

**L'vov Alexey Arlenovich** – e-mail: alvova@mail.ru; phone: +79172015675; the department of radioelectronics and telecommunications; dr. of eng. sc.; professor.

**Nikiforov Alexander Anatolievich** – e-mail: ieei\_director@mail.ru; phone: +79172182375; cand. of eng. sc.; Director of the Institute of Electronic Engineering and Instrumentation.

**Alalvan Amin Raad Jihad** – e-mail: ameenraad2@gmail.com.ru; phone: +79915003091; post-graduate student.

**Svetlov Michael Semenovich** – Institute of Precision Mechanics and Control of RAS; e-mail: svetlovms@yandex.ru; Saratov, Russia; phone: +79878263745; Laboratory of system problems of control and automation in mechanical engineering; dr. of eng. sc.; leading researcher.

УДК 004.7

DOI 10.18522/2311-3103-2021-5-60-68

**И.В. Родыгина, В.А. Новак****МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕСПРОВОДНОЙ MESH-СЕТЬ НА ОСНОВЕ СПЕЦИФИКАЦИИ ZigBee**

*В настоящее время наиболее распространенной технологией беспроводного доступа, которая повсеместно применяется для передачи большого количества трафика различного вида, является стандарт беспроводных локальных сетей IEEE 802.11. Одним из самых перспективных направлений развития технологии стали MESH-сети. MESH-сети предоставляют наиболее интересные решения, интегрирующие различные технологии беспроводного доступа. Возможность организации с помощью MESH-топологии локальных (LAN) и городских (MAN) сетей, легко интегрируемых в глобальные сети (WAN), является положительным фактором для применения на судне. В морской практике все чаще используют системы, основанные на оцифровке и автоматизации, объединенные в сети. В данной статье рассматривается моделирование взаимодействия устройств в MESH-сети на основе спецификации ZigBee, принцип работы канального уровня, который используется в этой сети, а также вариант метода предотвращения повышенного потребления энергии, используемой сети. Одним из преимуществ сети ZigBee является способность отслеживания участников сети и самой топологии в режиме их частых подключений, отключений и переключений. В этом случае необходимо произвести анализ скорости сети, надежности, пропускной способности. Для данной цели проведены оценка среднего времени ожидания на подключение узла, вероятность успешного подключения узла к сети, вероятность нахождения канала занятым при первом и втором зондировании несущей и тест пропускной способности рассматриваемой сети. Полученные результаты анализа свидетельствуют о работоспособности сети в различных ситуациях: как при обычных условиях, так и в сложной помеховой обстановке.*

*Беспроводная сеть; ZigBee; MESH-сеть; CSMA/CA.*

**I.V. Rodygina, V.A. Novak****SIMULATION OF WIRELESS MESH NETWORK BASED ON ZigBee SPECIFICATION**

*Currently, the most widespread wireless access technology, which is widely used to transmit a large amount of traffic of various types, is the IEEE 802.11 wireless LAN standard. MESH networks have become one of the most promising areas of technology development. MESH networks provide the most interesting solutions integrating various wireless access technologies. The possibility of organizing local (LAN) and metropolitan (MAN) networks using MESH topology, easily integrating into wide area networks (WAN), is a positive factor for use on a ship. In maritime practice, networks based on digitalization and automation are increasingly used. This article discusses modeling the interaction of devices in a MESH network based on the ZigBee specification, the principle of operation of the data link layer, which is used in this network, as well as a variant*

*of the method for preventing increased consumption of energy used by the network. One of the advantages of the ZigBee network is the ability to track network participants and the topology itself in the mode of their frequent connections, disconnections and reconnections. In this case, it is necessary to analyze the network speed, reliability, bandwidth. For this purpose, we estimated the average waiting time for connecting a node, the probability of a successful connection of a node to the network, the probability of finding a channel busy during the first and second probing of the carrier, and a test of the throughput of the network under consideration. The obtained results of the analysis indicate the operability of the network in various situations: both under normal conditions and in a difficult jamming environment.*

