



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-84-91>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.7, 621.391

ДВУХУРОВНЕВАЯ МОБИЛЬНАЯ САМООРГАНИЗУЮЩАЯСЯ СЕТЬ С КОМБИНИРОВАННЫМ РЕЖИМОМ РАБОТЫ

Т. В. ПОЛУЯН, В. Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15.04.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Предложен комбинированный метод построения и функционирования двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети, основанный на распределении узлов по транспортному уровню и уровню доступа с переводом их соответственно в одноранговый и инфраструктурный режимы работы. Метод отличается разделением источников нагрузки каждого транспортного узла на два домена коллизий по частоте, что позволяет повысить вероятность успешного случайного доступа к среде передачи. Это приводит к расширению полосы используемых частот в два раза, но уменьшает вероятность потерь кадров и повышает пропускную способность сети с сохранением возможности самоорганизации и масштабирования. Предложенный метод позволяет организовать двухуровневую мобильную самоорганизующуюся сеть с более высокой пропускной способностью по сравнению с одноуровневой, работающей в одноранговом режиме, при одинаковых полосе используемых частот и площади покрытия. Причем эффективность метода растет с увеличением количества узлов доступа, поскольку приводит к уменьшению числа транспортных узлов в канале передачи и вероятности потерь кадров данных.

Ключевые слова: мобильная самоорганизующаяся сеть, вероятность потерь кадров данных, пропускная способность канала передачи данных.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Полуян, Т. В. Двухуровневая мобильная самоорганизующаяся сеть с комбинированным режимом работы / Т. В. Полуян, В. Ю. Цветков // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 4. С. 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-84-91>.

TWO-LEVEL MOBILE SELF-ORGANIZING NETWORK WITH COMBINED OPERATION MODE

TATSIANA V. PALUYAN, VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15.04.2024

Abstract. A combined method for constructing and operating a two-level mobile self-organizing network is proposed, based on the distribution of nodes across the transport and access levels, transferring them to peer-to-peer and infrastructure operating modes, respectively. The method is distinguished by dividing the load sources of each transport node into two frequency collision domains, which increases the probability of successful random access to the transmission medium. This leads to a doubling of the used frequency band, but reduces the likelihood of frame loss and increases network throughput while maintaining the ability to self-organize and scale. The proposed method makes it possible to organize a two-level mobile self-organizing network with higher throughput

compared to a single-level one operating in peer-to-peer mode, with the same frequency band and coverage area. Moreover, the effectiveness of the proposed method increases with the increase in the number of access nodes, since it leads to a decrease in the number of transport nodes in the transmission channel and the probability of data frame loss.

Keywords: mobile self-organizing network, probability of data frame loss, data transmission channel capacity.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Paluyan T. V., Tsviatkou V. Yu. (2024) Two-Level Mobile Self-Organizing Network with Combined Operation Mode. *Doklady BGUIR*. 22 (4), 84–91. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-4-84-91> (in Russian).

Введение

Мобильные самоорганизующиеся сети (МСОС) – это сети без инфраструктуры, эффективные в условиях сложного развертывания и технического обслуживания (во время стихийных бедствий, военных операций, для обеспечения связи между мобильными устройствами в сложных условиях). В МСОС используются специальные стандарты связи и интеллектуальные технологии, способные масштабироваться на большое расстояние и количество узлов [1–4].

Современные МСОС работают в режиме Ad-Нос (одноранговый метод организации сети), позволяющем узлам связываться напрямую (точка к точке) без использования центрального узла, наличие которого характерно для инфраструктурного метода организации сети. Это упрощает процесс самоорганизации и повышает живучесть мобильной сети (отказ любого узла или произвольной группы узлов не приводит к отказу сети и компенсируется перестройкой маршрутов передачи данных) [1]. Однако с ростом интенсивности нагрузки и количества узлов, не только транслирующих данные соседних узлов, но также отправляющих и получающих собственные данные, быстро повышается вероятность потерь пакетов и падает пропускная способность сети. Известными подходами к уменьшению вероятности потерь пакетов в таких условиях являются повышение скорости передачи и разделение узлов на группы коллизий (в пространстве, по частоте или времени). В обоих случаях это приводит к росту сложности и (или) расширению полосы частот. Кроме того, во втором случае сеть теряет возможность самоорганизации, переходя в инфраструктурный режим. В этой связи исследование сочетания однорангового и инфраструктурного методов организации мобильной сети заслуживает внимания, поскольку позволяет повысить ее пропускную способность с сохранением возможности самоорганизации.

