

ПОКРЫТИЕ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ: АНАЛИЗ ДОСТИЖЕНИЙ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Д. М. Воробьева, А. Е. Кучерявый*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича,
Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: akouch@mail.ru

Аннотация—Предмет исследования. Статья посвящена анализу достижений и перспективным направлениям исследований в области проблем покрытия в беспроводных сенсорных сетях. **Метод.** Системный анализ. **Основные результаты.** Определение перспективных направлений исследований в области проблем покрытия в беспроводных сенсорных сетях. **Практическая значимость.** Результаты статьи могут быть использованы научными организациями при планировании развития сетей связи, а также университетами в учебном процессе.

Ключевые слова—беспроводные сенсорные сети, покрытие, кластеризация, мобильные сенсорные сети, пустоты в сетях, временные мобильные головные узлы.

Информация о статье

УДК 004.7:621.39

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 28.08.20, принята к печати 23.09.20.

Ссылка для цитирования: Воробьева Д. М., Кучерявый А. Е. Покрытие в беспроводных сенсорных сетях: анализ достижений и перспективные направления исследований // Информационные технологии и телекоммуникации. 2020. Том 8. № 3. С. 55–62. DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-55-62.

COVERAGE IN THE WIRELESS SENSOR NETWORKS: ANALYSIS AND PERSPECTIVE INVESTIGATION AREAS

D. Vorobyova, A. Koucheryavy*

The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, 193232, Russian Federation

*Corresponding author: akouch@mail.ru

Abstract—Research subject. The article is devoted to analysis of related works and perspective investigation areas to coverage in the wireless sensor networks. **Method.** System analysis. **Core results.** The identification of development perspectives of a coverage in the wireless sensor networks. **Practical relevance.** The results of the article can be used by scientific organizations when planning the development of telecommunication networks, as well as universities in the educational process.

Keywords—wireless sensor networks, coverage, clustering, mobile sensor networks, holes in the networks, temporary mobile cluster head.

Article info

Article in Russian.

Received 28.08.2020, accepted 23.09.20.

For citation: Vorobyova D., Koucheryavy A.: Coverage in the Wireless Sensor Networks: Analysis and Perspective Investigation Areas // Telecom IT. 2020. Vol. 8. Iss. 3. pp. 55–62 (in Russian). DOI 10.31854/2307-1303-2020-8-3-55-62.

Введение

Исследования в области беспроводных сенсорных сетей привлекают пристальное внимание специалистов в области сетей, систем и устройств телекоммуникаций уже в течение последних 20 лет [1, 2, 3, 4]. С появлением концепции Интернета Вещей [5, 6] исследования в этой области приобрели новые задачи, что представляется весьма естественным, поскольку беспроводные сенсорные сети являются не только технологической основой для построения сетей с предоставлением услуг Интернета Вещей, но и по времени были первыми самоорганизующимися сетями [7, 8], по которым были развернуты масштабные исследования. Поэтому, использование достижений в области беспроводных сенсорных сетей для исследований в области иных самоорганизующихся сетей представляется не только полезным, но и необходимым [9].

Среди задач по обеспечению эффективного функционирования беспроводных сенсорных сетей важнейшую роль играли и играют задачи, направленные на увеличение жизненного цикла беспроводной сенсорной сети. Достаточно большое число работ в этой области посвящено разработке алгоритмов выбора головного узла при кластеризации беспроводной сенсорной сети, среди которых есть и широко известные работы ученых СПбГУТ [10, 11, 12, 13, 14]. Весьма важным представляется понимание того, а что же является критерием при определении длительности жизненного цикла беспроводной сенсорной сети? Например,

можно было бы рассматривать в качестве критерия время гибели последнего из сенсорных узлов, особенно с учетом ограниченных энергоресурсов таких сетей. Однако наиболее эффективным представляется критерий, который основан на функционировании беспроводной сенсорной сети с заданным качеством обслуживания [15]. Последнее может быть хорошо проиллюстрировано на базе анализа мобильной беспроводной сенсорной сети [16, 17], в которой головной узел кластера в принципе в течение отрезка времени, когда он является головным, может покинуть сам кластер. Понятно, что при этом все сенсорные узлы функционируют, но сеть не выполняет своих функций. Точно также, все узлы такой сети могут сконцентрироваться в какой-либо части пространства, покрываемого беспроводной сенсорной сетью, функционировать при этом, но доля покрытия пространства будет неудовлетворительной с точки зрения сбора информации, а значит и качества обслуживания для всей беспроводной сенсорной сети.