*WIRELESS network; ZigBee; MESH-network; CSMA/CA.*

**Введение.** MESH-сеть основана на контроллерах, которые осуществляют взаимодействие друг с другом и отличаются от обычных иерархических сетей или сетей типа звезда, где все взаимосвязи фиксированы. Это дает возможность обеспечить гибкость сети при добавлении новых контроллеров и устройств или при изменении конфигурации сетей, которые уже существуют [1]. MESH-сети могут интегрировать в себе различные сетевые и радиотехнологии. Особая актуальность MESH-сетей определяется развитием микроэлектроники, появлением множества различных устройств, способных работать автономно долгое время, имеющих особенность многократной смены режима и нуждающихся в обмене информацией со своим окружением, а возможно и с управляющим или информационным центром.

Протокол ZigBee – это международный открытый стандарт, контролируемый объединением ZigBee Alliance, который был создан на основе стандарта IEEE802.15.4 для пакетной беспроводной передачи данных. Он обеспечивает гибкие, расширяемые сетевые топологии, содержит встроенные функции для организации сетей и маршрутизации передаваемых данных. Он обеспечивает также простую установку и высокую устойчивость к сбоям, полноценные меры по безопасности, преодолевает традиционные ограничения маломощных беспроводных сетевых решений, такие как малая дальность и ограниченное покрытие, а также уязвимость к сбоям в узле и в радиолинии. Спецификация ZigBee является одной из наиболее популярных спецификаций, построенных по принципу ячеистой топологии MESH. Она реализует асинхронную низкоскоростную сеть передачи данных. ZigBee поддерживаются разнообразные конфигурации сети и устройства объединены по следующим топологиям: «точка – точка», «звезда», «кластерное дерево» и «многоячейковая MESH-сеть».

Обычно в MESH-сети узел ретранслирует или передает данные пока не достигается узел назначения. Такая сеть является мощной для маршрутизации данных и за счет этого при взаимодействии узлов между собой достигается равное распределение данных.

Преимуществом является надежность сети за счет избыточности маршрутов между устройствами. То есть в случае, если некоторые узлы отключатся, выйдут из строя или будут находиться в сложной помеховой обстановке, то работа сети не нарушится [2]. Еще одно из преимуществ MESH-сетей – независимость. Можно создать свою мобильную сеть передачи данных, которую никто не контролирует, и всё время оставаться на связи. Чем больше абонентов, тем плотнее и надёжнее сеть. Таким образом, можно всегда оставаться на связи в местах, где отсутствует сетевая инфраструктура. Главным недостатком сети является то, что спецификация подразумевает наличие каналов в диапазоне частот 2,4 ГГц, который также могут занимать устройства, работающие согласно стандарту IEEE802.11 (Wi-Fi), поэтому, учитывая, что ZigBee использует одноканальное решение, могут наблюдаться трудности в эффективной борьбе с помехами. Но надо учитывать, что пропускная способность ZigBee, по сравнению с тем же Wi-Fi, является достаточно низкой и максимально может достигать порядка 250 кбит/с.

Стандарт IEEE 802.15.4 реализует простой метод, позволяющий нескольким устройствам использовать один и то же частотный канал для передачи данных. Механизм доступа к каналу называется CSMA-CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance). CSMA/CA – класс протоколов доступа к среде передачи данных в беспроводных сетях (метод множественного доступа с обнаружением несущей и избеганием коллизий).

**Принцип работы протокола канального уровня.** Спецификация IEEE 802.15.4 описывает два режима работы сети: маячковый и без маяков. В режиме без маяков маршрутизаторы постоянно прослушивают эфир, потому нельзя построить сеть со сверхнизким энергопотреблением. В маячковом режиме все устройства с определённым периодом посылают в эфир специальные кадры, называемые маяками. Интервал между маяками (BI) включает в себя активный период, называемый суперфреймом, и неактивный период (рис. 1). В течение суперфрейма возможна передача кадров данных. Во время неактивного периода узлы засыпают.