Цель исследований – повышение пропускной способности МСОС за счет комбинирования однорангового и инфраструктурного режимов работы.

Постановка задачи

Рассмотрим передачу кадров данных (канальный уровень модели OSI) через фрагмент МСОС в виде цепочки из N узлов (рис. 1, *a*), работающей в одноранговом режиме. Такая цепочка складывается в результате работы протоколов маршрутизации МСОС и состоит из $N-2$ перекрывающихся звеньев, включающих по три узла: центральный, принимающий и передающий данные от двух пограничных узлов.

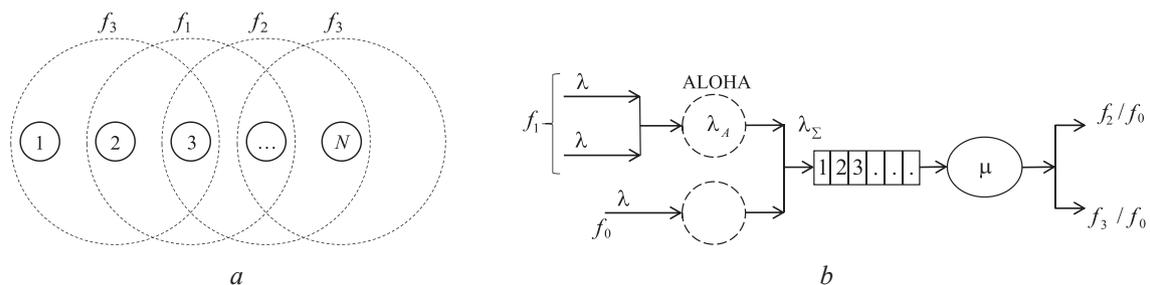


Рис. 1. Мобильные самоорганизующиеся сети в одноранговом режиме:

a – структура сети; *b* – функциональная схема узла

Fig. 1. Mobile self-organizing networks in peer-to-peer mode:

a – network structure; *b* – functional diagram of the unit

Предположим, что узлы МСОС имеют примерно одинаковые мощности передатчиков, чувствительности приемников и располагаются на примерно одинаковом расстоянии друг от друга таким образом, что непосредственная передача кадров данных между пограничными узлами в одном звене невозможна. Для лучшей энергетической развязки между звеньями МСОС вместо одночастотного может использоваться трехчастотный план, предполагающий прием центральным узлом и передачу левым и правым пограничными узлами одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, передачу центральным узлом и прием левым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, передачу центральным узлом и прием правым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, где i – порядковый номер узла.

Пусть все узлы МСОС формируют кадры данных на передачу независимо друг от друга, а вероятность передачи кадра в течение любого интервала времени описывается законом Пуассона. В таком случае к звену МСОС применима модель АЛОНА доступа к радиоканалу [5–8], позволяющая определить вероятность потерь кадров и пропускную способность звена сети исходя из известной интенсивности нагрузки λ и средней длительности кадров T . В качестве интенсивности нагрузки λ удобно использовать вероятность поступления кадра данных за интервал T , а в качестве этого интервала – единичную безразмерную величину.

