

ПОМЕХОУСТОЙЧИВЫЙ СЕТЕВОЙ УРОВЕНЬ СТЕКА ПРОТОКОЛОВ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕНСОРНОЙ СЕТИ ДРЕВОВИДНОЙ ТОПОЛОГИИ

А.А. Макашов
М.Н. Терентьев

a.makashov@gmail.com
m-te@yandex.ru

МАИ, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Представлен сетевой уровень стека протоколов беспроводных сенсорных сетей. Стек позволяет реализовать беспроводные сенсорные сети древовидной топологии, которые могут функционировать в условиях помех. Сформулированы требования, предъявляемые к сетевому уровню, предложено развитие механизма *keep-alive*, на основе которого строится подсистема восстановления сети. Представлены функциональная схема предлагаемого сетевого уровня и его имитационная модель, созданная на основе симулятора *ns-3*. Описана модель помех. С использованием имитационного моделирования оценено влияние помех на работу сети, продемонстрирована эффективность предложенного сетевого уровня стека протоколов беспроводных сенсорных сетей с механизмом восстановления сети в условиях воздействия помех

Ключевые слова

Беспроводная сенсорная сеть, надежность, восстановление сети, древовидная топология, помехоустойчивость, keep-alive

Поступила 19.09.2019

Принята 15.10.2020

© Автор(ы), 2021

Исследование выполнено в рамках научного проекта при финансовой поддержке РФФИ (проект РФФИ № 17-08-01641а)

Введение. Концепция интернета вещей, включающая в себя такие понятия, как «умный дом», «умный завод», «умный город», получила широкое распространение в настоящее время. Основной смысл этой концепции заключается в том, что различные устройства объединяются в сеть для эффективного взаимодействия между собой и пользователем [1].

В рамках указанной концепции возникают задачи мониторинга определенного объекта для измерения нескольких параметров и передачи результатов этих измерений на обработку [2]. Для решения этих задач используют беспроводные сенсорные сети (БСС). Беспроводная сенсорная сеть состоит из множества узлов, которые в общем случае включают в себя процессор, датчики и приемник-передатчик радиосигналов.

В настоящей работе для БСС используется четырехуровневая модель стека протоколов, состоящая из физического, канального, сетевого и прикладного уровней [3]. Физический и канальный уровни для БСС регламентируются стандартом IEEE 802.15.4 [4]. Модель этих уровней также должна соответствовать указанному стандарту, включая параметры, протоколы передачи данных и т. д. Сетевой и прикладной уровни не регламентируются стандартом, для них должна быть создана собственная модель, отвечающая решаемой задаче.

В реальности узлы БСС зачастую вынуждены функционировать в условиях наличия помех, которые могут влиять на доступность маршрутов передачи данных, а следовательно, и на качество работы всей сети. Такие помехи необходимо учитывать при моделировании, а сеть должна адаптироваться к появлению помех, перестраивая маршруты передачи данных.

Поставлена задача разработки сетевого уровня стека протоколов для БСС, решающего задачу мониторинга и отвечающего требованиям:

- 1) способность к самоорганизации — формирование и восстановление сети должно осуществляться без получения команд извне [5, 6];
- 2) помехоустойчивость — сеть должна обеспечивать сохранение работоспособности и восстановление маршрутов передачи в условиях помех;
- 3) древовидная топология — требует минимальное число вспомогательных сообщений [7].

Механизм *keep-alive*. Естественным способом проверки качества соединения между любыми двумя узлами является отправка вспомогательных тестовых сообщений. Такой способ проверки называется механизмом *keep-alive*. Этот механизм используется в протоколе TCP для определения прерванных соединений и заключается в периодической отправке сообщений на другую сторону соединения, когда оно бездействует [8]. Для протокола TCP такой механизм не является обязательным и не входит в стандарт по некоторым причинам. Механизм *keep-alive* применяется в TCP в случаях, когда приложение может потреблять лишние ресурсы при нарушении соединения.