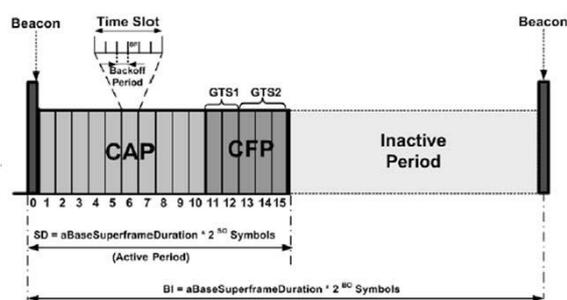


Рис. 1. Принцип работы сети в маячковом режиме

Интервал между маяками и длительность суперфрейма определяются параметрами Beacon Order (BO) и Superframe Order (SO) соответственно:

$$BI = aBaseSuperframeDuration * 2^{BO}, 0 \leq BO \leq 14. \quad (1)$$

$$SD = aBaseSuperframeDuration * 2^{SO}, 0 \leq SO \leq BO, \quad (2)$$

где  $aBaseSuperframeDuration$  обозначает минимальную длительность суперфрейма, соответствующую  $SO = 0$ . Эта величина фиксирована и равна 15.36 мс [IEEE Std. 802.15.4, 2003], 250 кбит/с в частотном диапазоне 2.4 ГГц.

Так же появляется вопрос о снижении энергопотребления. Ввиду этого отказ от идеи самоорганизации и централизация управления сетью приводит к отсутствию необходимости в собственном суперфрейме на конечных устройствах. Это снижает энергопотребление конечных устройств почти вдвое. Дальнейшая оптимизация связана с возможностью конечного устройства засыпать сразу же после родительского маяка, не слушая суперфрейм, при условии, что устройству не адресовано данных и у него нет данных для отправки. Эта оптимизация позволяет снизить энергопотребление ещё в 3–4 раза. Результаты теоретического расчёта приведены на рис. 2.

Из рисунка видно, что чем более быстрой является сеть, тем более эффективны оптимизации. Но при  $BO - SO \leq 1$  из формул (1) и (2) следует, что  $BI/SD \leq 2$ , и становится невозможно построить сеть с маршрутизаторами из-за проблемы скрытой станции. Поэтому имеет смысл рассматривать только сети с  $BO - SO = |SO=0| = BO \geq 2$ . В такой ситуации батареи маршрутизаторов будут разряжаться в 6–7 раз быст-

рее, чем батареи конечных устройств и время жизни всей сети будет определяться временем жизни маршрутизаторов. Чтобы этого избежать, предлагается следующий подход.

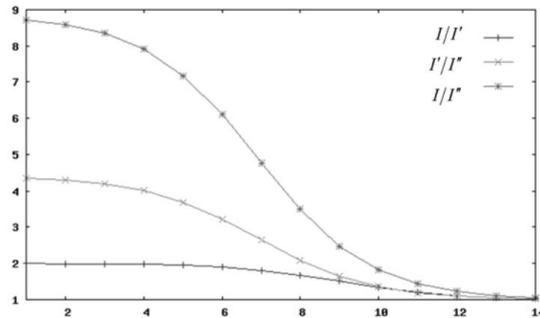


Рис. 2. Зависимость отношений средних сил токов от VO ( $I'$  – сила тока с учётом первой оптимизации,  $I''$  – с учётом обеих,  $I$  – без учёта оптимизаций)

Рассмотрим сеть, состоящую из  $N$  узлов. Обозначим через  $V = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$  множество узлов. Два узла, находящиеся в области прямой видимости друг друга, образуют ребро. Таким образом, мы получим граф смежности  $G = \{V, E\}$ . Для простоты считаем граф связанным и неориентированным. Узел  $a_0$  – координатор сети. Построим все связанные подграфы  $T_k$ ,  $k \in 1, K$  графа  $G$ , являющийся деревом с корневым элементом  $a_0$  и содержащий все вершины  $G$ .  $R_k$  – набор всех маршрутизаторов графа  $T_k$ . Если динамически менять роли узлов и перестраивать топологию сети, то можно приблизить время жизни сети ко времени жизни конечных устройств. Это увеличение времени жизни возможно за счёт того, что большую часть времени каждый из узлов будет находиться в роли конечного устройства. При этом наборы одновременно работающих маршрутизаторов циклически сменяют друг друга. Решения о перестроении топологии принимаются на координаторе сети.