Предположим также, что направления потоков кадров в МСОС случайны, каждый ее узел является источником и получателем собственных данных с интенсивностью λ на виртуальной частоте f_0 , имеет внутреннюю очередь с неограниченным количеством мест ожидания и процессор с достаточной производительностью μ для распределения без задержек по двум направлениям передачи $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}/f_0$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}/f_0$ кадров данных, принимаемых по направлениям $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, $f_{1+\text{mod}_3(i)}$ и f_0 . В таком случае каждый узел МСОС описывается функциональной моделью, приведенной на рис. 1, *b*, в которой потери кадров связаны только с доменом коллизий, описываемым моделью АЛОНА, а интенсивность λ_Σ суммарной нагрузки вычисляется с помощью выражения

$$\lambda_\Sigma = 1 - (1 - \lambda_A)(1 - \lambda) = \lambda((2 - \lambda)e^{-2\lambda}(1 - \lambda) + 1), \quad (1)$$

где λ_A – интенсивность нагрузки от домена коллизий, описываемого моделью АЛОНА, $\lambda_A = p_0(1 - (1 - \lambda)^2) = \lambda(2 - \lambda)e^{-2\lambda}$; p_0 – вероятность отсутствия коллизии в домене АЛОНА, $p_0 = e^{-2\lambda}$ [5].

С учетом случайного распределения направлений потоков кадров обслуживаемая процессором нагрузка λ_Σ распределяется равномерно по двум направлениям $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}/f_0$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}/f_0$ с интенсивностью $\frac{\lambda_\Sigma}{2} = \frac{\lambda((2 - \lambda)e^{-2\lambda}(1 - \lambda) + 1)}{2}$ по каждому из них. Причем из-за коллизий в домене АЛОНА $\lambda_\Sigma/2 < \lambda$. Следовательно, интенсивности нагрузки на одном входе (от источника) и выходе узла МСОС примерно совпадают, а вероятность P_N потерь кадров и пропускная способность S_N цепочки из N узлов (при условии, что первый узел цепочки является источником кадров, а последний – получателем) вычисляются с помощью выражений:

$$P_N = 1 - e^{-2(N-1)\lambda}; \quad (2)$$

$$S_N = \lambda e^{-2(N-1)\lambda}. \quad (3)$$

На рис. 2 приведены зависимости вероятности потерь кадров P_N и пропускной способности S_N канала передачи данных в МСОС, рассчитанные по выражениям (2) и (3), от интенсивности нагрузки, из которых следует, что даже при незначительном трафике коллизии приводят к быстрому росту потерь кадров и снижению пропускной способности сети. При повышении скорости передачи, например в два раза, $P_{2N} = 1 - e^{-(N-1)\lambda}$ и $S_{2N} = \lambda e^{-(N-1)\lambda}/2$, что приводит, как следует из рис. 2, к незначительному улучшению характеристик сети. Таким образом, для существенного повышения пропускной способности сети при сохранении возможности ее самоорганизации необходим более эффективный подход к уменьшению вероятности потерь кадров. Такой подход может быть реализован за счет разделения узлов на домены коллизий в локальном инфраструктурном режиме работы при использовании однорангового метода для организации сети в целом.