Протокол маршрутизации для симулятора ns-3 представлен в [9]. Сообщения *keep-alive* в нем используются для поддержания связности маршрутизаторов. Этот протокол разработан для проводных сетей, поэтому не применим к БСС.

Протокол управления БСС, в котором применяется механизм *keep-alive*, описан в [10]. Сеть по такому протоколу имеет ячеистую топологию с разделением на кластеры. Сеть содержит центральный управляющий

узел и главные узлы кластера. Центральный узел имеет информацию о топологии сети. Если главный узел кластера не получает от измерителя сообщений в течение долгого времени, он запускает таймеры по соседям проблемного. Если соседи слышат этот узел, таймер сбрасывается.

Беспроводные сенсорные сети, используемые для систем «умный дом», описаны в [11]. Надежность таких сетей обеспечивается с помощью варианта механизма *keep-alive*. Сначала сервер инициирует отправку запросов *keep-alive*, сформировав предварительно таблицу узлов-получателей. Сервер инициирует проверку, отсылая запрос *keep-alive* предопределенному ранее узлу, при этом запускает таймер. Узел, получивший запрос, отправляет его далее следующим узлам по очереди, определяемой из сформированной сервером таблицы. Так происходит до тех пор, пока запросы не дойдут до последних узлов, определенных в таблице. Далее эти узлы отправляют запросы обратно серверу, используя предопределенную переменную «следующий сосед». Шаги, которые проходят запросы, сохраняются в новой таблице. Получив запрос обратно, сервер сравнивает новую таблицу с сохраненной исходной. Если они не совпадают, а также если время ожидания истекло, текущая проверка считается проваленной. В таком случае могут быть приняты действия по подтверждению или устранению ошибки.

Такой алгоритм применим к БСС древовидной топологии, но имеет недостатки. При наличии в сети большого числа узлов информация о состоянии сети может занимать очень большой объем, что нежелательно с учетом ограниченности ресурсов узлов сети. При наличии помех, в том числе и непостоянных, алгоритм будет недостаточно оперативно реагировать на потерю связи с узлами. Нахождение ошибки не приводит к немедленному ее устранению (для чего требуются дополнительные действия), а значит, время, за которое сеть перестроится, будет значительным, что существенно снижает ее надежность.

Краткий обзор применения механизма *keep-alive* показывает его возможности по обнаружению и парированию проблем связности сети. Однако этот механизм должен быть доработан с учетом ограниченности ресурсов БСС.

Функциональное описание сетевого уровня. Рассмотрим общую функциональную схему предлагаемого сетевого уровня. Его можно условно подразделить на следующие подсистемы (рис. 1):

- 1) подсистема связи с канальным уровнем — отвечает за получение пакета данных от канального уровня стека протоколов, а также за передачу пакета данных на этот уровень;

2) подсистема связи с прикладным уровнем — отвечает за прием пакета от прикладного уровня и передачу на прикладной уровень информации о пакете с полезными данными, предназначенными данному узлу;

3) подсистема отправки сообщений — отвечает за формирование данных для передачи на нижний уровень, заполнение заголовков сетевого уровня;

4) подсистема приема сообщений — отвечает за обработку входящих сообщений от нижнего уровня, анализ заголовка сетевого уровня и перенаправление сообщения на обработку соответствующей подсистеме;

5) подсистема назначения адресов и маршрутизации — определяет адрес следующего в маршруте узла, которому необходимо передать данное сообщение;

6) подсистема формирования и восстановления сети — отвечает за планирование рассылки приглашений на подключение к сети и запросов *keep-alive*, формирование перечисленных сообщений, планирование событий по проверке счетчиков, а также принимает меры по восстановлению работоспособности в случае обнаружения ошибки.



Рис. 1. Взаимодействие подсистем сетевого уровня

Рассмотрим две последние подсистемы подробнее.

Подсистема назначения адресов и маршрутизации. В рассматриваемой подсистеме используется схема назначения логических адресов, при которой адрес каждого узла зависит от адреса родителя [12]. Преимущества такой схемы в том, что все маршруты однозначно определены, а процесс поиска адреса следующего узла в маршруте требует минимального объема элементарных вычислений. Для передачи сообщений не требуются никакие вспомогательные команды, что существенно снижает уровень трафика в сети.