Особенно важно для беспроводных сетей, где обнаружение столкновения альтернативного CSMA/CD является ненадежным из-за проблемы с скрытым узлом. CSMA/CA – это протокол, который работает на уровне канала передачи данных модели OSI. Перед передачей данных в «эфир», станция отправляет специальный фрейм, RTS (Ready To Send), который извещает остальных о том, что узел готов передать данные, а также предполагаемую продолжительность и узел назначения. Узел назначения отвечает фреймом CTS (Clear To Send), сообщая о готовности к приёму.

В данном методе, в любое время, когда устройству необходимо осуществить передачу, оно сначала выполняет оценку канала на занятость (Clear Channel Assessment, CCA), чтобы убедиться, что канал не используется кем-либо другим, а только после этого начинает передачу своего собственного сигнала. Когда устройство планирует передать сигнал, оно сначала переходит в режим приема для обнаружения и оценки уровня энергии сигнала (EnergyDetection, ED) в желаемом канале. При проведении процедуры ED приемник не пытается декодировать сам сигнал, а лишь проводит оценку уровня его энергии. Если сигнал уже есть в интересующей полосе, то ED не определяет, является ли это сигналом стандарта IEEE 802.15.4 [3].

Альтернативным способом определения доступности канала является оценка несущей (Carrier Sense, CS). В CS, в отличие от ED, производится декодирование сигнала и сравнение преамбулы на принадлежность стандарту IEEE 802.15.4.

В случае соответствия устройство считает канал занятым, даже если энергия сигнала ниже определенного порога, и отключается на произвольный период времени, а затем повторяет попытку (заданное количество раз). Попытки повторяются до тех пор, пока канал не станет свободным или не будет достигнуто их максимально возможное число.

Изменения структуры в рассматриваемой системе могут происходить по различным причинам. Например, подключение новых узлов, которые могут отключаться или повторно присоединяться, но уже в другом месте (при осуществлении перезагрузки устройства).

Одним из преимуществ сети ZigBee является способность отслеживания участников сети и самой топологии в режиме их частых подключений, отключений и переподключений. В таком случае необходимо произвести анализ скорости сети, надежности, пропускной способности. Для данной цели использована среда разработки MATLAB (версия 2020).

Рассмотрим основные исходные параметры анализируемой сети:

- ◆ количество узлов – 10;
- ◆ скорость передачи данных – 19,2 кбит/с;
- ◆ размер данных в кадре MAC – 800 бит;
- ◆ мощность передатчика – 5 дБм;
- ◆ отношение  $E_b/N_0$  – 15 дБ;
- ◆ полоса пропускания – 30 кГц;
- ◆ максимальное число попыток обработки подключения к каналу алгоритмом CSMA-CA перед объявлением сбой доступа (`macMaxCSMABackoffs`) -4;
- ◆ максимальное количество попыток повторного подключения к каналу, разрешенных после неудачной попытки подключения (`macMaxFrameRetries`) -3.

В первую очередь проведена оценка среднего времени ожидания на подключение узла.

Соответствующий график продемонстрирован на рис. 3.

