

# ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION-COMMUNICATION TECHNOLOGIES

УДК 621.391

DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-84-92

## Моделирование процедуры восстановления маршрута в беспроводных сетях MANET

*А.С. Волков, А.А. Бахтин, А.В. Миронов,  
С.С. Муратчаев, А.С. Заболотный*

*Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,  
г. Москва, Россия*

*bah@miee.ru*

Беспроводная децентрализованная самоорганизующаяся сеть MANET (Mobile Ad-hoc Network) состоит из мобильных узлов. Специфика данных сетей заключается в том, что каждый узел выступает в качестве конечного устройства или маршрутизатора транзитного трафика. Постоянное перемещение узлов в пространстве не позволяет сформировать фиксированную топологию такой сети. Следовательно, возникает проблема организации трафика и управления им в сетях MANET. Подходы, применяемые в алгоритмах сетевой маршрутизации, используют ресурсоемкие процедуры для восстановления маршрута, ввиду чего необходимо сокращать объемы генерируемого служебного трафика.

Рассмотрена аналитическая модель алгоритма восстановления маршрута в беспроводных сетях MANET, время которого заведомо меньше, чем время построения нового маршрута. Описана траектория движения узлов сети. Проведено имитационное моделирование процедуры восстановления маршрута и его перестройки на основе алгоритма AODV.

Эффективность предложенной процедуры восстановления маршрута позволяет достичь выигрыша в среднем на 52 % по сравнению с аналогичным алгоритмом AODV. Критерий качества разработанного алгоритма превосходит критерии качества альтернативных вариантов алгоритмов восстановления маршрута.

*Ключевые слова:* сети MANET; алгоритмы маршрутизации; сетевое моделирование; графы; сетевые узлы.

*Для цитирования:* Моделирование процедуры восстановления маршрута в беспроводных сетях MANET /А.С. Волков, А.А. Бахтин, А.В. Миронов и др. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 84–92. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-84-92

## **Modeling Procedure of Route Restoration in MANET**

*A.S. Volkov, A.A. Bakhtin, A.V. Mironov,  
S.S. Muratchaev, A.S. Zabolotnii*

*National Research University of Electronic Technology, Moscow, Russia*

*bah@miee.ru*

The specifics of MANET (Mobile Ad-hoc Network) wireless decentralized self-organizing network, consisting of mobile nodes, is that each node of the network acts as a terminal device or as a router for transit traffic. The constant movement of the nodes does not allow forming the fixed topology of the network. Therefore, the problem of organizing and managing the traffic in MANET arises. An important component of the traffic management and constructing the path of packets with the data and service load is routing. The approaches used in the network routing algorithms use the resource-intensive procedures to restore the route, which means that it is necessary to reduce the amount of the generated service traffic.

A model of the route recovery algorithm, the time of which is known to be less than the time for constructing a new route, has been proposed. The imitation simulation of the route recovery algorithm and the route rearrangement algorithm based on the AODV algorithm has been carried out. The efficiency of the proposed route recovery procedure allows a 52% improvement (mean) compared to a similar AODV algorithm.

An analytical model of the route recovery procedure in MANET and a description of the network nodes movement have been proposed.

*Keywords:* MANET; routing algorithms; network modeling; graphs; network nodes.

*For citation:* Modeling procedure of route restoration in MANET / A.S. Volkov, A.A. Bakhtin, A.V. Mironov et al. // Proc. of Universities. Electronics. – 2018. – Vol. 23. – № 1. – P. 84–92. DOI: 10.24151/1561-5405-2018-23-1-84-92

**Введение.** В настоящее время беспроводные сети развиваются по двум основным направлениям [1]. Первое направление характеризуется обязательным наличием базовой станции. В таких сетях все абоненты распределены по ячейкам, организованным базовыми станциями. Второе направление не предполагает наличие базовых станций в архитектуре сети, что приводит к ряду особенностей и сложностей при их разработке и проектировании. Основное отличие данных сетей в том, что им присущи принципы самоорганизации и децентрализации. Каждый узел сети выступает как оконечное устройство, потребляющее и генерирующее трафик, и как устройство, предоставляющее смежным абонентам транзитные потоки информации. При этом предполагается постоянное передвижение сетевых узлов в пространстве. Такие сети получили название MANET (Mobile Ad-hoc Networks) [2].

Основной недостаток сетей MANET – необходимость постоянного перестроения маршрута из-за повышенной динамичности сетевой топологии. Эта проблема частично решена в алгоритмах AODV [3], AODVM, OLSR [4] с помощью перестроения маршрута.

В настоящей работе представлен алгоритм, выполняющий восстановление маршрута между начальным и конечным узлом за время, заведомо меньшее времени полной перестройки маршрута, которое достигнуто в алгоритмах AODV, AODVM и OLSR. В сетях MANET большое значение имеет пропускная способность. Данный параметр можно улучшить на физическом уровне модели OSI, меняя параметры сигнала, а также на канальном и сетевом уровнях, усовершенствуя алгоритмы маршрутизации. Предлагаемый алгоритм быстрого восстановления маршрута предназначен для использования в разработанном ранее реактивном алгоритме, однако он также применим в проактивных и гибридных алгоритмах.

**Постановка задачи.** В основе математического описания модели лежит теория графов. Сетевые узлы представлены вершинами, наличие связи между вершинами отражается в виде ребер, а пропускная способность соответствует весам ребер. Так как каналы связи являются симметричными, к графовой модели предъявляются следующие требования: граф должен быть неориентированным, без петель и кратных ребер; вес ребра должен быть задан минимальным.

Каждая вершина графа имеет уникальный идентификатор, поэтому модель mesh-сети можно представить в виде формулы [5]

$$G = (E, V),$$

где  $E = \{e_i\}$  – множество ребер,  $i = \overline{1, N}$ ;  $V = \{v_j\}$  – множество вершин,  $j = \overline{1, J}$ .

Каждому ребру данной модели назначена весовая функция  $w(t)$ , характеризующая пропускную способность канала. Будем считать, что параметр  $t = \text{const}$ .

**Описание работы модели.** На рис.1 приведен пример сценария разрыва маршрута.

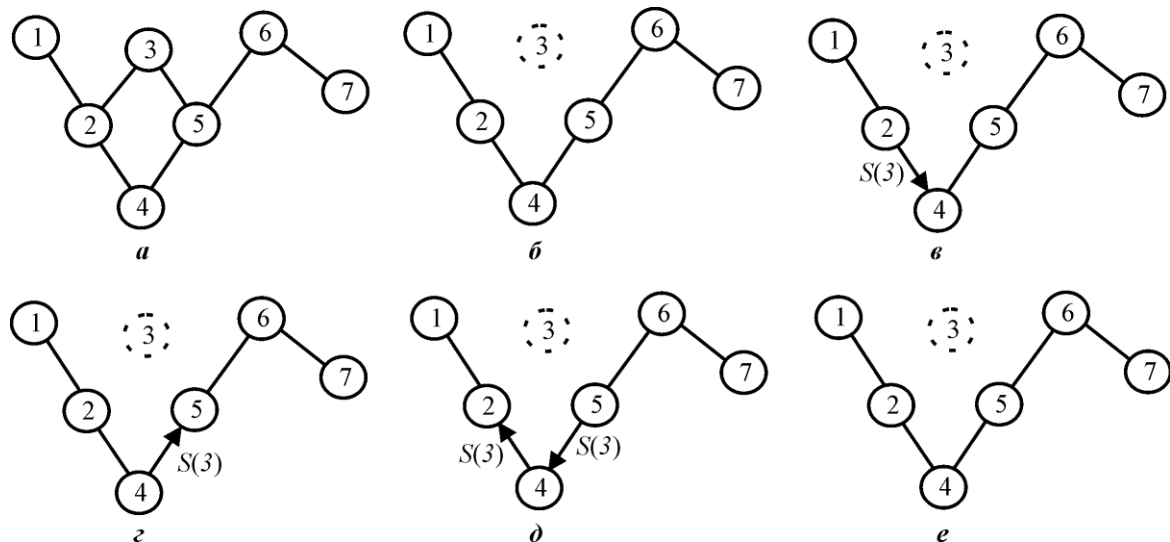


Рис.1. Сценарий восстановления маршрута: а, б – процедуры разрыва; в-е – процедуры восстановления

Fig.1. Scenario of a broken route: a-b – process of broken route; c-f – the process of route restoration