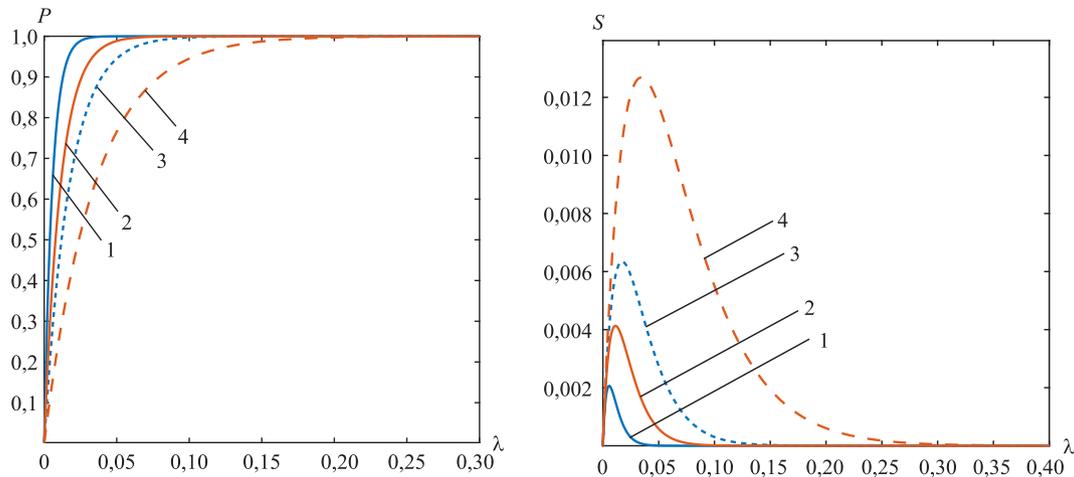


Рис. 2. Зависимость вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи мобильной самоорганизующейся сети в одноранговом режиме работы от интенсивности нагрузки:

1, 3 – P_N и S_N для 90 и 30 узлов соответственно; 2, 4 – P_{2N} и S_{2N} для 90 и 30 узлов

Fig. 2. Dependence of the probability of frame loss and transmission channel capacity of a mobile self-organizing network in peer-to-peer mode on load intensity:

1, 3 – P_N and S_N for 90 and 30 nodes, respectively; 2, 4 – P_{2N} and S_{2N} for 90 and 30 nodes

Комбинированный метод организации мобильной самоорганизующейся сети

Предлагается комбинированный метод организации двухуровневой МСОС, основанный на распределении узлов по двум уровням (транспортному и доступа) и на использовании соответственно двух режимов работы узлов: однорангового – на верхнем (транспортном) уровне сети и инфраструктурного – на ее нижнем уровне (уровне доступа). Сущность метода заключается в разделении источников нагрузки каждого транспортного узла на два домена коллизий (транспортный и доступа) по частоте, работающих в одноранговом и инфраструктурном режимах, для повышения вероятности успешного случайного доступа к среде передачи, что приводит к расширению полосы используемых частот в два раза, но позволяет уменьшить вероятность потерь кадров и повысить пропускную способность сети с сохранением возможности самоорганизации и масштабирования.

Для обеспечения самоорганизации мобильной сети в комбинированном режиме может использоваться двухчастотный план: одна частота – для транспортного уровня в одноранговом режиме, вторая частота – для уровня доступа в инфраструктурном режиме. С целью улучшения энергетической развязки между звеньями транспортного уровня и доменами коллизий на уровне доступа предлагается применять шестичастотный план, согласно которому узлы транспортного уровня используют трехчастотный план, предполагающий прием центральным узлом и передачу левым и правым пограничными узлами одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, передачу центральным узлом и прием левым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, передачу центральным узлом и прием правым пограничным узлом одного звена на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, где i – порядковый номер узла. Узлы уровня доступа также используют трехчастотный план, согласно которому узел уровня доступа выбирает частоту передачи и приема $f_{4+\text{mod}_3(i)}$, если он регистрирует передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$.

Для работы МСОС в комбинированном режиме предлагаются следующие правила самоорганизации.

1. Новый узел сети становится транспортным узлом, если он регистрирует передачу только на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$. В этом случае он переходит в одноранговый режим работы с формированием первого домена коллизий и выбирает для приема частоту $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, а для передачи – частоты $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ или $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$ (на одной из них принимает граничный транспортный узел, к которому подключается рассматриваемый новый узел).

2. Новый узел сети становится узлом доступа, если он регистрирует передачу на двух частотах: $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$. В этом случае он переходит в инфраструктурный режим работы и выбирает для передачи и приема частоту $f_{4+\text{mod}_3(i)}$. По такому же принципу меняются частоты при изменении пространственного положения узла.

3. Транспортный узел, работающий в одноранговом режиме и принимающий на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, переходит дополнительно в локальный инфраструктурный режим с формированием второго домена коллизий, если регистрирует передачу на частоте $f_{4+\text{mod}_3(i)}$.

4. Узел, который не регистрирует передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i)}$, $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$, $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, становится первым транспортным узлом сети, принимающим на частоте $f_{1+\text{mod}_3(i)}$ и передающим на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$.