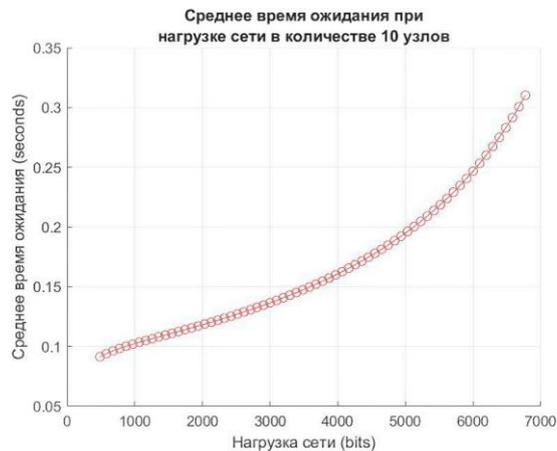


Рис. 3. Зависимость среднего времени ожидания от нагрузки в канале

Исходя из полученной зависимости можно наблюдать, что время ожидания на подключение узла растет в зависимости от нагрузки. Стоит заметить, что даже при большой загруженности сети не возникает длительных ожиданий и устройства могут достаточно быстро инициировать подключение к сети или передачу данных.

Далее следует рассмотреть надежность сети при различных нагрузках. Для оценки надежности используется величина, отображающую вероятность успешного подключения узла к сети. Полученный график проиллюстрирован на рис. 4.

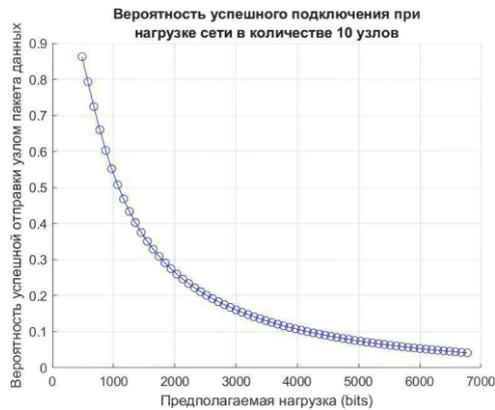


Рис. 4. Вероятность успешного подключения к сети

В данной ситуации можем наблюдать, что вероятность успешного подключения узла имеет экспоненциальный характер, что соответствует нормальному закону распределения случайной величины, и уменьшается при нагрузке сети.

Затем проведем анализ занятости каналов. Для оценки будем использовать вероятность нахождения канала занятым во время первого зондирования несущей (Alpha) и во время второго зондирования несущей (Beta). Данные зависимости отображены на рис. 5.

Расчеты вероятностей Alpha и Beta выполнены на основе цепей Маркова [5]. Модель принимает сценарий N станций, пытающихся связаться с приемником. Вероятность того, что узел попытается первым зондированием несущей передать кадр, вероятность того, что узел найдет канал занятым во время первого зондирования и вероятность того, что узел найдет канал занятым во время второго зондирования, обозначаются переменными  $\tau$ ,  $\alpha$  и  $\beta$ . Эти три вероятности связаны системой из трех нелинейных уравнений, которая возникает из нахождения стационарных вероятностей варианта цепи Маркова.

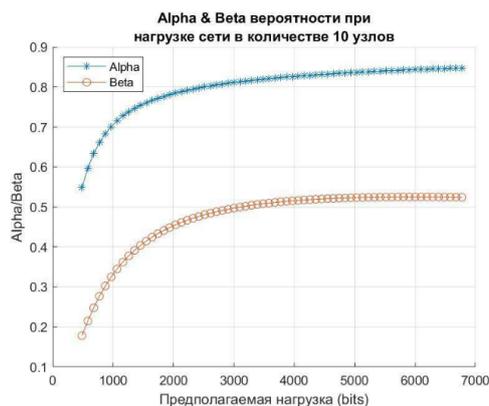


Рис. 5. Вероятность нахождения канала занятым при первом и втором зондировании несущей

Далее проведен тест пропускной способности рассматриваемой сети.