Адреса узлам назначаются следующим образом: координатор (шлюз) имеет логический адрес «0». Адрес A_c узла, который является потомком узла A , определяется по формуле:

$$A_c = Am + k, \quad k = 1, m,$$

где m — предельное число непосредственных потомков каждого узла сети; k — номер потомка в пределах множества адресов родителя.

В общем случае маршрут в дереве состоит из восходящей и нисходящей ветвей. В каждом случае адрес следующего узла в маршруте можно определить с помощью вычисления адресов родителей для узлов, через которые проходит маршрут. Пусть имеем узел с адресом A , тогда адрес A_p родителя узла A будет определяться по формуле:

$$A_p = \left[\frac{A-1}{m} \right].$$

Здесь операция $[\]$ обозначает взятие целой части числа.

Подсистема формирования и восстановления сети. Формирование сети и ее восстановление после повреждения ранее найденных маршрутов вследствие влияния помех осуществляется автоматически путем периодической рассылки широковещательных приветствий. Приветствия трактуются узлом по-разному в зависимости от того, подключен ли этот узел к сети. Приветствия рассылаются один раз в течение интервала длительностью $t_{inv} = t_{base} + t_{rand}$, где t_{base} — опорная величина; $t_{rand} \sim U(0, b)$ — равномерно распределенная случайная составляющая, сокращающая вероятность одновременной рассылки служебных сообщений несколькими узлами, b — верхняя граница случайной составляющей.

Не подключенные к сети узлы воспринимают приветствие как приглашение на подключение и отправляют в ответ запрос на получение данных для подключения. В свою очередь, подключенный узел отправляет данные для подключения (назначаемый узлу логический адрес, собственный адрес и идентификатор сети) неподключенному узлу (рис. 2). После

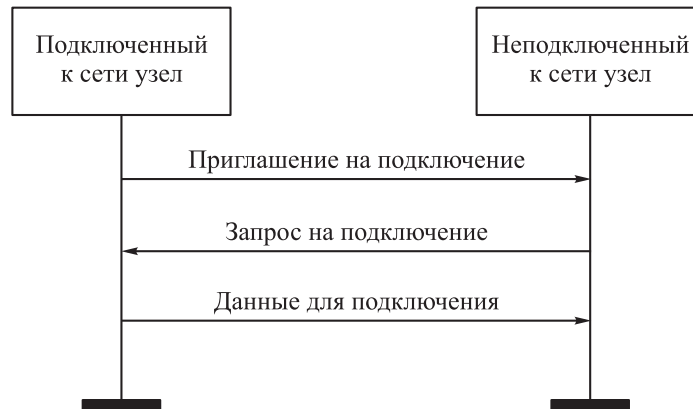


Рис. 2. Схема подключения узла к сети

сохранения полученных данных новый узел считает себя подключенным к сети и по прошествии интервала t_{inv} отправляет уже собственное приветствие.

Подключенные к сети узлы (прямые потомки отправителя) воспринимают приветствие как запрос *keep-alive*. При получении такого запроса узел увеличивает счетчик *keep-alive* для своего родителя, после чего отвечает на него. При получении ответа узел-родитель увеличивает соответствующий счетчик для потомка. После обработки приветствия узлы ретранслируют его дальше. Подключенные к сети узлы, не являющиеся прямыми потомками отправителя, приветствие игнорируют.

По истечении интервала проверки счетчиков (обозначим его t_{KA}) проверяются их значения для всех соседних узлов, родителя и непосредственных потомков. Если значение счетчика оказывается равным нулю, то узел является нерабочим.

Если узел не слышит от своего родителя ответ в течение интервала t_{KA} , то он отключается от сети и ожидает новых приглашений. Если родитель в течение интервала t_{KA} не слышит ответа от потомка, он исключает его из списка потомков и освобождает адрес для новых узлов.

Приведенная схема обеспечивает автоматическое формирование и восстановление сети в случаях повреждения маршрутов вследствие влияния помех или выхода отдельных узлов сети из строя.