Поэтому, двумя важнейшими направлениями в области исследований беспроводных сенсорных сетей помимо кластеризации являются увеличение связности и доли покрытия. Именно этим вопросам и посвящена настоящая статья, тем более, что в последнее время эти задачи становятся очень важными для еще одного типа самоорганизующихся сетей – сетей автомобильного транспорта [18, 19, 20], особенно с учетом приближающегося массового появления беспилотных автомобилей [21, 22].

Анализ работ в области связности для беспроводных сенсорных сетей и новые направления исследований

Существует достаточно много работ в области связности для беспроводных сенсорных сетей, начиная от фундаментальных, анализирующих возможность применения неравенства Эрдеша-Реньи для беспроводных сенсорных сетей различной плотности [23, 24, 25], и заканчивая работами по использованию беспилотных летательных аппаратов для увеличения жизненного цикла и связности для беспроводных сенсорных сетей [26, 27].

На сегодняшний день с учетом широкого распространения беспилотных летательных аппаратов последние задачи представляются нам особенно актуальными. В этой области в диссертации [28] для увеличения жизненного цикла и связности беспроводной сенсорной сети было введено понятие временного мобильного головного узла на базе одиночного беспилотного летательного аппарата (БПЛА), который, пролетая над пуассоновским сенсорным полем, на время полета над каким-либо из кластеров сенсорного поля брал на себя функции головного узла. При этом обеспечивалась экономия энергии наземного головного узла. Кроме того, существовала реальная возможность сбора информации с узлов сенсорного поля, не попавших по тем или иным причинам ни в один из кластеров. Последнее, естественно, увеличивало и долю покрытия.

На сегодняшний день представляется, что использование одиночного БПЛА является не совсем современным, особенно с учетом прогресса в области использования групп и роев БПЛА [29, 30]. Кроме того, возрастает и сложность построения самих сенсорных полей. Последнее позволяет утверждать, что исследования в области использования групп и роев БПЛА при их пролете как над

пуассоновскими, так и над мультимодальными сенсорными полями являются одним из перспективных направлений исследований в области сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

Анализ работ в области покрытия для беспроводных сенсорных сетей и новые направления исследований

В области покрытия для беспроводных сенсорных сетей хорошо известны работы ученых СПбГУТ для двумерного и трехмерного пространства [10, 17]. В последнее время, опять-таки с учетом предстоящего появления беспилотных автомобилей, особое внимание исследователей привлекают вопросы образования пустот, т. е. не покрытых сетью пространств, в сетях связи.

Основное содержание работы [31] посвящено проблемам разработки схемы обнаружения и устранения пустот для гетерогенных беспроводных сенсорных сетей. Алгоритм обнаружения пустот основан на охвате по периметру и точках пересечения покрытия различными сенсорами. Алгоритмы заполнения пустот разработаны для обоих случаев функционирования сенсорных узлов: активного и проактивного режимов. Предлагаемая схема значительно увеличивает длительность жизненного цикла беспроводной сенсорной сети и длительность полного покрытия для существующих алгоритмов кластеризации DEC (протокол детерминированной энергоэффективной кластеризации) и DBEA-LEACH (*Distance-Based Energy-Aware* малопотребляющего адаптивного алгоритма иерархической кластеризации), когда они используются вместе с предложенной схемой. Кроме того, предлагаемая схема превосходит и другие известные протоколы HEAL, DSSA и SMART, когда число узлов беспроводной сенсорной сети узлов достигает 300.

Основное содержание работы [32] посвящено проблемам разработки алгоритмов устранения пустот в зоне покрытия беспроводных сенсорных сетей. Предложен новый алгоритм NIFP (*Neighbor Intervention by Farthest Point*) для устранения пустот в покрытии в беспроводных сенсорных сетях и доказано, что он превосходит известные существующие алгоритмы. Предложенный алгоритм восстанавливает значительно большую площадь (заполняет пустоты), чем известные алгоритмы MDL или FSHC. Существенно новым также является также следующее. NIFP основан на узлах одношаговой сети, соседних с пустотой, которые перемещаются для восстановления потерянной области. Поскольку может перемещаться более, чем один сенсорный узел, алгоритм NIFP гарантирует, что выбран такой сенсорный узел, движение которого меньше всего нарушит покрытие.

На сегодняшний день представляется, что наименее исследованным является вопрос борьбы с пустотами в сетях автомобильного транспорта, особенно с учетом предстоящего массового появления беспилотных автомобилей. Предлагается использовать для этих целей группу или рой БПЛА, что представляет собой новое направление исследований в данной предметной области.