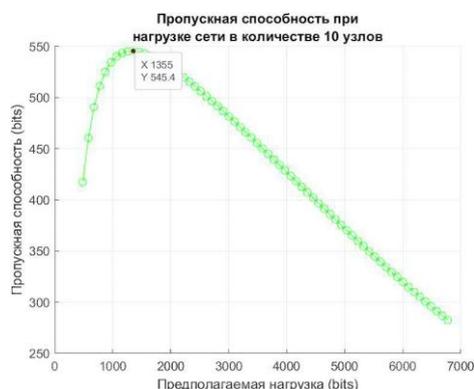


Рис. 6. Зависимость пропускной способности от нагрузки сети

Анализируя данный график, можно заметить, что пропускная способность начинает снижаться уже при нагрузке сети в 1355 бит. Конечно, данная оптимальная величина пропускной способности получена в конкретной моделируемой ситуации, рассматриваемой в данной статье, и может меняться в ту или иную сторону. Это обуславливается асинхронностью сети ячеистой топологии, так как узлы инициируют передачу данных независимо друг от друга, а соответственно эти моменты могут совпасть. Также стоит учитывать, что на пропускную способность оказывает влияние и помеховая обстановка – в частотной полосе диапазона 2,4 ГГц могут передаваться сигналы других сетей, например, Wi-Fi.

**Заключение.** В ходе проделанной работы было проведено моделирование работы данного метода взаимодействия устройств в сети на основе спецификации ZigBee. Полученные результаты свидетельствуют о работоспособности сети в различных ситуациях: как при обычных условиях, так и в сложной помеховой обстановке. Причем, даже при нагрузке сети десятью источниками передачи данных, она сохраняет работоспособность, но с большим ожиданием подключения и меньшей полосой пропускания, что является несомненным достоинством.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вихляева В.В.* Динамическая децентрализованная энергонезависимая беспроводная сеть использованием Mesh-сети на судне // Вестник магистратуры / под общ. ред. Е.А. Мурзина. – 2019. – № 4-1 (91). – С. 26-27.
2. *Лисничук А.А.* Процедура многокритериального синтеза сигналов с прямым расширением спектра для адаптации когнитивных радиосистем передачи информации к сложной помеховой обстановке // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2018. – № 4. – Вып. 66. – Ч. 1. – С. 9-15.
3. IEEE Std 802.15.4-2015, September, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, 2007.
4. *Ильиныха Н., Борисов А.П.* Ячеистая топология сети Zigbee // Современные технологии в мировом научном пространстве: Сб. статей. – Уфа, 2017. – С. 78-80.
5. *Park P., Di Marco P., Soldati P., Fischione C., Johansson K.H.* A Generalized Markov Chain Model for Effective Analysis of Slotted IEEE 802.15.4 // Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE 6<sup>th</sup> International Conference, Macau, 2013. – P. 130-139.
6. *Попков Г.В.* Mesh-сети: перспективы развития, возможные применения // Вычислительные и сетевые ресурсы. – Новосибирск, 2012. – С. 74-79.
7. *Вишневецкий В.В., Портной С.Л., Шахнович И.В.* Энциклопедия Wi-Max. Путь к 4G. – Техносфера, 2010.

8. Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. Санкт-Петербург, 2016. – 992 с.
9. Плужников А.А. Маршрутизация в беспроводных Ad-hoc сетях, основанная на топологических свойствах сети // Методы и устройства передачи и обработки информации. – 2015. – С. 164-169.
10. Hongwei Li, Zhongning Jia; Xiaofeng Xue. Application and Analysis of ZigBee Security Services Specification // Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, China, 2010.
11. Muthu Ramya C., Shanmugaraj M., Prabakaran R. Study on ZigBee technology // 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, India, 2011.
12. Шаблюй Г.Ф., Анишко О.Б. Обеспечение экологической безопасности от потенциально опасных судов с использованием системы мониторинга судоходства // Системы управления и обработки информации. – 2015. – С. 92-94.
13. Мудров А.А., Кемайкин В.К. Методика обработки отраженного радиолокационного сигнала в интересах распознавания цели типа квадрокоптер // Всероссийская научно-практическая конференция ТвГТУ, 2019. – С. 78-80.
14. Безопасность сетей 802.11 – основные угрозы. Хабр. 2012. – URL: <https://habr.com/ru/post/151126/> (дата обращения: 05.03.2021).
15. Стандарт IEEE 802.15.4z. Хабр. 2019. – URL: <https://habr.com/ru/post/457876/> (дата обращения: 6.03.2021).
16. Яхив И.Д. Клиент-серверная система на основе беспроводной сети стандарта IEEE 802.15.4 // Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики». – 2014. – С. 1-21.
17. Протоколы бывают разные... ВАСnet. 2017. – URL: [http://www.bacnet.ru/knowledge-base/articles/index.php?ELEMENT\\_ID=746](http://www.bacnet.ru/knowledge-base/articles/index.php?ELEMENT_ID=746) (дата обращения: 19.02.2021).
18. Жуков М.О., Иванов А.Е., Меркулов И.В., Нарымский Б.В. Использование сетей стандарта IEEE 802.15.4/ZigBee в системах шахтной автоматизации // Информационные технологии в управлении техническими системами и технологическими процессами. – 2012. – С. 42-46.
19. Зацепин Э.С. Характеристики протоколов в mesh-сетях // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2015. – № 1. – С. 11-11.
20. Pysarenko V., Gulchak O., Pisarenko J. Technology for Improve the Safety of Ships from Methane Emissions Using UAVs // International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC). – 2020.

#### REFERENCES

1. Vikhlyayeva V.V. Dinamicheskaya detsentralizovannaya energonezavisimaya besprovodnaya set' ispol'zovaniem Mesh-seti na sudne [Dynamic decentralized non-volatile wireless network using Mesh on the ship], *Vestnik magistratury* [Bulletin of the graduate], ed. by E.A. Murzina, 2019, No. 4-1 (91), pp. 26-27.
2. Lisnichuk A.A. Protsedura mnogokriterial'nogo sinteza signalov s pryamym rasshireniem spektra dlya adaptatsii kognitivnykh radiosistem peredachi informatsii k slozhnoy pomekhovoy obstanovke [The procedure of multicriteria synthesis of signals with direct spectrum expansion for the adaptation of cognitive radio systems of information transmission to a complex interference environment], *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Ryazan State Radio Engineering University], 2018, No. 4, Issue 66, Part 1, pp. 9-15.
3. IEEE Std 802.15.4-2015, September, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs), IEEE, 2015.
4. P'inykha N., Borisov A.P. Yacheistaya topologiya seti Zigbee [Zigbee Mesh Network Topology], *Sovremennye tekhnologii v mirovom nauchnom prostranstve: Sb. statey* [Modern technologies in the world scientific space: Collection of articles]. Ufa, 2017, pp. 78-80.
5. Park P., Di Marco P., Soldati P., Fischione C., Johansson K.H. A Generalized Markov Chain Model for Effective Analysis of Slotted IEEE 802.15.4, *Mobile Adhoc and Sensor Systems, IEEE 6<sup>th</sup> International Conference, Macau, 2013*, pp. 130-139.
6. Popkov G.V. Mesh-seti: perspektivy razvitiya, vozmozhnye primeneniya [Mesh networks: development prospects, possible applications], *Vychislitel'nye i setevye resursy* [Computing and network resources]. Novosibirsk, 2012, pp. 74-79.

7. *Vishnevskiy V.V., Portnoy S.L., Shakhnovich I.V.* Entsiklopediya Wi-Max. Put' k 4G [Wi-Max Encyclopedia. The path to 4G]. Tekhnosfera, 2010.
8. *Olifer V.G., Olifer N.A.* Komp'yuternye seti. Printsipy, tekhnologii, protokoly [Computer networks. Principles, technologies, protocols]. Sankt-Peterburg, 2016, 992 p.
9. *Pluzhnikov A.A.* Marshrutizatsiya v besprovodnykh Ad-hoc setyakh, osnovannaya na topologicheskikh svoystvakh seti [Routing in wireless Ad-hoc networks based on network topological properties], *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii* [Methods and devices for transmitting and processing information], 2015, pp. 164-169.
10. *Hongwei Li, Zhongning Jia; Xiaofeng Xue.* Application and Analysis of ZigBee Security Services Specification, *Second International Conference on Networks Security, Wireless Communications and Trusted Computing, China, 2010.*
11. *Muthu Ramya C., Shanmugaraj M., Prabakaran R.* Study on ZigBee technology, *3rd International Conference on Electronics Computer Technology, India, 2011.*
12. *Shabliy G.F., Anipko O.B.* Obespechenie ekologicheskoy bezopasnosti ot potentsial'no opasnykh sudov s ispol'zovaniem sistemy monitoringa sudokhodstva [Ensuring environmental safety from potentially dangerous vessels using the navigation monitoring system], *Sistemy upravleniya i obrabotki informatsii* [Information management and processing systems], 2015, pp. 92-94.
13. *Mudrov A.A., Kemaykin V.K.* Metodika obrabotki otrazhennogo radiolokatsionnogo signala v interesakh raspoznavaniya tseli tipa kvadrokopter [The technique of processing the reflected radar signal in the interests of recognizing a quadrocopter-type target], *Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya TvGTU* [All-Russian Scientific and Practical Conference of TvSTU, 2019], pp. 78-80.
14. Bezopasnost' setey 802.11 – osnovnye ugrozy. Khabr. 2012 [The security of 802.11 networks are the main threats. Habr. 2012]. Available at: <https://habr.com/ru/post/151126/> (accessed 05 March 2021).
15. Standart IEEE 802.15.4z. Khabr. 2019 [IEEE 802.15.4z standard. Habr. 2019]. Available at: <https://habr.com/ru/post/457876/> (accessed 06 March 2021).
16. *Yakhiev I.D.* Klient-servernaya sistema na osnove besprovodnoy seti standarta IEEE 802.15.4 [Client-server system based on IEEE 802.15.4 wireless network], *Natsional'nyy issledovatel'skiy universitet «Vysshaya shkola ekonomiki»* [National Research University Higher School of Economics], 2014, pp. 1-21.
17. Protokoly byvayut raznye... BACnet. 2017 [Protocols are different... BACnet. 2017]. Available at: [http://www.bacnet.ru/knowledge-base/articles/index.php?ELEMENT\\_ID=746](http://www.bacnet.ru/knowledge-base/articles/index.php?ELEMENT_ID=746) (accessed 19 February 2021).
18. *Zhukov M.O., Ivanov A.E., Merkulov I.V., Narymskiy B.V.* Ispol'zovanie setey standarta IEEE 802.15.4/ZigBee v sistemakh shakhtnoy avtomatizatsii [The use of IEEE 802.15.4/ZigBee standard networks in mine automation systems], *Informatsionnye tekhnologii v upravlenii tekhnicheskimi sistemami i tekhnologicheskimi protsessami* [Information technologies in the management of technical systems and technological processes], 2012, pp. 42-46.
19. *Zatsepin E.S.* Kharakteristiki protokolov v mesh-setyakh [Characteristics of protocols in mesh networks], *Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii* [Modeling, optimization and information technology], 2015, No. 1, pp. 11-11.
20. *Pysarenko V., Gulchak O., Pisarenko J.* Technology for Improve the Safety of Ships from Methane Emissions Using UAVs, *International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*. 2020.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н., доцент А.А. Полупанов.

**Родыгина Ирина Владимировна** – Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова; e-mail: [habarova@mail.ru](mailto:habarova@mail.ru); г. Новороссийск, Россия; тел.: +79282284417; кафедра радиоэлектроники и информационных технологий; к.т.н.; доцент.

**Новак Вадим Александрович** – e-mail: [Vadim05580@mail.ru](mailto:Vadim05580@mail.ru); тел.: +79180558085; магистрант.

**Rodygina Irina Vladimirovna** – Admiral Ushakov Maritime State University; e-mail: [habarova@gmail.ru](mailto:habarova@gmail.ru), Novorossiysk, Russia; phone: +79282284417; the department of radioelectronics and information technologies; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Novak Vadim Alexandrovich** – e-mail: [Vadim05580@mail.ru](mailto:Vadim05580@mail.ru); phone: +79180558085; master's student.