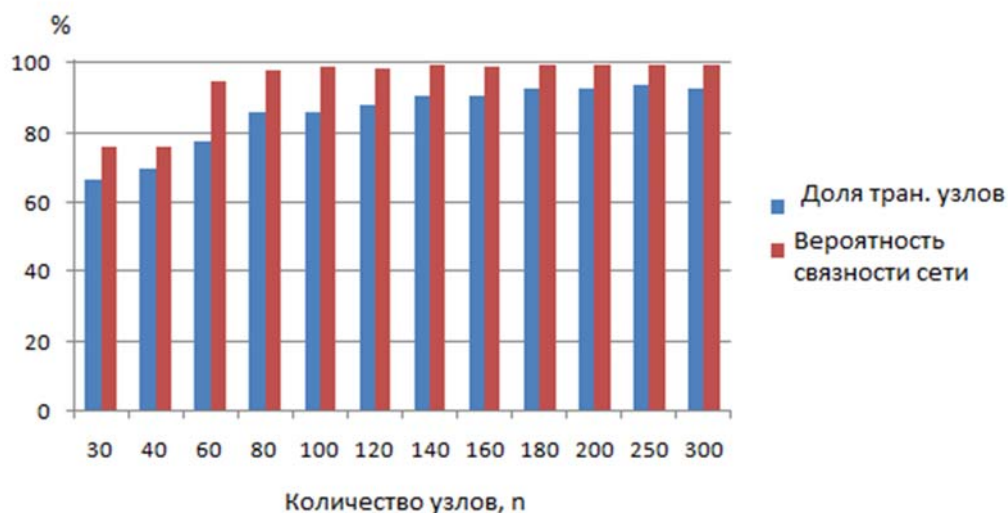


Рис. 4. Зависимости доли транзитных узлов и вероятности связности от количества узлов сети

Из рис. 4. видно, что при увеличении количества узлов, доля транзитных узлов и вероятность связности сети повышаются. При  $R = 50$  м и территории размещения узлов  $200 \times 200$  м, достаточная связность обеспечивается при доле транзитных узлов от 60 % узлов и более.

2. Зависимость доли транзитных узлов и вероятности связности сети от радиуса связи (при  $n = 100$  узлов на территории  $200 \times 200$  м).

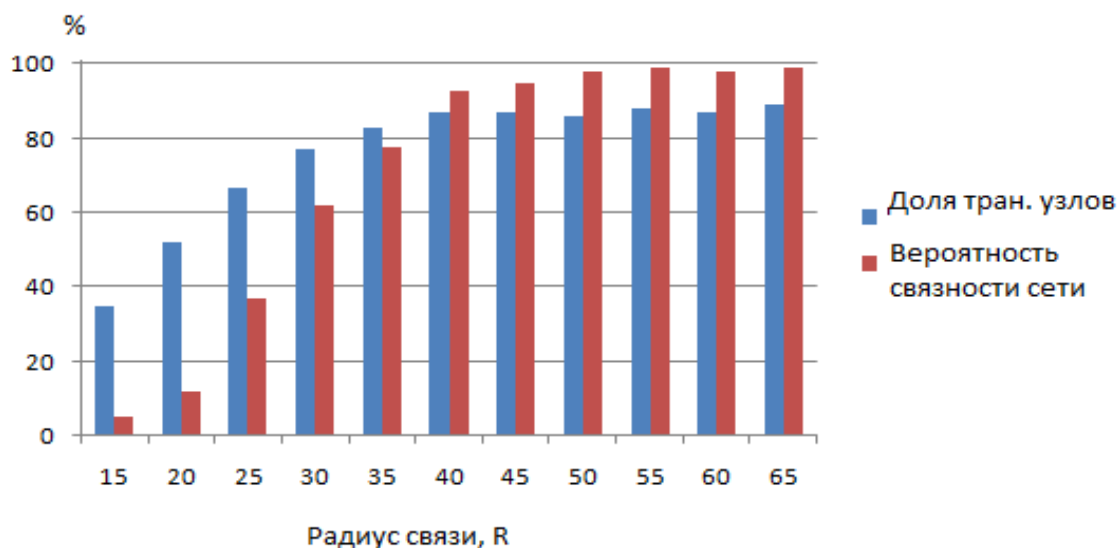


Рис. 5. Зависимости доли тран. узлов и вероятности связности сети от количества узлов

Из приведенных на рис. 5. результатов следует, что при увеличении радиуса связи, доля транзитных узлов и вероятность связности сети повышаются. При  $n = 100$  узлов на территории  $200 \times 200$  м, обеспечивается достаточная связность сети при доле транзитных узлов около 90 %, при  $R = 40$  м и более.