Имитационное моделирование. Модель приведенного выше сетевого уровня протестирована с использованием симулятора *ns-3* и дополнения к нему [13]. Модели физического и канального уровней стека протоколов реализованы в *ns-3* с помощью модуля *LRWPAN*, который входит в стандартный набор модулей программы. Сетевой уровень реализован с ис-

пользованием собственных классов и интегрирован в систему классов *ns-3*. Было также создано несколько вспомогательных классов.

Подсистема моделирования помех состоит из двух частей, расширяющих модуль *LRWPAN*: 1) модель физического устройства помех; 2) модель приложения помехи [14]. Помеха работает, постоянно передавая в канал сообщения. Все устройства, попавшие в зону действия помехи, обнаруживают факт занятости канала и не могут получить доступ к нему. Канал помехи должен совпадать с каналом, на котором работают устройства БСС. На одном канале может работать несколько помех.

Оценка влияния помехи на функционирование сети. Для оценки влияния помехи на функционирование сети и параметры ее работы проведено моделирование со следующими входными параметрами: 70 узлов расположены на области размером 500×500 м, при этом координатор расположен в точке (10; 10), а остальные узлы имеют случайное расположение. Период отправки сообщений составляет 3 с, период рассылки приветствий $t_{inv} = 5$ с, период проверки счетчиков *keep-alive* $t_{KA} = 20$ с. Узлы включаются одновременно в начале симуляции, предельное число непосредственных потомков $m = 3$. Общее время симуляции составляет 100 с, помеха включается на 50-й секунде симуляции и располагается случайно. Размер пакета с полезными данными 30 байт (без учета заголовков).

Изменение топологии сети в процессе симуляции показано на рис. 3. После включения помехи топология сети изменилась: некоторое число узлов было отключено, так как ответа от них не поступало. Часть оставшихся

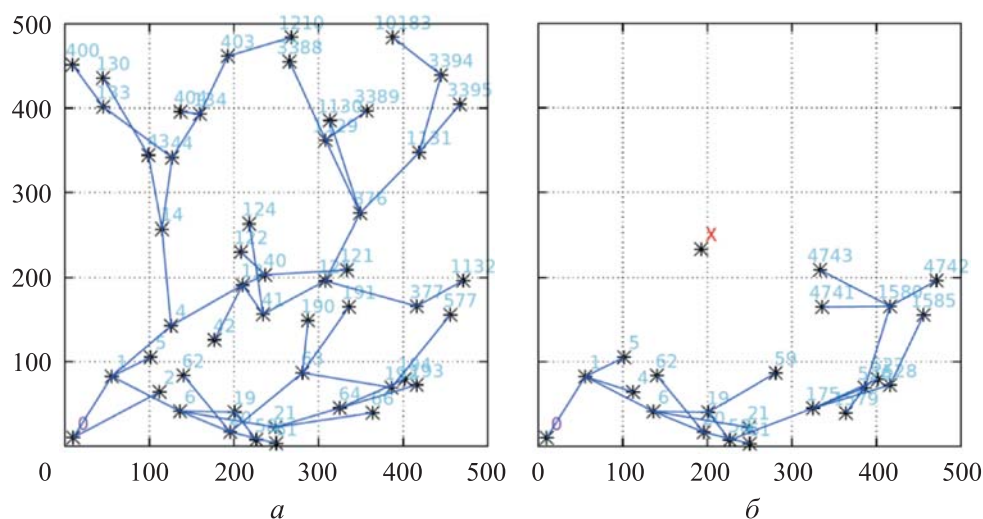


Рис. 3. Изменение топологии сети в процессе симуляции до включения помехи (а) и после ее включения (б)

узлов изменили логические адреса, подключившись к рабочим узлам взамен отключившихся. Таким образом, изменились маршруты передачи сообщений.

Для сравнения надежности сети до и после включения помехи проведен вычислительный эксперимент [15]. Симуляция запущена с теми же входными данными, но без включения помехи. Необходимо отметить, что расчет надежности осуществлялся только после завершения переходного этапа работы сети, т. е. после подключения всех узлов.