Сначала узел 1 транслирует узлу 7 информацию по заранее определенному маршруту: 1–2–3–5–6–7 (рис.1,а). Затем узел 3 отключается и маршрут теряется (рис.1,б). Далее осуществляется процедура восстановления маршрута: узел 2 производит широковещательную рассылку SEARCH-пакетов с информацией о разыскиваемом узле 3

(рис.1,в), узел 4 в свою очередь дублирует рассылку пакета до узла 5 (рис.1,з). После этого узел 5 сравнивает данные и определяет, от какого узла ранее приходили пакеты с присланным разыскиваемым узлом в SEARCH-пакете, затем идентифицирует себя для узла 4 как узел 3 (рис.1,д), а узел 4 пересылает REPLAY-пакет (SR) узлу 2 с информацией о том, что узел 3 найден (рис.1,е). На этом процедура работы алгоритма восстановления маршрута считается завершенной. Обобщенная схема алгоритма приведена на рис.2.

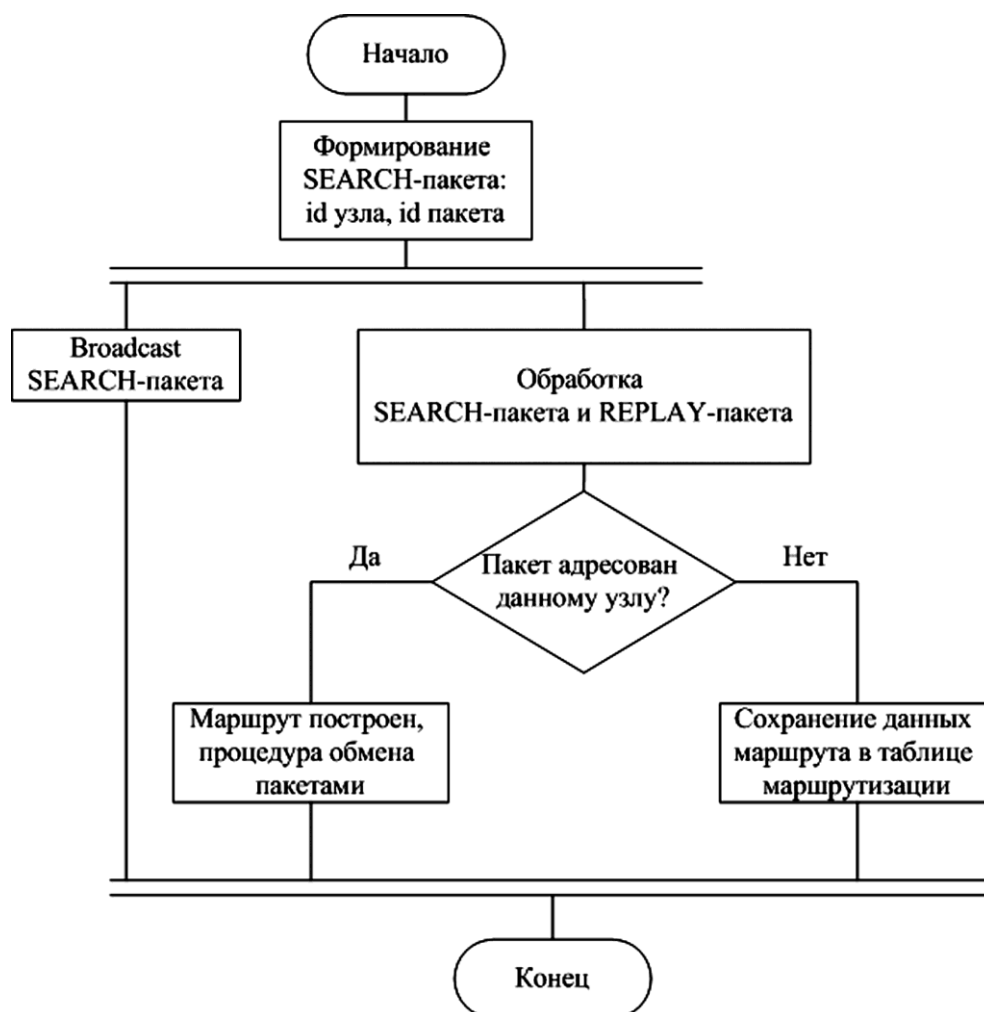


Рис.2. Обобщенная схема работы алгоритма  
Fig.2. Scheme of an algorithm

Критериями эффективности работы алгоритма являются параметры времени восстановления маршрута  $T$  и качества восстановленного маршрута  $S(G(E, V))$  [6]. Критерием качества является пропускная способность восстановленного маршрута [7]:

$$S = \text{sum}\{e_i\}, \quad (1)$$

где  $e_i$  – множество весов  $w$  ребер нового маршрута. Пропускная способность между узлами  $S$  принимает максимальные значения при  $e_i \in E$ .