3. Зависимость доли транзитных узлов и вероятности связности сети от площади территории расположения узлов (при  $n = 100$  узлов с  $R = 50$  м).

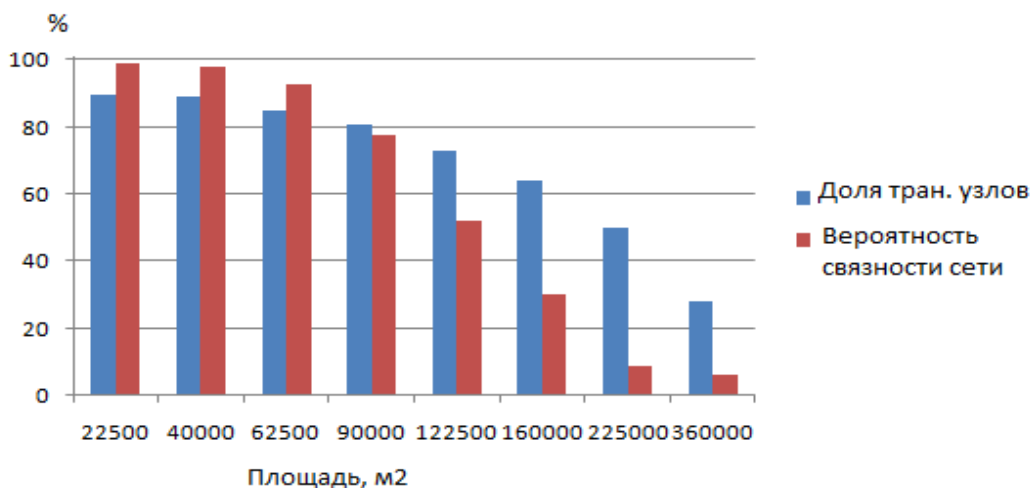


Рис. 6. Зависимости доли тран. узлов и вероятности связности сети от площади территории

Из рис. 6. видно, что при увеличении площади обслуживаемой территории, доля транзитных узлов уменьшается, что обусловлено уменьшением связности сети. При  $n = 100$  узлов и  $R = 50$  м, обеспечивается достаточная связность сети при доле транзитных узлов около 80 % при площади  $S = 62\,500$  м² и меньше (соответственно территория  $250 \times 250$  м и меньше).

4. График зависимости вероятности связности сети от доли узлов, которые могут выполнять функции транзита (при  $n = 100$  узлов,  $R = 50$  м на территории  $200 \times 200$  м).

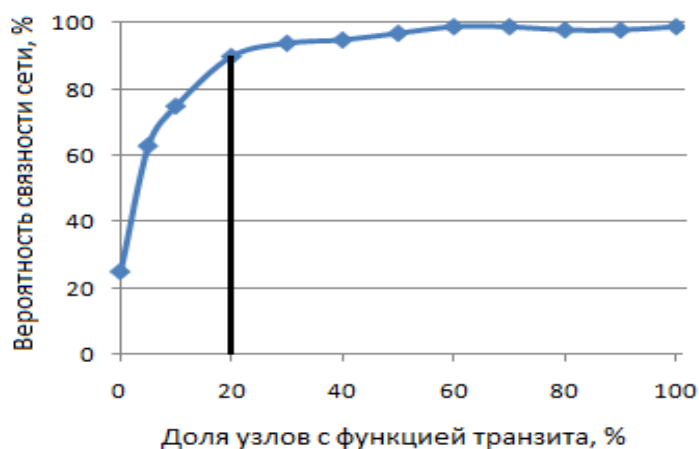


Рис. 7. Зависимости вероятности связности сети от доли узлов с функцией транзита

График на рис. 7 показывает, что при ограничении функциональности узлов в части транзита трафика, достаточная вероятность связности может быть обеспечена меньшим числом транзитных узлов. Так, при 20 % узлов с функцией транзита обеспечивается более 80% связности сети.

### Заключения

1. Структура маршрутов в СОС связи определяется функциональностью узлов (возможностью выполнения функций транзита) и их распределением по территории.

2. Структурные параметры сети (число узлов и радиус связи) влияют на долю транзитных узлов в СОС связи.

3. При ограничении доли узлов с функциями транзита может быть обеспечена достаточно высокая вероятность связности сети.

4. Управление числом транзитных узлов дает возможность оптимизации структуры СОС связи с позиции обеспечения качества обслуживания и энергопотребления.

### Литература

1. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Лубавич. 2011. 310 с. ISBN 978-5-86983-318-1.

2. Киричек Р. В., Парамонов А. И., Прокопьев А. В., Кучерявый А. Е. Эволюция исследований в области беспроводных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2014. № 4 (8). С. 29–41. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>

3. Koucheryavy A. State of the Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models // 16<sup>th</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2014. pp. 336–340.

4. Киричек Р. В., Шилин П. А. Анализ использования БПЛА как узла сети VANET // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 4 (12). С. 87–96. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-15.pdf>

5. Вырелкин А. Д., Выборнова А. И., Кучерявый А. Е. Исследование возможности применения БПЛА как мобильного шлюза летающей сенсорной сети для наземных автономных сенсорных сетей // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. Т. 4. № 1. С. 29–36. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>

6. Герасимова И. А., Парамонов А. И. Анализ трафика и качества обслуживания в беспроводных самоорганизующихся сетях // Сборник научных статей V международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании». 2016. Т. 1. С. 299–303.

7. Окунева Д. В., Бузюков Л. Б., Парамонов А. И. Анализ связности беспроводной самоорганизующейся сети при различном распределении узлов по территории // Электросвязь. 2016. № 9. С. 58–62.

8. Мутханна А. С. Сравнение протоколов маршрутизации для всепроникающих сенсорных сетей // Электросвязь. 2014. № 9. С. 5–10.

### References

1. Koucheryavy, A. E., Prokopiev, A. V., Koucheryavy, E. A. Self-Organizing Networks. SPb.: Lubavich. 2011. 310 p. ISBN 978-5-86983-318-1.

2. Kirichek, R. V., Paramonov, A. I., Koucheryavy, A. E. The Investigation Evolution in the Wireless Sensor Networks Area // Telecom IT. 2014. No. 4 (8). pp. 29–41. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-14.pdf>

3. Koucheryavy, A. State of the Art and Research Challenges for USN Traffic Flow Models // 16<sup>th</sup> International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). 2014. pp. 336–340.

4. Kirichek, R. V., Shilin, P. A. Analysis of the Use UAV as Network Node VANET // Telecom IT. 2015. No. 4 (12). pp. 87–96. URL: <https://www.sut.ru/doci/nauka/review/4-15.pdf>
5. Vyrelkin A., Vybornova A., Koucheryavy A.: Analysis of UAV Implementation as a Mobile Cluster Head of the Ground-Based Autonomous Sensor Networks // Telecom IT. 2016. Vol. 4. Iss 1. pp. 29–36. URL: <https://sut.ru/doci/nauka/review/20161/29-36.pdf>
6. Gerasimova, I. A., Paramonov, A. I. Analysis of Traffic and Quality of Service in Wireless Self-Organizing Networks // V International Scientific-Technical and Scientific-Methodical Conference «Actual Problems of Education in Science and Education». 2016. Vol. 1. pp. 299–303.
7. Okuneva, D. V., Buzyukov, L. B., Paramonov, A. I. Analysis of Wireless Self-Organizing Network's Connectivity Using a Variety Of Nodes Distribution on Territory // Electrosvyaz'. 2016. No. 9. pp. 58–62.
8. Muthanna, A. S. Comparison of Routing Protocols for Ubiquitous Sensor Networks // Electrosvyaz'. 2014. No 9. pp. 5–10.

***Чинь Ба Хуи***

– магистрант, СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232,  
Российская Федерация, [trinhbahuy.telecom@gmail.com](mailto:trinhbahuy.telecom@gmail.com)

***Парамонов Александр Иванович***

– доктор технических наук, профессор, СПбГУТ,  
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация,  
[alex-in-spb@yandex.ru](mailto:alex-in-spb@yandex.ru)

***Chin Ba Hui***

– undergraduate, SPbSUT, St. Petersburg, 193232,  
Russian Federation, [trinhbahuy.telecom@gmail.com](mailto:trinhbahuy.telecom@gmail.com)

***Paramonov Alexander***

– D.Sc., professor, SPbSUT, St. Petersburg, 193232,  
Russian Federation, [alex-in-spb@yandex.ru](mailto:alex-in-spb@yandex.ru)