Сравнение параметров работы сети

До включения помехи После включения помехи

Число сообщений:		
отправленных	1156	1512
полученных.....	1462	961
Надежность, %	83,13	96,7

Приведенный эксперимент показывает, что наличие помех при работе сети существенно влияет на показатели ее работы. Таким образом, добавление к модели сети подсистемы моделирования помех увеличивает точность имитационного моделирования, так как в реальности функционирование сети без помех невозможно.

Моделирование процесса восстановления сети. Для оценки эффективности алгоритма восстановления работоспособности сети проведено моделирование со следующими параметрами: 80 узлов расположены случайным образом на области размером 500×500 м, расположение узлов случайное, за исключением координатора, находящегося в точке (10; 10). Период отправки сообщений составляет 3 с, период рассылки приветствий $t_{inv} = 5$ с, период проверки счетчиков $t_{KA} = 35$ с. Узлы включаются одновременно в начале симуляции, предельное число непосредственных потомков $m = 3$. Размер пакета с полезными данными 30 байт (без учета заголовков). Периодически включается одна из трех помех, расположенных случайным образом. Изменение надежности сети в процессе моделирования, где каждая точка — надежность сети, измеренная в течение 20 с, приведено на рис. 4. Данные на графике — среднее значение по 30 различным вариантам расположения узлов. Моделирование проводилось дважды: 1) с использованием механизма восстановления сети (синяя линия) и без него (красная линия). Серым цветом выделены интервалы действия помех, красным и синим — доверительные интервалы (95 %) с использованием механизма восстановления сети и без него соответственно.

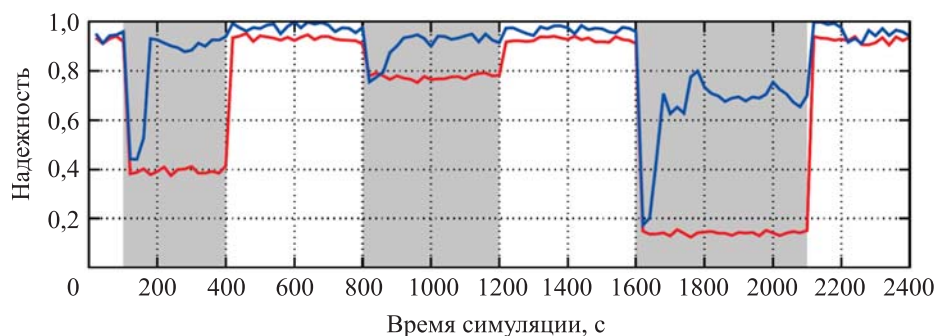


Рис. 4. Изменение надежности в процессе симуляции

Результаты моделирования показывают, что после включения помехи надежность резко снижается. Если механизм восстановления сети не используется, значительных изменений надежности в течение действия помехи не происходит. Если механизм восстановления активен, после включения помехи начинается процесс восстановления сети. Надежность при этом восстанавливается до среднего значения около 0,9.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что разработанный сетевой уровень справляется с поставленной перед ним задачей, восстанавливая сеть при выходе маршрутов передачи сообщений из строя.

Заключение. Предложен сетевой уровень стека протоколов, позволяющий реализовать помехоустойчивую БСС. Показано, что при воздействии помех используемый механизм восстановления сети позволяет добиться существенного повышения надежности сети по сравнению со случаем отсутствия подобного механизма: в среднем (см. рис. 4) надежность БСС без восстановления составила 73,9 %, с восстановлением — 92,4 %.

Дальнейшим направлением деятельности может являться исследование зависимости показателей работы сети от входных параметров сетевого уровня (например, $t_{КА}$).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jayavardhana G., Rajkumar B., Marusic S., et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Fut. Gener. Comput. Syst.*, 2013, vol. 29, iss. 7, pp. 1645–1660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [2] Malche T., Maheshwary P., Kumar R. Environmental monitoring system for smart city based on secure Internet of Things (IoT) architecture. *Wirel. Pers. Commun.*, 2019, vol. 107, no. 4, pp. 2143–2172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06376-0>
- [3] Karl H., Willig A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. Wiley, 2005.

- [4] IEEE 802.15.4–2006. IEEE Standard for information technology. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Computer Society, 2006.
- [5] Tannenbaum A.S., van Steen M. Distributed systems: principles and paradigms. Prentice-Hall, 2002.
- [6] Dressler F. Self-organization in sensor and actor networks. Wiley, 2007.
- [7] Mounika P. Performance analysis of wireless sensor network topologies for ZigBee using riverbed modeler. *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, Coimbatore, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399010>
- [8] Braden R. Requirements for Internet hosts — communication layers. Internet Engineering Task Force, 1989.
- [9] Wijekoon J., Tennekoon R., Harahap E., et al. Introducing a distance vector routing protocol for NS-3 simulator. *EAI Endors. Trans. Mobile Comm. Appl.*, 2015, vol. 16, no. 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.4108/eai.24-8-2015.2260345>
- [10] Alam M., Mamun-Or-Rashid M., Hong C.S. WSNMP: a network management protocol for wireless sensor networks. *2008 10th International Conference on Advanced Communication Technology*, Gangwon-Do, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACT.2008.4493864>
- [11] Tedblad R. Reliable wireless sensor networks in smart homes. Chalmers University of Technology, University of Gothenburg, 2015.
- [12] Падалко С.Н., Терентьев М.Н. Самоорганизация в древовидных персональных беспроводных сетях при наличии нескольких шлюзов. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2017, № 1 (112), с. 75–85. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2017-1-75-85>
- [13] Макашов А.А. Дополнение модуля LR-WPAN симулятора NS-3 для проведения имитационного моделирования беспроводных сенсорных сетей, решающих прикладные задачи в аэрокосмической области. *Гагаринские чтения–2018. 44 Междунар. молодеж. науч. конф.* М., МАИ, 2018.
- [14] Макашов А.А., Терентьев М.Н. Моделирование помех передаче сообщений в беспроводных сенсорных сетях при помощи симулятора NS-3. *17-я Междунар. конф. «Авиация и космонавтика»*. М., Люксор, 2018, с. 318–319.
- [15] Терентьев М.Н. Показатели работы дискретных беспроводных сетей интернета вещей. *Научно-технический вестник Поволжья*, 2018, № 11, с. 258–260.

Макашов Андрей Александрович — аспирант кафедры «Прикладная информатика» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Терентьев Максим Николаевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Прикладная информатика» МАИ (Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское ш., д. 4).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Макашов А.А., Терентьев М.Н. Помехоустойчивый сетевой уровень стека протоколов для беспроводной сенсорной сети древовидной топологии. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 1 (134), с. 135–147.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-1-135-147>

NOISE-IMMUNE NETWORK LAYER OF THE PROTOCOL STACK FOR A WIRELESS SENSOR NETWORK OF A TREE TOPOLOGY

A.A. Makashov

a.makashov@gmail.com

M.N. Terentyev

m-te@yandex.ru

**Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, Russian Federation**

Abstract

The paper presents the network layer of the protocol stack in wireless sensor networks. This stack makes it possible to implement wireless sensor networks of a tree topology, which are able to function in the presence of noise. We state the requirements for the network layer and propose a development to the *keep-alive* mechanism that forms the basis of the network recovery subsystem. We present a functional flow block diagram of the network layer proposed and its model based on the *ns-3* simulator. We also describe the noise model. Our simulation allowed us to estimate how noise interferes with the network operation and to show that the network layer of the protocol stack for a wireless sensor network featuring a network recovery mechanism is efficient in the presence of noise

Keywords

Wireless sensor network, reliability, network recovery, tree topology, noise immunity, keep-alive

Received 19.09.2019

Accepted 15.10.2020

© Author(s), 2021

The study was supported by Russian Foundation for Basic Research (project RFBR no. 17-08-01641a)

REFERENCES

- [1] Jayavardhana G., Rajkumar B., Marusic S., et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. *Fut. Gener. Comput. Syst.*, 2013, vol. 29, iss. 7, pp. 1645–1660. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- [2] Malche T., Maheshwary P., Kumar R. Environmental monitoring system for smart city based on secure Internet of Things (IoT) architecture. *Wirel. Pers. Commun.*, 2019, vol. 107, no. 4, pp. 2143–2172. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06376-0>
- [3] Karl H., Willig A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. Wiley, 2005.

- [4] IEEE 802.15.4–2006. IEEE Standard for information technology. Local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). IEEE Computer Society, 2006.
- [5] Tannenbaum A.S., van Steen M. Distributed systems: principles and paradigms. Prentice-Hall, 2002.
- [6] Dressler F. Self-organization in sensor and actor networks. Wiley, 2007.
- [7] Mounika P. Performance analysis of wireless sensor network topologies for ZigBee using riverbed modeler. *2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*, Coimbatore, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICISC.2018.8399010>
- [8] Braden R. Requirements for Internet hosts — communication layers. Internet Engineering Task Force, 1989.
- [9] Wijekoon J., Tennekoon R., Harahap E., et al. Introducing a distance vector routing protocol for NS-3 simulator. *EAI Endors. Trans. Mobile Comm. Appl.*, 2015, vol. 16, no. 8. DOI: <http://dx.doi.org/10.4108/eai.24-8-2015.2260345>
- [10] Alam M., Mamun-Or-Rashid M., Hong C.S. WSNMP: a network management protocol for wireless sensor networks. *2008 10th International Conference on Advanced Communication Technology*, Gangwon-Do, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICACT.2008.4493864>
- [11] Tedblad R. Reliable wireless sensor networks in smart homes. Chalmers University of Technology, University of Gothenburg, 2015.
- [12] Padalko S.N., Terentiev M.N. Self-organization in the tree personal wireless networks with multiple gateways. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2017, no. 1 (112), pp. 75–85 (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3933-2017-1-75-85>
- [13] Makashov A.A. [Completing LR-WPAN module of NS-3 simulator for simulation modelling of wireless sensor networks solving applied aerospace problems]. *Gagarinskije chteniya–2018. 44 Mezhdunar. molodezh. nauch. konf.* [Gagarin Readings–2018. 44th Int. Youth Sc. Conf.]. Moscow, MAI Publ., 2018 (in Russ.).
- [14] Makashov A.A., Terentyev M.N. [Simulation of interference of message transmission in wireless sensor networks using NS-3 simulator]. *17-ya Mezhdunar. konf. “Aviatsiya i kosmonavtika”* [17th Int. Conf. “Aviation and Cosmonautics”]. Moscow, Lyuksor Publ., 2018, pp. 318–319 (in Russ.).
- [15] Terentyev M.N. Performance indicators for duty cycle wireless networks of the internet of things. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh’ya* [Scientific and Technical Volga Region Bulletin], 2018, no. 11, pp. 258–260 (in Russ.).

Makashov A.A. — Post-Graduate Student, Department of Applied Computer Science, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Terentyev M.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Applied Computer Science, Moscow Aviation Institute (National Research University) (Volokolamskoe shosse 4, Moscow, 125993 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Makashov A.A., Terentyev M.N. Noise-immune network layer of the protocol stack for a wireless sensor network of a tree topology. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 1 (134), pp. 135–147 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-1-135-147>



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
под ред. А.В. Абрамова, А.И. Амосовой

«Биорадиолокация»

Освещены вопросы радиолокации биологических объектов (биорадиолокации) — метода, который может быть использован для обнаружения живых людей, находящихся за преградами, и дистанционного определения параметров их дыхания и сердцебиения. Биорадиолокация может найти применение в различных областях: спасательных операциях, антитеррористической борьбе, медицине и др. Описаны физические основы процесса биорадиолокации, особенности биорадиолокаторов с непрерывным и импульсным зондирующими сигналами, а также методы расчета и моделирования процессов в биорадиолокации.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
<https://bmstu.press>