5. Узел доступа, регистрирующий отсутствие передачи на частоте $f_{4+\text{mod}_3(i)}$ и передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, становится транспортным узлом, восстанавливая топологию сети при увеличении расстояния между транспортными узлами, что обеспечивает масштабирование сети.

Из предложенных правил самоорганизации следует, что транспортный домен коллизий МСОС в комбинированном режиме содержит не более двух источников, обеспечивая высокую пропускную способность транспортного уровня сети и защиту от перегрузок: узлы, регистрирующие передачу на частотах $f_{1+\text{mod}_3(i-1)}$ и $f_{1+\text{mod}_3(i+1)}$, в любом количестве становятся узлами доступа и переходят в инфраструктурный режим, занимая частоту $f_{4+\text{mod}_3(i)}$ для передачи и приема (рис. 3).

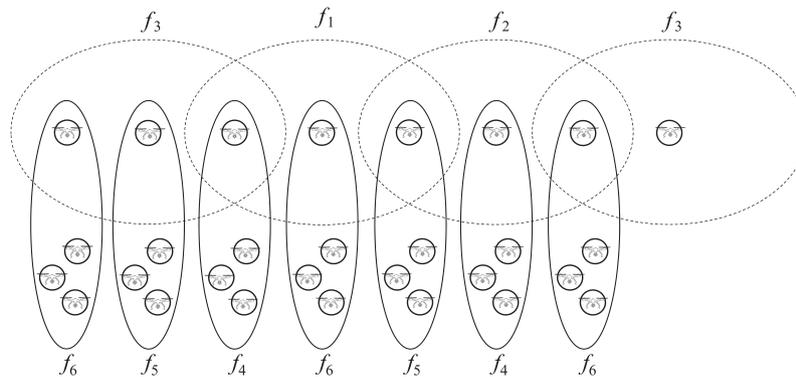


Рис. 3. Структура двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети в комбинированном режиме
Fig. 3. Structure of a two-level mobile self-organizing network in combined mode

Оба домена коллизий двухуровневой МСОС – транспортный и доступа – используют случайный доступ к среде передачи, что позволяет применять для их описания модель АЛОНА (рис. 4).

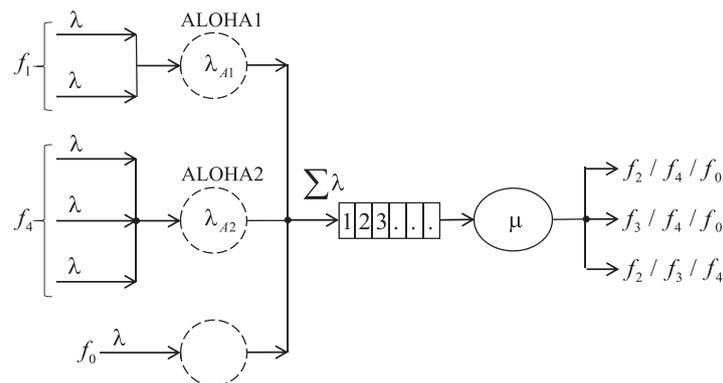


Рис. 4. Функциональная схема транспортного узла двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети
Fig. 4. Functional diagram of a transport node of a two-level mobile self-organizing network

При тех же предположениях, что были сделаны для МСОС в одноранговом режиме (рис. 1–2), интенсивности λ_{TA} и λ_{AA} нагрузки в транспортном домене и домене доступа определяются с помощью выражений:

$$\lambda_{TA} = p_{T0}(1 - (1 - \lambda)^2) = \lambda(2 - \lambda)e^{-2\lambda}; \quad (4)$$

$$\lambda_{AA} = p_{A0}(1 - (1 - \lambda)^m) = e^{-2(1 - \lambda)^{m-1}}(1 - (1 - \lambda)^m), \quad (5)$$

где p_{T0} – вероятность отсутствия коллизии в транспортном домене, $p_{T0} = e^{-2\lambda}$ [5]; p_{A0} – вероятность отсутствия коллизии в домене доступа, $p_{A0} = e^{-2\lambda_{AC}}$; $\lambda_{AC} = 1 - (1 - \lambda)^{m-1}$; m – количество узлов в домене доступа.