Выводы

Проведенный анализ достижений в области проблем связности и покрытия в беспроводных сенсорных сетях позволил сформулировать новые направления исследований в области сетей, систем и устройств телекоммуникаций:

- исследования в области использования групп и роев БПЛА для обеспечения связности и заданной доли покрытия при их пролете как над пуассоновскими, так и над мультимодальными сенсорными полями;
- исследования в области борьбы с пустотами в сетях автомобильного транспорта, особенно с учетом предстоящего массового появления беспилотных автомобилей, на основе использования для этих целей группы или роя БПЛА.

Литература

1. Heinzelman W. R. et all. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks / Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences. – January 2000.
2. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci E. A Survey on Sensor Networks // IEEE Communications Magazine. August 2002. Vol. 40. No. 8. 102–114 pp.
3. Кучерявый А. Е., Кучерявый Е. А. От e-России к u-России: тенденции развития электросвязи // Электросвязь. 2005. № 5. С. 10–11.
4. Кучерявый А. Е., Парамонов А. И., Кучерявый Е. А. Сети связи общего пользования // Тенденции развития и методы расчёта. ФГУП ЦНИИС, 2008.
5. Кучерявый А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
6. Бородин А. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики // Электросвязь. 2017. № 5. С. 45–49.
7. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич, 2011. 312 с.
8. Кучерявый А. Е. Самоорганизующиеся сети и новые услуги // Электросвязь. 2009. № 1. С. 19–23.
9. Кучерявый А. Е., Владыко А. Г., Киричек Р. В., Маколкина М. А., Выборнова А. И., Пирмагомедов Р. Я. Перспективы научных исследований в области сетей связи на 2017–2020 годы // Информационные технологии и телекоммуникации. 2016. № 3. С. 1–14.
10. Abakumov, P., Koucheryavy, A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN // ICACT 2014. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2014. Phoenix Park, Korea.
11. Koucheryavy, A.; Salim, A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks // Proc IEEE ICACT-10. 2010. pp. 1203–1208.
12. Koucheryavy, A.; Salim, A. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks // Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra-Modern Telecommunications, Saint-Petersburg, Russian, 2009.
13. Bogdanov, I.; Koucheryavy, A.; Paramonov, A. The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems / 14th International conference, NEW2AN 2013 and 6th Conference, ruSMART 2013. LNCS 8121, Springer. Russia, St. Petersburg. 27–29 August 2013.
14. Koucheryavy, A.; Salim, A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.
15. Аль-Кадами Н. А., Кучерявый А. Е. Адаптивный алгоритм кластеризации для беспроводных сенсорных сетей с мобильными узлами // Электросвязь. 2015. № 3. С. 22–26.
16. Kim, D.; Chung, Y. Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Networks // IMSCCS'06. Proceedings. Zhejiang University, China, June 20–24, 2006.
17. Al-Qadami N.; Laila, I.; Koucheryavy, A.; Ahmad, A. S. Mobility Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes // ICACT-2015, Proceedings, 1–3 July, Phoenix Park, Korea.
18. Васильев В. Н., Григорьев В. А., Хворов И. А., Распаев Ю. А., Аксенов В. О. Выбор структуры сети передачи данных для общегородской интеллектуальной транспортной системы // Электросвязь. 2015. № 6. С. 35–41.
19. Васильев В. Н., Григорьев В. А., Хворов И. А., Распаев Ю. А. Системы связи на транспорте: тенденции развития и задачи регулирования // Электросвязь. 2016. № 2. С. 18–23.

20. Vladyko, A.; Khakimov, A.; Muthanna, A.; Ateya A. A.; Koucheryavy, A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // *Future Internet*. 2019. Vol. 11. Iss. 6. art. no. 128.
21. Мутханна А. С. Интеллектуальная распределенная архитектура сети связи для поддержки беспилотных автомобилей // *Электросвязь*. 2020. № 7. С. 29–34.
22. Khayyat, M.; Alshahrani, A.; Alharbi, S.; Elgendy, I.; Paramonov, A.; Koucheryavy, A. Multilevel service-provisioning-based autonomous vehicle applications // *Sustainability*. 2020. V. 12. Iss. 6. P. 2497.
23. Paramonov, A.; Nurilloev, I.; Koucheryavy, A. Provision of Connectivity for (Heterogeneous) Self-Organizing Network Using UAVs // *LNCS*. 2017. V. 10531. pp. 569–576.
24. Нуриллоев И. Н., Парамонов А. И., Кучерявый А. Е. Метод оценки и обеспечения связности беспроводной сенсорной сети // *Электросвязь*. 2017. № 7. С. 39–44.
25. 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.
26. Футахи А., Парамонов А. И., Прокопьев А. В., Кучерявый А. Е. Сенсорные сети в гетерогенной зоне системы длительной эволюции // *Электросвязь*. 2015. № 3. С. 36–39.
27. Футахи А., Парамонов А. И. Беспроводные сенсорные сети с мобильными временными головными узлами // *Электросвязь*. 2016. № 9. С. 48–54.
28. Футахи А. Исследование влияния временных мобильных головных узлов на характеристики беспроводных сенсорных сетей: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13 // Футахи Абдо Ахмед Хасан. СПб., 2017. 118 с.
29. Vybornova, A., Paramonov, A., Koucheryavy, A. Analysis of the Packet Lengths in the Swarm for Flying Ubiquitous Sensor Networks // *Communications in Computer Science*. V. 678. 2016. pp. 361–368.
30. Kirichek, R.; Paramonov, A.; Koucheryavy, A. Swarm of Public Unmanned Aerial Vehicles as a Quening Network // *Communications in Computer Science*. V. 678. 2016. pp. 361–368.
31. Khedr, A. M.; Osami, W.; Salim, A. Distributed coverage hole detection and recovery scheme for heterogeneous wireless sensor networks // *Computer Communications*. V. 124. June 2018. pp. 61–75.
32. Khalifa, A. and all. Coverage Hole Repair in WSNs Using Cascaded Neighbor Intervention // *IEEE Sensors Journal*. V. 17. pp. 7209–7216.

References

1. Heinzelman, W. R. et al. Energy-Efficient Communication Protocol for Wireless Microsensor Networks / *Proceeding of the 33rd Hawaii International Conference on System Sciences*. – January 2000.
2. Akyildiz, I. F.; Su, W.; Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci E. A Survey on Sensor Networks // *IEEE Communications Magazine*. August 2002. Vol. 40. No. 8. 102–114 pp.
3. Kucheryavyj A. E., Kucheryavyj E. A. Ot e-Rossii k u-Rossii: tendencii raz-vitiya elektrosvyazi // *Electrosvyaz*. 2005. № 5. S. 10–11 (in Russian).
4. Kucheryavyj A. E., Paramonov A. I., Kucheryavyj E. A. Seti svyazi obshchego pol'zovaniya // *Tendencii razvitiya i metody raschyota*. M.: FGUP CNIIS, 2008. 296 s. (in Russian).
5. Kucheryavyj A. E. The Internet of Things // *Electrosvyaz*. 2013. No. 1. pp. 21–24 (in Russian).
6. Borodin A. S., Koucheryavy A. E. Fifth generation networks as a base to the digital economy // *Electrosvyaz*. 2017. No. 5. pp. 45–49 (in Russian).
7. Kucheryavyj A. E., Prokop'ev A. V., Kucheryavyj E. A. Samoorganizuyushchiesya seti. SPb.: Lyubavich, 2011. 312 s. (in Russian).
8. Kucheryavyj A. E. Samoorganizuyushchiesya seti i novye uslugi // *Electrosvyaz*. 2009. No. 1. pp. 19–23 (in Russian).
9. Koucheryavy A., Vladyko A., Kirichek R., Makolkina M., Paramonov A., Vybornova A., Pirmagomedov R.: The prospects for research in the field of communications networks on the 2017–2020 years // *Telecom IT*. 2016. Vol. 4. Iss. 3. pp. 1–14 (in Russian).
10. Abakumov, P., Koucheryavy, A. The Cluster Head Selection Algorithm in the 3D USN // *ICACT 2014. Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology*, 2014. Phoenix Park, Korea.

11. Koucheryavy, A.; Salim, A. Prediction-based Clustering Algorithm for Mobile Wireless Sensor Networks // Proc IEEE ICACT-10. 2010. pp. 1203–1208.
12. Koucheryavy, A.; Salim, A. Cluster-based Perimeter-coverage Technique for Heterogeneous Wireless Sensor Networks // Proceedings, ICUMT 2009 International Conference IEEE on Ultra-Modern Telecommunications, Saint-Petersburg, Russian, 2009.
13. Bogdanov, I.; Koucheryavy, A.; Paramonov, A. The mobile Sensor Network Life-Time under Different Spurious Flows Intrusion // Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems / 14th International conference, NEW2AN 2013 and 6th Conference, ruSMART 2013. LNCS 8121, Springer. Russia, St. Petersburg. 27–29 August 2013.
14. Koucheryavy, A.; Salim, A. Cluster head selection for homogeneous Wireless Sensor Networks // Proceedings, International Conference on Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. Phoenix Park, Korea.
15. Koucheryavy, A. E., Al-Kadami, N. The adaptive clustering algorithm for mobile wireless sensor networks // *Electrosvyaz*. 2015. No. 3. pp. 22–26 (in Russian).
16. Kim, D.; Chung, Y. Self-Organization Routing Protocol Supporting Mobile Nodes for Wireless Sensor Networks // IMSCCS'06. Proceedings. Zhejiang University, China, June 20–24, 2006.
17. Al-Qadami N.; Laila, I.; Koucheryavy, A.; Ahmad, A. S. Mobility Adaptive Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks with Mobile Nodes // ICACT-2015, Proceedings, 1–3 July, Phoenix Park, Korea.
18. Vasilyev V. N., Grigoryev V. A., Khvorov I. A., Raspaev Y. A., Aksenov V. O. Choice of the data transmission network's structure for city intelligent transport system // *Electrosvyaz*. 2015. No. 6. pp. 35–41 (in Russian).
19. Vasilyev V. N., Grigoriev V. A., Khvorov I. A., Raspayev Yu. A. Communication systems on transport: development tendencies and regulation tasks // *Electrosvyaz*. 2016. No. 2. pp. 18–23 (in Russian).
20. Vladyko, A.; Khakimov, A.; Muthanna, A.; Ateya A. A.; Koucheryavy, A. Distributed Edge Computing to Assist Ultra-Low-Latency VANET Applications // *Future Internet*. 2019. Vol. 11. Iss. 6. art. no. 128.
21. Muthanna A. S. Distributed intelligent communication network architecture for unmanned vehicles // *Electrosvyaz*. 2020. No. 7. pp. 29–34 (in Russian).
22. Khayyat, M.; Alshahrani, A.; Alharbi, S.; Elgendy, I.; Paramonov, A.; Koucheryavy, A. Multilevel service-provisioning-based autonomous vehicle applications // *Sustainability*. 2020. V. 12. Iss. 6. P. 2497.
23. Paramonov, A.; Nurilloev, I.; Koucheryavy, A. Provision of Connectivity for (Heterogeneous) Self-Organizing Network Using UAVs // LNCS. 2017. V. 10531. pp. 569–576.
24. Nurilloev I. N., Paramonov A. I., Koucheryavy A. E. Method of estimation and maintenance of connectivity of the wireless sensor network // *Electrosvyaz*. 2017. No. 7. pp. 39–44. (in Russian).
25. 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. (in Russian).
26. Futahi A., Paramonov A. I., Prokopiev A. V., Koucheryavy A. E. Wireless sensor networks in the LTE heterogeneous service zone // *Electrosvyaz*. 2015. No. 3. pp. 36–39 (in Russian).
27. Futahi A., Paramonov A. I. Wireless sensor networks with temporary mobile head nodes // *Electrosvyaz*. 2016. No. 9. pp. 48–54 (in Russian).
28. Futahi A. Issledovanie vliyaniya vremennykh mobil'nykh golovnykh uzlov na harakteristiki besprovodnykh sensornykh setej: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.12.13 // Futahi Abdo Ahmed Hasan. SPb., 2017. 118 s. (in Russian).
29. Vybornova, A., Paramonov, A., Koucheryavy, A. Analysis of the Packet Lengths in the Swarm for Flying Ubiquitous Sensor Networks // *Communications in Computer Science*. V. 678. 2016. pp. 361–368.
30. Kirichek, R.; Paramonov, A.; Koucheryavy, A. Swarm of Public Unmanned Aerial Vehicles as a Quening Network // *Communications in Computer Science*. V. 678. 2016. pp. 361–368.
31. Khedr, A. M.; Osami, W.; Salim, A. Distributed coverage hole detection and recovery scheme for heterogeneous wireless sensor networks // *Computer Communications*. V. 124. June 2018. pp. 61–75.
32. Khalifa, A. and all. Coverage Hole Repair in WSNs Using Cascaded Neighbor Intervention // *IEEE Sensors Journal*. V. 17. pp. 7209–7216.

Воробьева Дарья Михайловна – аспирант Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, da_shutka@mail.ru

Vorobyova Daraya – Postgraduate student, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, da_shutka@mail.ru

Кучерявый Андрей Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, akouch@mail.ru

Koucheryavy Andrey – Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Head of the Department, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, akouch@mail.ru