

DOI: 10.18721/JPM.111107

УДК 621.373.826

## КОНЦЕПЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ БЕСПРОВОДНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ СВЯЗИ МЕЖДУ НАДВОДНЫМИ КОРАБЛЯМИ

**Е.Г. Чуляева<sup>1</sup>, С.Н. Кузнецов<sup>2</sup>, Б.И. Огнев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация;

<sup>2</sup>АО «Мостком», г. Рязань, Российская Федерация

Рассмотрена проблема организации беспроводной оптической многоузловой сети (MANET) связи между надводными кораблями. MANET-связь может служить альтернативой классическому радиосообщению. Создана компьютерная модель такой сети связи, выбран алгоритм дискретной математики для организации логической сетевой инфраструктуры (алгоритм Крускала) и выдвинуты основные технические требования к терминалам оптической связи. Для моделирования сети мобильных надводных кораблей разработано программное обеспечение «Эмулятор беспроводной оптической сети».

**Ключевые слова:** беспроводная оптическая связь; FSO; маршрутизация; терминал оптической связи; MANET

**Ссылка при цитировании:** Чуляева Е.Г., Кузнецов С.Н., Огнев Б.И. Концепция построения сети беспроводной оптической связи между надводными кораблями // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 1. С. 66 – 72. DOI: 10.18721/JPM.111107

## THE CONCEPT OF BUILDING A WIRELESS OPTICAL COMMUNICATION NETWORK BETWEEN SURFACE SHIPS

**E.G. Chulyaeva<sup>1</sup>, S.N. Kuznetsov<sup>2</sup>, B.I. Ognev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Joint-stock company «Plasma», Ryazan, Russian Federation

<sup>2</sup>JSC «Mostcom», Ryazan, Russian Federation

The problem of organization of a wireless optical multi-node network (MANET) between surface ships has been considered. This type of connection can be an alternative to the classical radio message. The advantages of optical communication are faster data transmission, high security and immunity to interference. The goal of the work is creation of computer model of such communication network, a choice of an algorithm of the organization of logical network infrastructure and determination of the main technical requirements to optical communication terminals. The software “The emulator of a wireless optical network” was developed for simulation of the network of the moving surface ships. For the organization of a communication network the well-known algorithms of discrete mathematics (such as the Kruskal algorithm) were used. The simulation of the network was carried out; technical requirements to optical communication terminals as an element of the specified network were formulated.

**Key words:** wireless optical communication; free space optics; optical communication terminal; MANET

**Citation:** E.G. Chulyaeva, S.N. Kuznetsov, B.I. Ognev, The concept of building a wireless optical communication network between surface ships, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 11 (1) (2018) 66 – 72. DOI: 10.18721/JPM.111107

## Введение

Для настоящего времени характерны растущие потребности в увеличении пропускной способности каналов связи, в том числе оптических линий [1 – 8]; задача повышения скорости передачи данных по линиям связи актуальна и при проектировании систем связи между морскими надводными кораблями (SS – Surface Ships).

Высокоскоростная связь нужна не только между SS, но и в сценариях связи SS – берег и SS – летательный аппарат для решения самых разнообразных проблем: от воздушной разведки до работы систем связи в режиме радиомолчания или повышенного уровня помех (например, средства радиоэлектронной борьбы). Качество радиосвязи, традиционной в данном сегменте, не отвечает современным требованиям, налагаемым на скорость передачи информации.

С другой стороны, применение высокоскоростной радиорелейной связи над водной поверхностью осложняется как условиями распространения радиосигналов над проводящей поверхностью, так и большими угловыми отклонениями SS (качка и маневрирование) относительно угловых размеров диаграмм направленности.

В силу указанных причин, практически единственным решением проблемы высокоскоростной связи между SS может служить беспроводная оптическая связь. Однако, ввиду ряда свойств данного вида связи и особенностей указанного применения, она в настоящее время практически не используется.

В данной работе рассмотрена концепция построения сети беспроводной оптической связи между SS, начиная от требований к терминалам оптической связи и заканчивая алгоритмами организации логической сетевой инфраструктуры.

## Постановка задачи

Основным требованием при организации беспроводной оптической связи является наличие прямой видимости между приемопередатчиками (терминалами оптической связи (ОСТ)). Из-за кривизны поверхности Земли дальность прямой види-

мости существенно ограничивается. Так, при установке ОСТ на высоте 20 м, дистанция прямой видимости составляет не более 16 км.

Существенными факторами, осложняющими организацию беспроводного оптического канала связи между SS, являются относительно малые углы расходимости излучения передатчиков и малые углы зрения приемников ОСТ. Что касается передатчиков, то требование узких угловых диаграмм обусловлено необходимостью увеличения запаса по усилению (бюджета) линии связи. Снижение углов зрения приемников необходимо для минимизации их засветки посторонним излучением. Узкие угловые диаграммы приемопередатчиков ОСТ обладают теми преимуществами, что рядом установленные ОСТ практически не влияют друг на друга и детектирование сигнала невозможно вне створа луча (скрытность каналов связи). К недостатку применения узких диаграмм следует отнести необходимость создания специальных устройств для поиска, захвата и сопровождения абонента (прибор с зарядовой связью (ПЗС)) в процессе установления и поддержания оптического канала связи.

Одновременные требования как широких углов захвата системы связи, так и узких рабочих углов ОСТ приводят к необходимости использования оптического маяка или системы панорамного освещения, позволяющих каждому ОСТ найти всех возможных абонентов в видимом горизонте.

Кроме того, если для стационарных применений наведение ОСТ друг на друга возможно в ручном режиме (с их фиксацией на достаточно стабильной опоре), то для надводных кораблей при их маневрировании, а также в условиях качки, система ПЗС абсолютно необходима.

Еще одной серьезной проблемой, которую необходимо решать при организации сети беспроводной оптической связи, является разработка способов развертывания этой связи. В данном случае это может быть сеть нескольких мобильных объектов с возможностью организации на каждом из них нескольких связей точка-точка с другими объектами. В силу мобильности

связываемых объектов и нескольких направлений связи на каждом объекте, это должна быть мобильная динамическая (или самоорганизующаяся сеть), называемая в зарубежной литературе MANET (Mobile Ad hoc NETwork) [9].

### Способы решения проблемы

Исходя из сформулированных выше требований к оборудованию, в качестве ОСТ должны применяться устройства беспроводной оптической связи, которые бы обеспечивали автоматический поиск и захват (идентификация и установление связи) абонента в широком угловом секторе по горизонту (отработка маневрирования SS) и, как минимум,  $\pm 30^\circ$  по углу места (качка SS). Кроме того, необходимо сопровождение абонента в указанных условиях.

С точки зрения организации связи, система управления ОСТ каждого SS должна в каждый момент времени определять оптимальную конфигурацию направлений связи и режим использования портов, подключенных к каждому ОСТ. Для выполнения указанных задач система управления ОСТ должна иметь информацию о местоположении и ориентации главной оси SS в пространстве. Определение оптимальной сетевой конфигурации в MANET является достаточно сложной задачей [9, 10], решение которой существенно зависит от сценариев применения. Так, в работе [9] рассматривается общий случай конфигурирования сети с ее использованием на различных типах наземного рельефа, применением воздушных мобильных объектов и различных типов связи (RF-модули служат для передачи данных в диапазоне УКВ, например, Bluetooth и модули Wi-Fi).

В рассматриваемом случае организации беспроводной оптической связи между морскими SS задача значительно упрощается благодаря тому, что известны размеры области связности (до 20 км) и безусловно существует прямая видимость между SS.

В качестве базового варианта, для решения задачи построения сети необходимы следующие процедуры:

определение всех возможных линий связи между SS (на основе информации об

их размещении и ориентации);

построение оптимального (покрывающего) дерева связей между SS;

назначение оставшихся доступных связей в качестве резервных или параллельных каналов связи.

Исходя из возможных сценариев, построение указанного дерева связей можно осуществить не только на основе полной информации о размещении и ориентации SS (которая не всегда доступна), но и с использованием двух других вариантов:

во-первых, на основе заранее назначенного центрального узла (например, SS-флагмана);

во-вторых, путем параллельного построения отдельных каналов связи между соседними SS с постепенным объединением их в общую сеть.

В качестве описанных выше методов построения покрывающего дерева можно использовать хорошо известные алгоритмы дискретной математики Крускала, Прима и Борувки [11 – 14].

### Моделирование организации сети

Для моделирования сети мобильных SS было разработано программное обеспечение «Эмулятор беспроводной оптической сети» (ПО ЭБОС).

Указанное ПО позволяет размещать на плоскости несколько SS с заданным количеством ОСТ на каждом из них, при этом задаются положение и ориентация каждого SS.

Базовым элементом в модели является надводный корабль, на котором установлены терминалы оптической связи с рабочими углами, оси которых направлены в противоположные стороны. Под рабочими углами подразумеваются секторы обзора в горизонтальной плоскости, содержащие направления, по которым можно установить связь (включая все три фазы установления связи: поиск, захват, сопровождение). Геометрическая модель, поясняющая расположение SS с ОСТ и рабочих углов, схематически представлена на рис. 1.

Согласно предлагаемой модели, каждый SS как объект сети характеризуется количеством ОСТ и их рабочими углами.

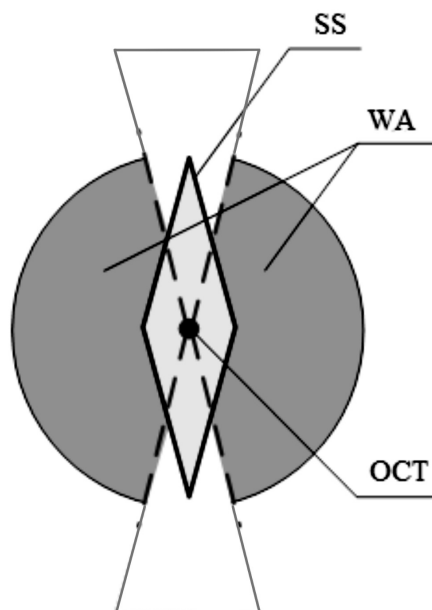


Рис. 1. Геометрическая модель, поясняющая расположение надводного корабля (SS) с терминалом оптической связи (OCT) и рабочих углов (WAs)

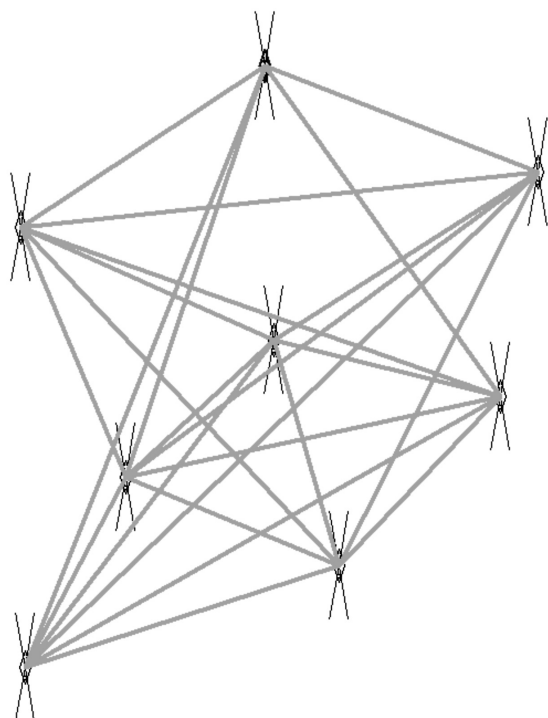


Рис. 2. Восемь надводных кораблей на плоскости моделирования программного обеспечения «Эмулятор беспроводной оптической сети» (ПО ЭБОС); показаны углы обзора OCT и все возможные линии связи

Использование данной модели предполагает, что при задании количества, расположения и ориентации надводных кораблей возможно построение графа возможных связей между SS.

На рис. 2 приведены восемь SS, расположенных в поле моделирования, с обозначенными углами обзора OCT и всеми возможными линиями связи.

Видно, что набор возможных связей между SS довольно объемный. Построение остоного дерева по алгоритму Крускала (исходя из знания полной картины расположения и ориентации SS) осуществлялось согласно блок-схеме, приведенной на рис. 3. Алгоритм был модифицирован в части поиска «безопасного ребра» (“a fail-safe edge”). При анализе каждой линии связи, т.е. кандидата на подключение к сети, учитывалось не только наличие принадлежности только одного узла к компоненте связности сети («безопасность»), но и наличие свободных OCT (an edge equipped with free OCT).

Применение указанного алгоритма позволило построить сеть связи (рис. 4).