Если источником и получателем кадров данных являются первый и последний транспортные узлы фрагмента МСОС, то вероятность потерь кадров $P_{TN/m}$ и пропускная способность $S_{TN/m}$ цепочки из $N/(m+1)$ транспортных узлов вычисляются с помощью выражений:

$$P_{TN/m} = 1 - e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}; \quad (6)$$

$$S_{TN/m} = \lambda e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}. \quad (7)$$

Если источником и получателем кадров данных являются узлы доступа, входящие в домены коллизий первого и последнего транспортных узлов фрагмента МСОС, то вероятность потерь кадров $P_{AN/m}$ и пропускная способность $S_{AN/m}$ канала, образованного двумя узлами доступа и $N/(m+1)$ транспортными узлами, вычисляются по формулам:

$$P_{AN/m} = 1 - \left(e^{-2\lambda_{AC}}\right)^2 e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}; \quad (8)$$

$$S_{AN/m} = \lambda \left(e^{-2\lambda_{AC}}\right)^2 e^{-2\left(\frac{N}{m+1}-1\right)\lambda}. \quad (9)$$

Оценка эффективности методов организации мобильной самоорганизующейся сети

Произведена оценка вероятностей $P_N, P_{2N}, P_{TN/m}, P_{AN/m}$, потерь кадров и пропускной способности $S_N, S_{2N}, S_{TN/m}, S_{AN/m}$ канала передачи данных МСОС от интенсивности нагрузки в одноранговом, одноранговом с удвоенной скоростью передачи и комбинированном режимах работы при различных значениях N и m (рис. 5, 6). Из рис. 5, 6 следует, что предложенный комбинированный метод организации двухуровневой МСОС по сравнению с обычным одноранговым методом и одноранговым методом с удвоенной скоростью передачи обеспечивает меньшую вероятность потерь кадров в 1,61 и 1,57 раза при $N = 30, m = 9, \lambda = 0,13$; в 1,52 и 1,29 раза – при $N = 30, m = 2, \lambda = 0,06$; в 1,66 и 1,65 раза – при $N = 90, m = 9, \lambda = 0,05$; в 1,59 и 1,36 раза – при $N = 90, m = 2, \lambda = 0,02$ (для случая, когда источник и получатель данных являются узлами доступа). Пропускная способность канала передачи данных при этом увеличивается соответственно в 714 и 17 раз; в 12 и 2,1 раза; в 2927 и 34 раза; в 13,7 и 2,3 раза.

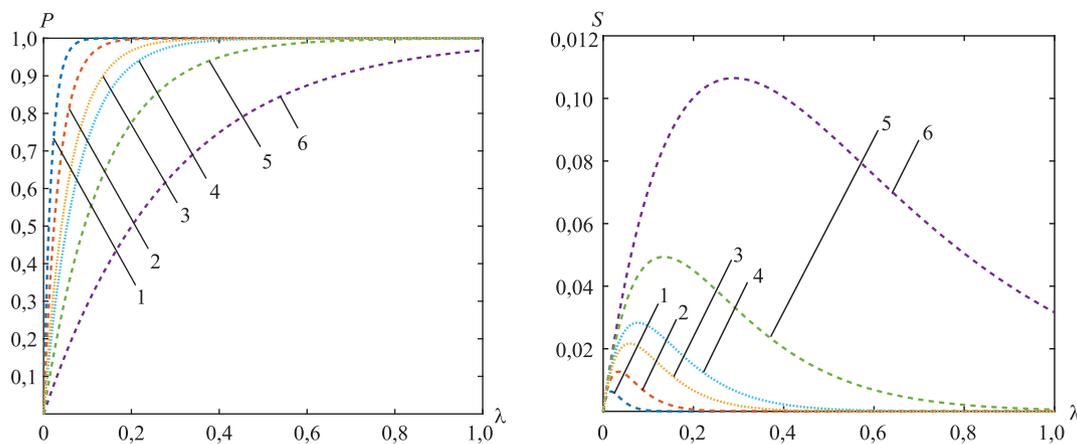


Рис. 5. Зависимость вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи мобильной самоорганизующейся сети от интенсивности нагрузки при $N = 30$:

1 – P_N, S_N ; 2 – P_{2N}, S_{2N} ; 3, 5 – $P_{AN/m}, S_{AN/m}$ при $m = 2$ и $m = 9$ соответственно;
4, 6 – $P_{TN/m}, S_{TN/m}$ при $m = 2$ и $m = 9$

Fig. 5. Dependence of the probability of frame loss and transmission channel capacity of a mobile self-organizing network on load intensity at $N = 30$: 1 – P_N, S_N ; 2 – P_{2N}, S_{2N} ; 3, 5 – $P_{AN/m}, S_{AN/m}$ for $m = 2$ and $m = 9$, respectively; 4, 6 – $P_{TN/m}, S_{TN/m}$ at $m = 2$ and $m = 9$

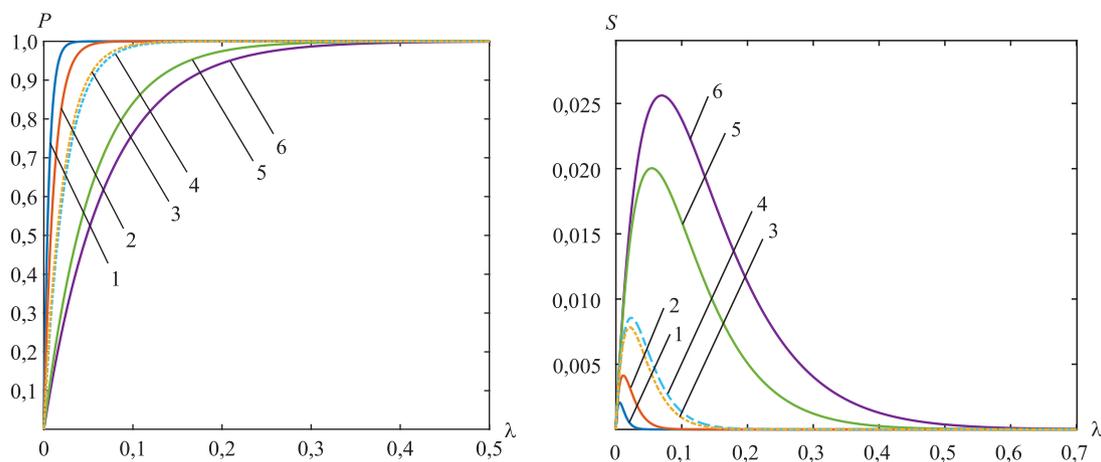


Рис. 6. Зависимость вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи мобильной самоорганизующейся сети от интенсивности нагрузки при $N = 90$: 1–6 – то же, что на рис. 5

Fig. 6. Dependence of the probability of frame loss and transmission channel capacity of a mobile self-organizing network on load intensity at $N = 90$: 1–6 – the same as in Fig. 5

Заключение

1. Установлено, что в мобильной самоорганизующейся сети с одноранговым режимом работы вероятность потерь кадров быстро растет с увеличением количества транспортных узлов в канале передачи данных между отправителем и получателем, что приводит к снижению его пропускной способности.

2. Разделение нагрузки на два частотных домена коллизий в соответствии с предложенным комбинированным методом организации двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети позволяет снизить вероятность потерь кадров, повысить пропускную способность канала передачи данных и является более эффективным подходом по сравнению с увеличением скорости передачи в методе одноранговой организации мобильной самоорганизующейся сети, также расширяющим полосу используемых частот. Причем эффективность предложенного метода растет с увеличением количества узлов доступа, поскольку приводит к уменьшению количества транспортных узлов в канале передачи данных.

3. Предложенный метод позволяет организовать двухуровневую мобильную самоорганизующуюся сеть с более высокой пропускной способностью по сравнению с одноуровневой мобильной самоорганизующейся сетью, работающей в одноранговом режиме, при одинаковых полосе используемых частот и площади покрытия.