Наилучший алгоритм построения маршрута [8] должен стремиться к минимизации времени восстановления маршрута и максимизации пропускной способности:

$$Q = \{\min(T), \max(S)\}, \quad (2)$$

где  $Q$  – критерий эффективности.

Минимизация времени перестроения маршрута зависит от числа сетевых узлов, которые были задействованы, и от пропускной способности сетевых каналов  $T(V, E)$ . Максимизация пропускной способности зависит от плотности сети  $p$ , связности сети  $l$  (количество каналов, т.е. ребер) и пропускной способности между узлами  $S$ . Плотность сети – расположение в пространстве сетевых узлов, которые потенциально могут быть соединены друг с другом. При  $p = 1$  все устройства соединены друг с другом, при  $p = 0$  нет возможных соединений. Примем, условно, что максимальная плотность равна 1, а минимальная равна 0. В случае  $p(l, S) = 1$  сеть полностью связная, т.е. каждое устройство соединено с любым другим устройством. В случае  $p(l, S) = 0$  в сети нет ни одной связи, т.е. ни одно устройство не имеет активного соединения с любым другим устройством.

Пусть при  $p(l, S) \approx 1$  (в этом случае в сети нет связи только между адресатом и адресантом) два узла обмениваются информацией через промежуточный узел. Очевидно, что когда  $\lim p(l, S) = 1$ , достигается максимальная пропускная способность между любыми двумя узлами и алгоритм способен осуществить восстановление маршрута за минимальное время, причем данный маршрут будет удовлетворять (2). Время восстановления маршрута в данном случае фиксировано [5]:

$$t \geq (t_{req} + t_{replay}),$$

где  $t_{req}$ ,  $t_{replay}$  – время отправки запроса и ответа соответственно.

При  $\lim p(l, S) \neq 1$  сеть представлена неполностью связным графом. Время построения маршрута зависит от  $p(l, S)$ . Значения  $t_{req/replay}$  вычисляются по формуле

$$t_{req/replay} = \sum_{i=1}^{N-1} t_{req_i} + t_{replay_i}, \quad (3)$$

где  $t_{req_i/replay_i}$  – время задержки сообщения на  $i$ -м ребре.

Формулу (2) можно переписать с учетом (1) и (3), тогда критерий качества равен [3]:

$$Q = \{\min(\sum_{i=1}^{N-1} t_{req_i} + t_{replay_i}), \max(\text{sum}\{e_i\})\}.$$

В большинстве сетевых моделей узлы представлены в виде условных точек с отсутствием физического представления модели [9]. Данное упрощение позволяет смоделировать близкие к идеальным сетевые ситуации, которые в реальности невозможны или маловероятны. Например, маловероятно, что сетевые узлы будут располагаться практически рядом [10] и расстояние между ними приблизится к 0. В то же время существуют условные минимальные расстояния, до которых сближаются те или иные сетевые узлы. При моделировании траектории взаимного перемещения сетевых узлов с целью приближения условий моделирования к реальным необходимо учитывать минимально допустимую дистанцию между каждым сетевым узлом. С учетом имеющихся у каждого устройства зон, которые не могут перекрываться, система взаимодействующих

узлов может быть представлена моделью физической границы двух узлов (рис.3). Реальные физические объекты, как правило, очень редко меняют направление своего движения. По этой причине их движение лучше описывается не кривыми, полученными линейной интерполяцией, а «гладкими» кривыми, или сплайнами [10].

Разместим случайным образом на плоскости точки узлов и опишем их движение с помощью множества кубических сплайнов [11, 12]:

$$P_i(x) = a_i(x - x_{i-1})^3 + b_i(x - x_{i-1})^2 + c_i(x - x_{i-1}) + d_i \text{ при } P_i' = P_i'',$$

где  $a_i, b_i, c_i, d_i$  – коэффициенты сплайна.

В результате получим интерполяционный полином, проходящий по всем заданным точкам маршрута и наиболее «гладко» его описывающий.

**Моделирование.** В ходе моделирования работы алгоритма восстановления маршрута получены результаты, представленные на рис.4.

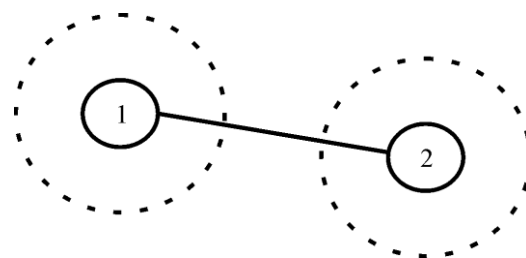


Рис.3. Модель физической границы двух узлов: --- границы, которые не могут быть пересечены другими телами; — установленная связь между двумя узлами

Fig.3. Model of physical borders of two nodes: --- physical borders of a node, that can't be crossed by other nodes; — established communication between two nodes

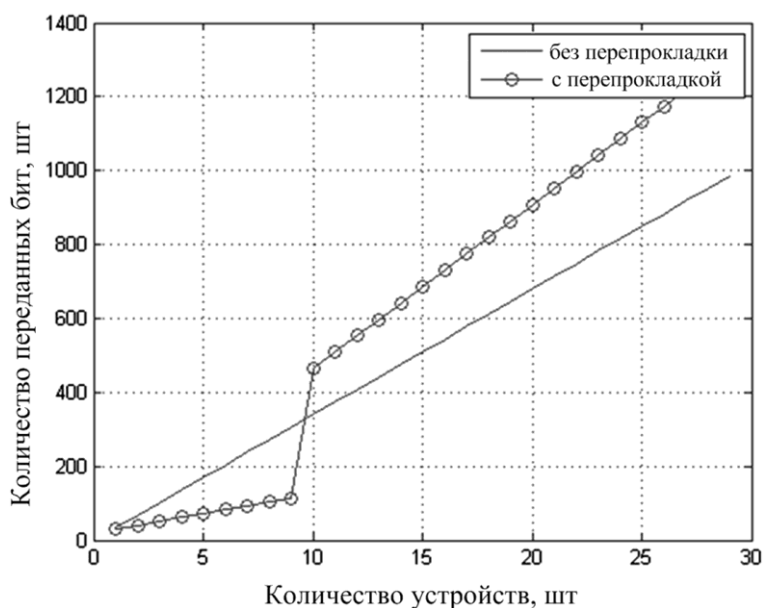


Рис.4. Результаты моделирования «жадного» алгоритма восстановления маршрута

Fig.4. Results of modeling of a «greedy» algorithm of restoration of a route

Алгоритм позволяет получить выигрыш в производительности в случае, когда существует обходной маршрут с числом узлов, не превышающим значения параметра активных ретрансляций – количества устройств, участвующих в передаче информации между отправителем и адресатом. На рис.4 выигрыш представлен для сетей с числом узлов от 2 до 9. Для сетей с количеством узлов от 9 смоделирован разрыв маршрута. В

результате восстановления маршрута с помощью разработанного «жадного» алгоритма невозможно. В «жадном» алгоритме число узлов, по которым происходит восстановление, превышает количество ретрансляций hopCount [13]. Из рис.4 видно, что время на восстановление маршрута увеличивается и алгоритм становится менее эффективным, чем алгоритм AODV [14, 15] по временному параметру восстановления маршрута. В таблице представлены результаты моделирования и значения эффективности алгоритма для выстроенных узлов в ряд при значениях параметра hopCount от 2 до 9.

#### Результаты моделирования работы алгоритма восстановления маршрута

##### Results of modeling the algorithm of route restoration

Количество ретрансляций hopCount	Служебный трафик, бит		Эффективность, %
	Обычный алгоритм	Оптимизированный алгоритм	
2	34	34	100
3	83	51	38,55
4	132	68	48,48
5	181	85	53,03
6	230	102	55,65
7	279	119	57,34
8	328	136	58,53
9	377	153	59,41

**Заключение.** Результаты моделирования процедуры восстановления маршрута в беспроводных сетях MANET и анализ работы алгоритма, в сравнении с существующим алгоритмом без надстройки, показали следующее. В случае  $\lim p(l, S) = 1$  критерий качества работы  $Q$  разработанного алгоритма превосходит критерий качества существующих альтернативных алгоритмов восстановления маршрута.

#### Литература

1. Ориентирование группы мобильных роботов / *А.Г. Тимошенко, А.А. Бахтин, И.М. Тепляков и др.* // Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конф. с междунар. участием (Москва, 18–22 апр. 2016 г.). – М., 2016. – С. 119–121.
2. *Бунин С.Г., Войтер А.П., Ильченко М.Е., Романюк В.А.* Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами. – К., 2012. – 444 с.
3. *Perkins C., Das S.* Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing. – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561> (дата обращения: 19.08.2017).
4. *Clausen T., Jacquet P.* Optimized link state routing protocol (OLSR). – URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3626>(дата обращения: 19.08.2017).
5. *Таненбаум Э., Уэзеролл Д.* Компьютерные сети. – 5-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 960 с.
6. *Бахтин А.А., Волков А.С., Миронов А.В., Муратчаев С.С.* Разработка алгоритма маршрутизации в децентрализованных самоорганизующихся сетях MANET // Естественные и технические науки. – 2016. – №12 (102). – С. 232–243.
7. *Marvin M.M., Muthukumar N.* High throughput in MANET using relay algorithm and rebroadcast probability // International Conference on Humming Bird (Levingipuram Tamil Nadu, India, 1 March 2014). – 2014. – P. 66–71.
8. *Learmonth G., Holliday J.* NS3 simulation and analysis of MCCA: multihop clear channel assessment in 802.11 DCF // Consumer Communications and Networking Conf. (Las Vegas, NV, USA, 9–12 Jan. 2011). – 2011. – P. 198–202.

9. Тимошенко А.Г., Тепляков И.М., Кузнецов В.С., Солодков А.В. Метод обеспечения энергетической скрытности при определении координат целей // Тр. МАИ. – 2016. – № 91. – С. 20–22.
10. Халмош П. Конечномерные векторные пространства. – М.: Изд-во физ.-мат. лит, 1963. – 263 с.
11. Control traffic transmission period minimization for routing in resource constrained MANET / A. Bakhtin, A. Timoshenko, R. Gridasov et al. // Intern. Conf. on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (Kumaracoil, India, 18–19 Dec. 2015). – 2015. – P. 514–517.
12. Денис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решение нелинейных уравнений. – М.: Мир, 1988. – 440 с.
13. Миронов А.В., Муратчаев С.С. Разработка модели сети MANET при взаимодействии группы роботов в космическом пространстве / Под ред. А.С. Волкова // Гагаринские чтения – 2017: XLIII Международная молодежная науч. конф.: сб. тез. докл. – М.: МАИ, 2017. – С. 699.
14. Fubao Yang, Baolin Sun. Ad hoc on-demand distance vector multipath routing protocol with path selection entropy // Consumer Electronics, Communications and Networks (Xianning, China, 16–18 April 2011). – 2011.
15. Ramakrishnan M., Priya S.B.M., Shanmugavel S. Mathematical modeling of routing protocol selection for optimal performance of MANET // Second International Conference on Computer and Network Technology (Bangkok, Thailand, 23–25 April 2010). – 2010. – P. 217–221.

Поступила 21.08.2017 г.; принята к публикации 09.11.2017 г.

**Волков Алексей Станиславович** – кандидат технических наук, доцент кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), leshvol@mail.ru

**Бахтин Александр Александрович** – кандидат технических наук, заведующий кафедрой телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), bah@miee.ru

**Миронов Алексей Владимирович** – аспирант кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), bah@miee.ru

**Муратчаев Султансаид Султанханович** – аспирант кафедры телекоммуникационных систем Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), said.muratchaev@gmail.com

**Заболотный Антон Сергеевич** – магистрант кафедры информационной безопасности Национального исследовательского университета «МИЭТ» (Россия, 124498, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, д. 1), anton.zabolonii@yandex.ru

## References

1. Timoshenko A.G., Bahtin A.A., Teplyakov I.M., Molenkamp K.M., Volkov A.S. Orientirovanie gruppy mobil'nyh robotov [Orientation of group of mobile robots]. *Informacionno-telekommunikacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnyh sistem: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem* [Information and telecommunication technologies and mathematical simulation of hi-tech systems: materials of the All-Russian conference with the international involvement]. Moscow, RUDN University Publ., 2016., pp. 119–121. (In Russian).
2. Bunin S.G., Vojter A.P., Il'chenko M.E., Romanyuk V.A., *Samoorganizuyushchiesya radioseti so sverhshirokopolosnymi signalami* [The Self-organized radio networks with ultrabroadband signals]. Kiev, 2012. 444 p. (In Russian).
3. Perkins C., Das S. *Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing*. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3561> (accessed: 19.08.2017).
4. Clausen T., Jacquet P. *Optimized link state routing protocol (OLSR)*. Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3626> (accessed: 19.08.2017).



5. Tanenbaum E., Uezeroll D. *Komp'yuternye seti. 5-e izd.* [Computer networks]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2012. 960 p. (In Russian).
6. Bahtin A.A., Volkov A.S., Mironov A.V., Muratchaev S.S. Razrabotka algoritma marshrutizacii v decentralizovannyh samoorganizuyushchihsiya setyah MANET [Development of an algorithm of routing on the decentral self-organized MANET networks]. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki – Natural and technical science*, 2016, no.12 (102), pp. 232–243. (In Russian).
7. Marvin Mark M., Muthukumaran N. High throughput in MANET using relay algorithm and rebroadcast probability. *International Conference on Humming Bird*, 2014, pp. 66–71.
8. Learmonth G., Holliday J. NS3 simulation and analysis of MCCA: Multihop Clear Channel Assessment in 802.11 DCF // *Consumer Communications and Networking Conf. IEEE*, 2011, pp. 198–202.
9. Timoshenko A.G., Teplyakov I.M., Kuznecov V.S., Solodkov A.V. Metod obespecheniya energeticheskoy skrytnosti pri opredelenii koordinat celej [A method of support of energetic reserve in case of determination of coordinates of the purposes]. *Trudy MAI*, 2016, no. 91, pp. 20–22. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=75667> (accessed: 19.08.2017). (In Russian).
10. Halmosh P. *Konechnomernye vektornye prostranstva* [Finite-dimensional vector spaces]. Moscow, Fizmatlit Publ., 1963. 263 p. (In Russian).
11. Bakhtin A., Timoshenko A., Gridasov R., Volkov A., Lomovskaya K. Control traffic transmission period minimization for routing in resource constrained MANET. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)*, 2015, pp. 514–517.
12. Denis Dzh., Shnabel' R. *Chislennyye metody bezuslovnoy optimizacii i reshenie nelinejnyh uravnenij* [Numerical methods of unconditional optimization and solution of the non-linear equations ]. Moscow, Mir Publ., 1988. 440 p. (In Russian).
13. Mironov A.V., Muratchaev S.S. Razrabotka modeli seti MANET pri vzaimodejstvii gruppy robotov v kosmicheskom prostranstve. Pod red. Volkova A.S. [Development of model of the MANET network in case of interaction of group of robots in space. Under Volkov A.S. edition]. *Gagarinskie chteniya – 2017: XLIII Mezhdunarodnaya molodyozhnaya nauchnaya konferenciya: Sbornik tezisov dokladov – Moskva, Moskovskij aviacionnyj institut (nacional'nyj issledovatel'skij universitet)* [Gagarinsky readings – 2017: XLIII International youth scientific conference: The collection of theses of reports – Moscow, the Moscow aviation institute (the national research university)]. Moscow, 2017, p. 699. (In Russian).
14. Fubao Yang, Baolin Sun. Ad hoc on-demand distance vector multipath routing protocol with path selection entropy. *Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*, 2011.
15. Ramakrishnan M., Priya S. B. M., Shanmugavel S. Mathematical modeling of routing protocol selection for optimal performance of MANET. *Second International Conference on Computer and Network Technology*, 2010, pp. 217–221.

Submitted 21.08.2017; accepted 09.11.2017

**Volkov Alexey S.** – Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof. of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), leshvol@mail.ru

**Bakhtin Alexander A.** – Cand. Sci. (Eng.), head of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bah@miee.ru

**Mironov Alexey V.** – PhD student of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), bah@miee.ru

**Muratchaev Sultansaid S.** – PhD student of the Telecommunication Systems Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), said.muratchaev@gmail.com

**Zabolotny Anton S.** – Master's degree student of the Information Security Department, National Research University of Electronic Technology (Russia, 124498, Moscow, Zelenograd, Shokin sq., 1), anton.zabolonii@yandex.ru