Реализация алгоритмов Прима и Борувки для двух других сценариев построения сети связи дает то же самое остоное дерево (см. рис. 4). В остоном дереве могут остаться недействующие связи, реализация которых все же возможна (важно их количество). Оставшиеся возможные направления связи могут быть распределены с двумя целями:

для резервирования уже установленных линий связи (параллельные соединения) с объединением их в один канал связи с балансированием нагрузки;

для организации обходных путей (недействующие петли) с целью повышения надежности работы сети в целом.

Таким образом, моделирование сети связи показало возможность создания беспроводной оптической сети связи между произвольно расположенными надводными кораблями. При этом учитывается их расположение и использование терминалов оптической связи, обладающих конечными рабочими углами.

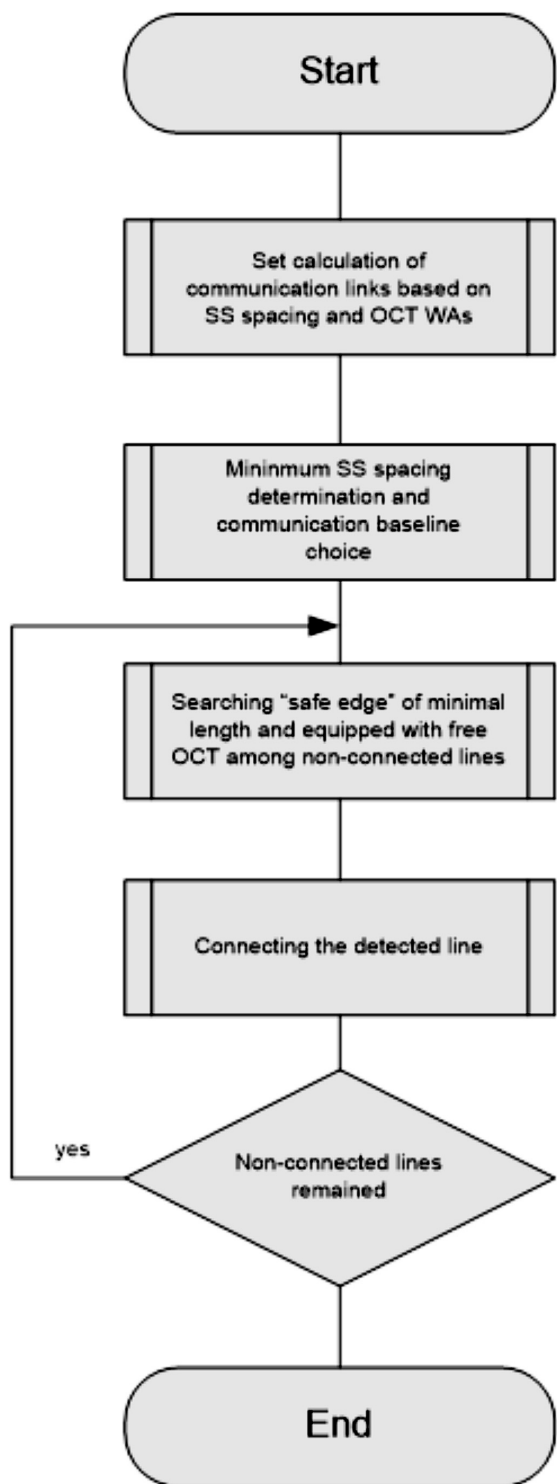


Рис. 3. Алгоритм Крускала для построения остоного дерева связи SS на плоскости моделирования ПО ЭБОС; алгоритм модифицирован в части поиска «безопасного ребра» (“safe edge”)

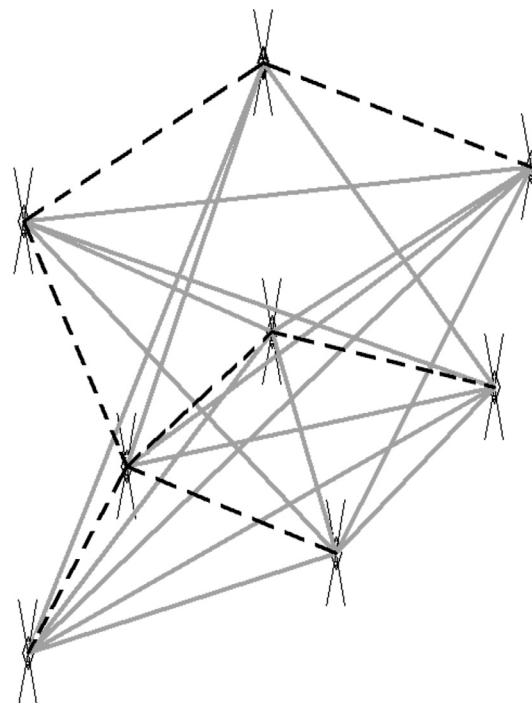


Рис. 4. Остоное дерево связи SS, полученное по алгоритму Крускала (см. рис. 3); основные линии связи показаны пунктирными линиями

На основе рассмотренных свойств OCT и способов организации связи необходимо сформулировать основные технические требования к реализации предлагаемой сети:

- в режиме поиска должна обеспечиваться панорамная подсветка SS для нахождения его абонентами (это OCT, установленные на других SS);

- следует разработать автонаведение OCT в режиме сопровождения (после установления связи), это автонаведение должно обеспечивать компенсацию всех видов качки SS;

- требуется наличие блока центрального управления всеми OCT, установленными на одном SS, с целью конфигурирования сети, маршрутизации, резервирования линий связи и балансировки потоков данных, а также обмена служебной информацией о состоянии сети с блоком центрального управления других SS и интеграцией с локальной сетью SS.

### Заключение

Рассмотрены вопросы организации беспроводной оптической многоузловой сети связи между надводными кораблями. Определены алгоритмы организации сети связи для

использования в трех возможных сценариях; указанные алгоритмы дают одну конфигурацию остовного дерева связи. Сформулированы требования к техническим средствам обеспечения указанной сети связи.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Li Yu., Pappas N., Angelakis V., Pioro M., Di Yu. Optimization of free space optical wireless network for cellular backhauling // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2015. Vol. 33. No. 2. Pp. 1841–1854.
2. Rong X., Won-Hyuk Y., Young-Chon K. Reconfigurable routing protocol for free space optical sensor networks // Sensors. 2012. Vol. 12. No. 4. Pp. 4824–4845.
3. Khalighi M., Uysal M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective // IEEE Communications Surveys Tutorials. 2014. Vol. 10. No. 2. Pp. 1–29.
4. Zhou H., Babaei A., Mao S., Agrawal P. Algebraic connectivity of degree constrained spanning trees for FSO networks // IEEE International Conference on Communications. 2013. 9–13 June. Budapest, Hungary. Pp. 5991–5996.
5. Forin D.M., Incerti G., Beleffi G.M.T., Teixeira A.L.J., Costa L.N., De Brito A.P.S., Geiger B., Leitgeb E., Nadeem F. Free space optical technologies (Ch. 13) // Trends in Telecommunications Technologies. Ed. by Ch.J. Bouras. Publisher: Intech, 2010. Pp. 257–296.
6. Alkholidi A.G., Altowij K.S. Free space optical communications: theory and practices // Contemporary Issues in Wireless Communications. Ed. M. Khatib. Ch. 5. InTech, 2014. Pp. 159–212.
7. Гуров В.С., Зоркин В.С., Гомозкова Е.Ю., Кондрахин А.А., Мельничук Г.В., Паюров А.Я., Огнев Б.И., Чуляева Е.Г. Информационные лазерные технологии в промышленности и системах связи. Рязань: Рязан. гос. радиотехн. ун-т, 2016. 92 с.
8. Гуров В.С., Мишин В.Ю., Чуляева Е.Г. Лазерные информационные технологии. Lambert Academic Publishing, 2017. 114 с.
9. Dwivedi A., Harshavardhana P., Velez P.G., Tebben D.J. Dynamic topology optimization for assuring connectivity in multihop mobile optical wireless communications networks // J. Hopkins Apl. Techn. Digest. 2011. Vol. 30. No. 2. Pp. 151–167.
10. Kaushal H., Kaddoum G. Free space optical communication: challenges and mitigation techniques // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2017. Vol. 19. No. 1. Pp. 57–96.
11. Белоусов А.И., Ткачев С.Б. Дискретная математика. М.: МГТУ, 2006. 744 с.
12. Cheriton D., Tarjan R.E. Finding minimum spanning trees // SIAM Journal on Computing. 1976. Vol. 5. No. 4. Pp. 724–741.
13. Eppstein D. Spanning trees and spanners. Handbook of computational geometry. 1999. Pp. 425–461.
14. Mareš M. Two linear time algorithms for MST on minor closed graph classes // Archivum mathematicum. 2004. Vol. 40. No. 3. Pp. 315–320.

Статья поступила в редакцию 24.10.2017, принята к публикации 06.11.2017.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЧУЛЯЕВА Елена Георгиевна** — доктор технических наук, старший научный сотрудник АО «Плазма», г. Рязань, Российская Федерация.  
390000, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Циолковского, 24  
grp@plasmalabs.ru

**КУЗНЕЦОВ Сергей Николаевич** — директор по информационным технологиям АО «Мостком», г. Рязань, Российская Федерация.  
390046, Российская Федерация, г. Рязань, ул. Фрунзе, 6.  
ksn@mостком.ru

**ОГНЕВ Борис Игоревич** — директор по развитию АО «Мостком», г. Рязань, Российская Федерация.  
390046 г. Рязань, ул. Фрунзе, 6.  
develop@mостком.ru

## REFERENCES

- [1] Yu. Li, N. Pappas, V. Angelakis, M. Piore, Yu. Di, Optimization of free space optical wireless network for cellular backhauling, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 33 (2) (2015) 1841–1854.
- [2] X. Rong, Y. Won-Hyuk, K. Young-Chon, Reconfigurable routing protocol for free space optical sensor networks, *Sensors*. 12 (4) (2012) 4824–4845.
- [3] M. Khalighi, M. Uysal, Survey on free space optical communication: A communication theory perspective, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 10 (2) (2014) 1–22.
- [4] H. Zhou, A. Babaei, S. Mao, P. Agrawal, Algebraic connectivity of degree constrained spanning trees for FSO networks, *IEEE ICC*, 9–13 June. Budapest, Hungary (2013) 5991–5996.
- [5] D.M. Forin, G. Incerti, G.M.T. Beleffi, et al., Free space optical technologies, In: *Trends in Telecommunications Technologies*, Ch. 13, Ed. Ch.J. Bouras, Intech (2010) 257–296.
- [6] A.G. Alkholidi, K.S. Altowij, Free space optical communications: Theory and practices, In: *Contemporary Issues in Wireless Communications*, Ch. 5, Ed. M. Khatib, InTech (2014) 159–212.
- [7] V.S. Gurov, V.S. Zorkin, E.Yu. Gomozkova, et al., *Informatsionnyye lazernyye tekhnologii v promyshlennosti i sistemakh svyazi* [Informational laser technologies in industry and communications systems], Ryazan, Ryazan. State Radioeng. Un-ty, 2016.
- [8] V.S. Gurov, V.Yu. Mishin, E.G. Chulyayeva, *Lazernyye informatsionnyye tekhnologii* [Informational laser technologies], Lambert Academmic Publishing, 2017.
- [9] A. Dwivedi, P. Harshavardhana, P.G. Velez, D.J. Tebben, Dynamic topology optimization for assuring connectivity in multihop mobile optical wireless communications networks, *Johns Hopkins Apl. Technical Digest*. 30 (2) (2011) 151–167.
- [10] H. Kaushal, G. Kaddoum, Free space optical communication: challenges and mitigation techniques, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 19 (1) (2017) 57–96.
- [11] A.I. Belousov, S.B. Tkachev, *Diskretnaya matematika* [Discrete mathematics], Moscow, MSTU, 2006.
- [12] D. Cheriton, R.E. Tarjan, Finding minimum spanning trees, *SIAM Journal on Computing*. 5 (4) (1976) 724–741.
- [13] D. Eppstein, Spanning trees and spanners, *Handbook of Computational Geometry* (1999) 425–461.
- [14] M. Mareš, Two linear time algorithms for MST on minor closed graph classes, *Archivum mathematicum*. 40 (3) (2004) 315–320.

*Received 24.10.2017, accepted 06.11.2017.*

## THE AUTHORS

### CHULYAEVA Elena G.

*Joint-stock company "Plasma"*

24 Tsiolkovskogo St., Ryazan, 390000, Russian Federation.  
grp@plasmalabs.ru

### KUZNETSOV Sergey N.

*JSC "Mostcom"*

6 Frunze St., Ryazan, 390046, Russian Federation.  
ksn@mocckom.ru

### OGNEV Boris I.

*JSC "Mostcom"*

6 Frunze St., Ryazan, 390046, Russian Federation.  
develop@mocckom.ru