Список литературы

1. Dynamic Channel Selections and Performance Analysis for High-Speed Train WiFi Network / F. Xuming [et al.] // International Workshop on High Mobility Wireless Communications. 2015. DOI: 10.1109/HMWC.2015.7353350.
2. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: IEEE Standard for Information Technology 802.11–2020. Date of access: 14.12.2016.
3. Hirioo, S. End-to-End Throughput and Delay Analysis for IEEE 802.11 String Topology Multi-Hop Network Using Markov-Chain Model / S. Hirioo, S. Kosuke, K. Nobuyoshi // IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. 2015. DOI: 10.1109/PIMRC.2015.7343572.
4. Jayalakshmi, V. Study of Clustering Schemes in Mobile Ad hoc Networks / V. Jayalakshmi, R. Sarumathi // 6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems. 2022. DOI: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788134.
5. Таненбаум, Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл; 5-е изд. СПб.: Питер, 2012.
6. Степанов, С. Н. Теория телеграфика: концепции, модели, приложения / С. Н. Степанов. М.: Горячая линия – Телеком, 2015.
7. Клейнрок, Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок; пер. с англ. Б. С. Цыбакова. М.: Мир, 1979.
8. Iversen, V. B. Teletraffic Engineering and Network Planning / V. B. Iversen. Denmark: DTU Fotonik, 2015.

References

1. Xuming F., Yawei Z., Yaxiong F., Yu W., Yuxin Z. (2015) Dynamic Channel Selections and Performance Analysis for High-Speed Train WiFi Network. *International Workshop on High Mobility Wireless Communications*. DOI: 10.1109/HMWC.2015.7353350.
2. *IEEE Standard for Information Technology 802.11–2020. Telecommunications and Information Exchange between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*. Accessed 14 December 2016.
3. Hirioo S., Kosuke S., Nobuyoshi K. (2015) End-to-End Throughput and Delay Analysis for IEEE 802.11 String Topology Multi-Hop Network Using Markov-Chain Model. *IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications*. DOI: 10.1109/PIMRC.2015.7343572.
4. Jayalakshmi V., Sarumathi R. (2022) Study of Clustering Schemes in Mobile Ad hoc Networks. *6th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems*. DOI: 10.1109/ICICCS53718.2022.9788134.
5. Tanenbaum E., Weatherall D. (2012) *Computer Networks*. Saint Petersburg, Peter Publ. (in Russian).
6. Stepanov S. N. (2015) *Theory of Teletraffic: Concepts, Models, Applications*. Moscow, Hotline – Telecom Publ. (in Russian).
7. Kleinrock L. (1979) *Computing Systems with Queues*. Moscow, Mir Publ. (in Russian).
8. Iversen V. B. (2015) *Teletraffic Engineering and Network Planning*. Denmark, DTU Fotonik Publ.

Вклад авторов

Полюян Т. В. разработала метод организации двухуровневой мобильной самоорганизующейся сети с комбинированным режимом работы, математическую модель описания вероятности потерь кадров и пропускной способности канала передачи данных, провела оценку эффективности методов организации мобильной самоорганизующейся сети.

Цветков В. Ю. определил направление и цель исследования, осуществил постановку задачи, выполнил интерпретацию полученных результатов.

Authors' contribution

Paluyan T. V. developed a method for organizing a two-level mobile self-organizing network with a combined operating mode, a mathematical model for describing the probability of frame loss and data transmission channel capacity, assessed the effectiveness of methods for organizing a mobile self-organizing network.

Tsviatkou V. Yu. determined the direction and purpose of the study, formulated the problem, and interpreted the results obtained.

Сведения об авторах

Полюян Т. В., асс. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Цветков В. Ю., д-р техн. наук, проф., зав. каф. инфокоммуникационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-04
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Information about the authors

Paluyan T. V., Assistant at the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Tsviatkou V. Yu., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-08
E-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich