

Модель распределенной самоорганизующейся сети сенсоров IoT

М. В. Ушакова, Ю. А. Ушаков, А. Л. Коннов, Д. В. Горбачев¹

Работа направлена на изучение особенностей упрощенной реализации стека протоколов, эффективности маршрутизации и производительности в режиме транзитной передачи данных устройств с приоритетом на максимально долгое время работы от батарей. Решение задачи управления сетевыми устройствами в сети с большим количеством сенсоров (например, сеть Интернета вещей) является актуальной и может быть решена путем создания ячеистой сети типа mesh. Но в таких сетях может возникнуть ситуация, когда из-за выхода из строя одного или нескольких устройств будет нарушена работоспособность всей сети. В связи с чем предлагается для соединений и передачи данных использовать самоорганизующуюся сеть на основе канального уровня Wi-Fi и протокола PainlessMesh. Для исследования возможности применения предлагаемого решения в работе разработана четырехмерная модель Маркова и получены аналитические выражения для оценки параметров функционирования сети. На основе полученных моделей построен вычислительный алгоритм, позволяющий имитировать сценарии работы сети. Адекватность моделей подтверждается путем эмуляции сценария работы кластера датчиков. Основными результатами работы являются: в научном аспекте – разработанные модели оценки параметров работы сети IoT; в практическом аспекте – полученные с помощью имитации графики зависимостей задержки при включении узла сети от количества узлов и скорости «пробуждения» узла. Кроме того, выявлено, что многопротокольные устройства могут работать более эффективно, при этом поддерживая необходимую производительность сети передачи данных.

Ключевые слова: беспроводные сети, Интернет вещей, самоорганизующиеся сети, маршрутизация, сетевой протокол, узел ретрансляции, шлюз.

1. Введение

Работа IoT (Internet of Things, Интернет вещей) в обычных Wi-Fi сетях требует поддержки множества протоколов и стандартов, что приводит к использованию существенной доли ресурсов небольших контроллеров. Использование многопротокольных шлюзов оправдано только в централизованных системах, кроме того, такие шлюзы зачастую имеют совместимость не со всем оборудованием и при этом не имеют возможности вмешиваться в прошивку, управляющую взаимодействием с устройствами.

С увеличением количества устройств становится сложно поддерживать доступность беспроводных сетей из-за увеличения взаимного влияния и помех, поэтому актуальной задачей будет являться создание ячеистых сетей типа mesh – это сеть, где узлы не обязательно должны быть подключены к коммутатору, поскольку они могут подключаться по беспроводной сети между собой. Некоторые узлы такой сети могут предоставлять инфраструктуру для транспортировки трафика одновременно со своей основной функцией. Правильно спроектированные

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00485.

mesh-сети являются надежными и избыточными и их можно расширить, включив в них множество устройств. Однако в концепции IoT простое перемещение сетевого узла или удаление узла может полностью изменить как маршрутизацию, так и радиочастотную обстановку.

Технологии самоорганизующейся сети доступны для самых распространенных протоколов IoT – Wi-Fi, Bluetooth LE, IEEE 802.15.4 (в том числе 6LoWPAN), LoRA. Однако каждый протокол имеет свои реализации, несовместимые с другими протоколами. При использовании в качестве сетевого протокола IPv6, особенно с Link-Local и Anycast, появляется возможность коммутировать пакеты между различными интерфейсами для наилучшей маршрутизации по выбранным критериям.

2. Постановка проблемы

Особой проблемой IoT является энергопотребление – многие устройства должны экономить заряд аккумуляторов, поэтому большую часть времени они находятся в режиме пониженного энергопотребления – Sleep. При включении они выполняют требуемую функцию, а затем, если требуется, передают результаты или другие данные на сервер. Периоды сна и продолжительность работы для каждого устройства могут быть различны и иногда вычисляются по внутренним правилам либо же случайным образом. Это затрудняет как использование таких устройств в качестве транзитных, так и планирование загрузки очередей и буферов передачи информации на узлах ретрансляции. В работе [1] предлагалось создание гибрида сетей CSMA/CA и TDM для планирования временного разделения передачи данных, но проводные технологии TDM почти никак не сказываются на энергосбережении передающих устройств.

Для изучения путей решения проблемы предлагается построить модель работы соединений и передачи данных самоорганизующейся сети на основе канального уровня Wi-Fi и протокола PainlessMesh для популярнейшей платформы ESP8266 и ESP32. Протокол является заменой традиционной IP-сети и позволяет полностью на программном уровне определять алгоритмы маршрутизации, рассылки, отказоустойчивости, а также иметь несколько шлюзов.

3. Модель работы Wi-Fi Mesh с периодическим включением

Рассмотрим общую структуру беспроводной самоорганизующейся сети, показанную на рис. 1.

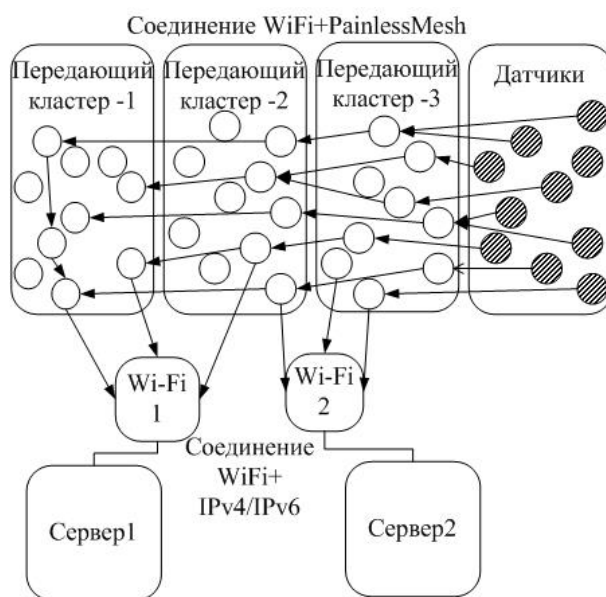


Рис. 1. Общая схема беспроводной сети

Сеть состоит из кластера датчиков, содержащего узлы с Wi-Fi-датчиками, трех передающих кластеров с узлами Wi-Fi-ретрансляции, серверов и шлюзов в обычную сеть Wi-Fi [2]. Внутри кластера и между кластерами в пределах протокола PainlessMesh передача идет только в режиме ad-hoc ближайшим точкам. Кластеры формируются по принципу автономных систем, маршрутизация между кластерами осуществляется на основе информации об известных внешних серверах [3]. Маршрутизация внутри сети будет происходить программно-управляемым способом путем выбора нескольких узлов с максимальным уровнем сигнала к известным Wi-Fi-точкам обычной сети, через которые удалось достичь заданных серверов. Вопрос маршрутизации и выбора шлюзов выходит за рамки данной статьи и будет исследоваться отдельно. Определим датчики в заданной сети как автономные и функционирующие строго по расписанию.

Данные датчиков должны быть направлены в сетевой сервер (например, MQTT) через случайные узлы ретрансляции. Функциональная модель узлов ретрансляции описывается четырьмя состояниями: спящий режим (S_i), режим прослушивания (I_i), режим активного поиска (A_i) и режим передачи данных CSMA/CA (рис. 2).



Рис. 2. Функциональная модель узлов ретрансляции

Введём обозначения: P_x – вероятность перехода узла ретрансляции в следующий слот прослушивания из текущего, если в данном слоте нет входящих пакетов, P_a – вероятность перехода узла ретрансляции в следующий интервал режима активного поиска из текущего, когда в данном интервале нет запроса, $P_{S|I}$ и $P_{S|A}$ – вероятность перехода узла в спящий режим из последнего слота состояний прослушивания и активного поиска соответственно. В спящем режиме узел ретрансляции находится до тех пор, пока не будет достигнуто время пробуждения. В режиме прослушивания узел ретрансляции передает через ad-hoc запрос на соединение в предыдущий кластер для достижения требуемого сервера и дожидается ответа. Так, например, для сервера-1 в кластере-2 предыдущим является кластер-3, где выбирается случайный сосед с наилучшим сигналом из просканированного списка. После успешного получения ответа узел ретрансляции переходит из состояния простоя в состояние активного поиска маршрута и дожидается появления информации из следующего кластера (кластер-1 – следующий для кластера-2) или от шлюза. Временные интервалы между запросами, получаемые узлом в режиме активного поиска, имеют пуассоновское распределение и определяют время ожидания в этом режиме.

Узел ретрансляции, который успешно принял запрос в пределах максимально возможного интервала времени нахождения в режиме активного поиска $L1$, переходит в режим передачи данных CSMA/CA. На рис. 3 показана четырехмерная цепь Маркова, где первое измерение – признак причины выхода, а в качестве других трех измерений используются время ожидания

передачи (M) при изменяющемся размере окна ожидания W, количество срабатываний механизма ожидания передачи (K) и количество коллизий (N) [4, 5]. При этом причина M имеет детализацию: M1 – отказ при ожидании несущей, M2 – при ожидании отсутствия помех.

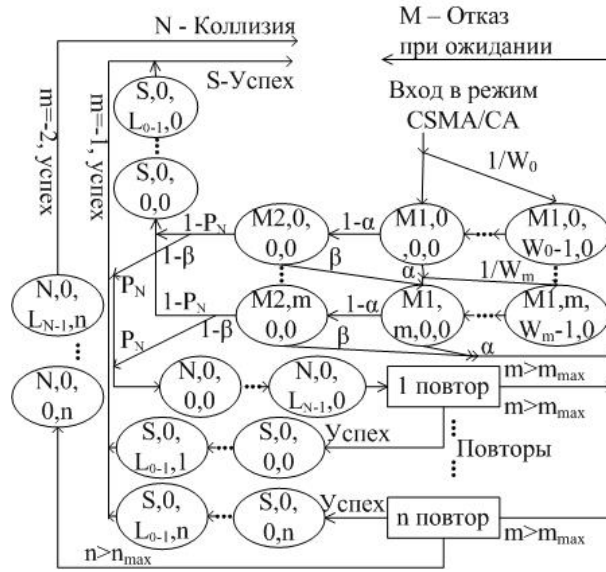


Рис. 3. Четырехмерная модель Маркова

Основное внимание уделяется осуществлению повторных попыток CSMA/CA в сценариях с несколькими промежуточными ретрансляторами. Вероятности загрузки канала α и β в состояниях CCA по стандарту IEEE 802.11-2007 на физическом уровне (обнаружение несущей CCA-CS и обнаружение помех CCA-ED) и вероятность коллизии P_N , показанная на рис. 2, получены с учетом влияния вероятностей спящего режима, режима прослушивания и режима активного поиска наряду с моделью CSMA/CA.

Модель строится в два этапа. На первом этапе получаем вероятности перехода для всех состояний, показанных на рис. 2, а затем на втором этапе строится модель CSMA/CA. Обозначим через μ_ω среднюю скорость пробуждения узла в кластере, состоящем из R узлов, L_1 и L_2 – продолжительность режима активного поиска и режима прослушивания соответственно.

$$P_x = \exp(-\lambda), P_a = \exp(-\lambda_a). \quad (1)$$

В формуле (1) P_x – вероятность перехода узла ретрансляции в следующий слот прослушивания из текущего, если в данном слоте нет входящих пакетов со средним λ пуассоновского потока. P_a указывает вероятность перехода узла ретрансляции в следующий интервал режима активного поиска из текущего, когда в данном интервале нет запроса со средним значением λ_a пуассоновского потока, показанного в (4). Из (1) может быть получена вероятность перехода узла в спящий режим из последнего слота состояний прослушивания ($P_{S/I}$) и активного поиска ($P_{S/A}$), как показано в (2) и (3) соответственно. Наконец, $P_{S/CSMA}$ в (5) указывает вероятность перехода узла из состояния CSMA/CA в первый интервал состояния сна, причем эта вероятность должна всегда равняться единице.

$$P_{S/I} = P_{F/I_1} = P_x^{L_2}, \quad (2)$$

где P_{F/I_1} – вероятность перехода из первого слота режима прослушивания в первый слот спящего режима

$$P_{S/A} = P_{F/A_1} = P_x^{L_1}, \quad (3)$$

$$\lambda_a = \mu_\omega \cdot R, \quad (4)$$

$$P_{S|CSMA} = P_{F|CSMA_m} + P_{F|CSMA_n} + P_{F|CSMA_{ycn}} = 1, \quad (5)$$

$$P_{S_0} = P_{S_0} P_x^{L_2} + P_{S_0} (1 - P_x^{L_2}) P_a^{L_1} + P_{S|CSMA} u_{0,0,0}. \quad (6)$$

В формуле (5) $P_{F|CSMA_m}$ и $P_{F|CSMA_n}$ – вероятности перехода в первый слот спящего режима, когда отправленный пакет отбрасывается в CSMA/CA после превышения максимального m и n соответственно. $P_{F|CSMA_{ycn}}$ – вероятность того, что узел перейдет в первый слот спящего режима после успешной пересылки пакета. Выражение (6) можно упростить, чтобы получить вероятность P_{S_0} того, что узел останется в первом слоте спящего режима в любой данный временной интервал в терминах $u_{0,0,0}$, где $u_{0,0,0}$ – вероятность того, что узел останется в первом интервале CCA-CS модели CSMA/CA (α), а $u_{state,m,k,n}$ – вероятность перехода в состояние $state$ с размером окна задержки m , количеством ожиданий k , количеством коллизий n .

$$P_{CSMA} = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{W_i-1} \sum_{j=0}^n u_{M1,i,k,j} + \sum_{j=0}^n \sum_{i=0}^m u_{M2,i,0,j} + \\ + \sum_{j=0}^n \left(\sum_{k=0}^{L_3-1} u_{S,0,k,j} + \sum_{k=0}^{L_c-1} u_{N,0,k,j} \right) = Z_1 \cdot u_{0,0,0}, \quad (7)$$

где L_3 – количество слотов спящего режима, L_c – количество слотов коллизии.

$$P_S + P_I + P_A + P_{CSMA} = 1, \quad (8)$$

$$P_{S_0} \left(L_3 + \sum_{i=1}^{L_2} P_x^{i-1} + (1 - P_x^{L_2}) \sum_{i=1}^{L_1} P_a^{i-1} \right) + Z_1 u_{0,0,0} = 1. \quad (9)$$

Из (7) следует, что вероятность того, что узел находится в состоянии CSMA/CA (P_{CSMA}) в случайно заданный интервал времени представляет собой сумму α , β , вероятности успеха и вероятности отказа. Z_1 – коэффициент пропорциональности после выражения всех вероятностей в (7) через $u_{0,0,0}$. В формуле (8) P_S , P_I , P_A и P_{CSMA} – вероятности того, что узел перейдет в спящий режим, режим прослушивания, режим активного поиска и режим CSMA/CA соответственно в случайно заданный интервал времени. Эти вероятности могут быть выражены через P_{S_0} и $u_{0,0,0}$, как показано в (9).

Пусть $Q_1 = 1 - P_a$, $Q_{L1} = 1 - P_a^{L_1}$, $Q_2 = 1 - P_x$, $Q_{L2} = 1 - P_x^{L_2}$.

Тогда после нормализации (8) получим следующее выражение:

$$u_{0,0,0} = \frac{Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_{L1} \cdot Q_{L2}}{Q_1 \cdot (L_3 Q_2 + L_2 Q_{L2}) + Q_{L2} \cdot Q_{L1} \cdot Q_2 \cdot (L_1 + Z_1 Q_1)}. \quad (10)$$

Получив формулу для $u_{0,0,0}$, аналогичным образом можно вывести α и β .

Общая задержка, вызванная отдельным узлом для успешной пересылки пакета, обусловлена задержкой CSMA/CA и задержкой режима активного поиска. Задержка CSMA/CA может быть вычислена по формуле:

$$D_{csma} = (T_s + D_b) \cdot \left[1 + \frac{y}{1-y} - \frac{(n+1) \cdot y^{n+1}}{1-y^{n+1}} \right], \quad (11)$$

где y – вероятность того, что на текущей итерации в результате коллизии будет повтор даже при освобождении канала.

$$D_b = 2S_b \left[1 + 0,25 \left\{ \frac{1-b}{1-b^{m+1}} \left(2W_0 \frac{1-2b^{m+1}}{1-2b} - \frac{3(m+1)b^{m+1}}{1-b} \right) + \frac{3b}{1-b} - (W_0 + 1) \right\} \right], \quad (12)$$

$$P_{\text{delay}|\text{success}} = \frac{P_a^{\text{delay}-1} (1-P_a)}{1-P_a^{L_1}}, \quad (13)$$

$$D_{\text{актив}} = \sum_{i=1}^{L_1} (i) \frac{P_a^{i-1} (1-P_a)}{1-P_a^{L_1}}, \quad (14)$$

$$D_{\text{общ}} = (D_{\text{csma}} + D_{\text{актив}} S_b) \cdot h. \quad (15)$$

В (11) D_b – задержка срабатывания механизма отката, вычисляемая по (12) с использованием математического ожидания m режима CSMA/CA. Задержка D_{csma} канала может быть получена из расчета средней вероятности успеха после j попыток. T_s и S_b – время передачи пакета и время отклика устройства, b – максимум из $\{\alpha, (1-\alpha)\beta\}$, W_0 – минимальное окно механизма отката. По формуле (14) определяется среднее число активных слотов ($D_{\text{актив}}$), которое узел ожидает до получения маякового радиосигнала. Наконец, полная задержка, которая представляет собой сумму задержек, вызванных CSMA/CA и активными состояниями, вычисленными по h независимым связям, вычисляется по (15).

Адекватность кластерной аналитической модели подтверждается путем эмуляции сценария, аналогичного сценарию, показанному на рис. 1, при котором сеть имеет четыре кластера с десятью узлами каждый. Введем следующие допущения. Пусть помехи от других пользователей 2.4 ГГц незначительны, а каждый ретранслятор переключается между тремя различными каналами для режимов передачи, приема и маяка для уменьшения помех между соседними узлами разных кластеров.

Рассмотрим влияние количества попыток CSMA/CA (n) на общую задержку. На рис. 4 показан график зависимости $D_{\text{общ}}$ (общей задержки) от μ_w (средней скорости пробуждения узлов) для четырех разных значений n . Для симуляции используются следующие параметры: $m_0 = 3$, $m = 4$, $\lambda = 0.01$, $n \in [0, 3]$, $\mu_w \in [2, 20]$, $L_1 = 100$, $L_2 = 100$, $L_3 = 100$.

С увеличением μ_w наблюдается уменьшение $D_{\text{общ}}$, т.к. среднее время ожидания для приема маякового радиосигнала в активном состоянии уменьшается, а ошибки в активном состоянии из-за активного таймаута снижаются.

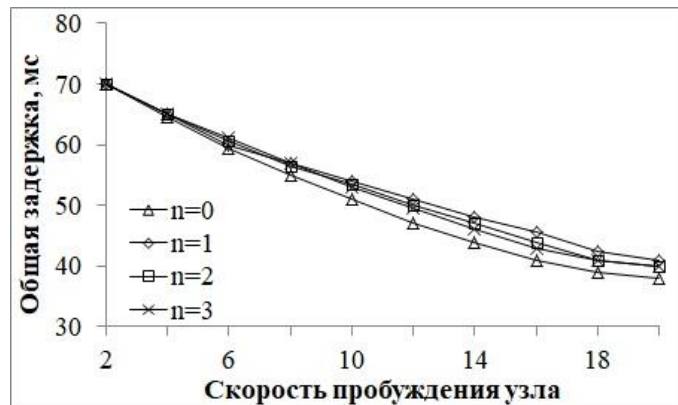


Рис. 4. График зависимости общей задержки от скорости пробуждения узлов для n от 0 до 3

По сравнению со сценарием «без повторений» в сценарии с одиночным повторением после коллизии происходит увеличение $D_{\text{общ}}$. Очевидно, что при n , равном 2 и 3, $D_{\text{общ}}$ меньше, чем при $n = 1$, так как вероятность последовательных коллизий для узла минимальна. Увеличение $D_{\text{общ}}$ наблюдается, когда анализ выполняется путем увеличения количества узлов (R)

для четырех разных λ при $m_0 = 3$, $m = 4$, $\mu_w = 10$, $n = 1$, $L_1 = 100$, $R \in [3, 15]$, $\lambda \in [0.01, 0.04]$, $L_c = 10$, $L_3 = 100$ и $L_2 = 100$ (рис. 5). Рост задержки ($D_{\text{общ}}$) с увеличением λ обусловлен прежде всего ухудшением D_{CSMA} .

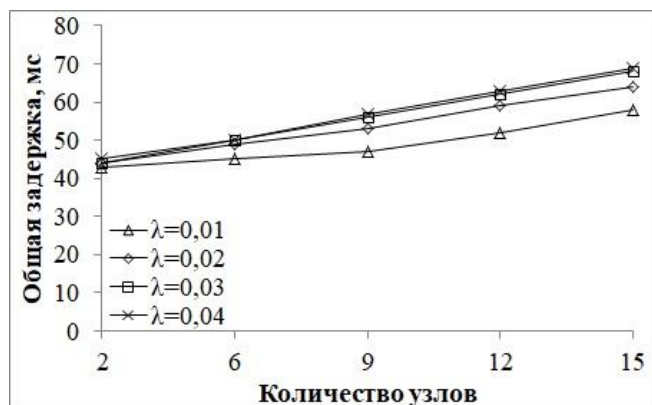


Рис. 5. График зависимости общей задержки от количества узлов для λ от 0.01 до 0.04

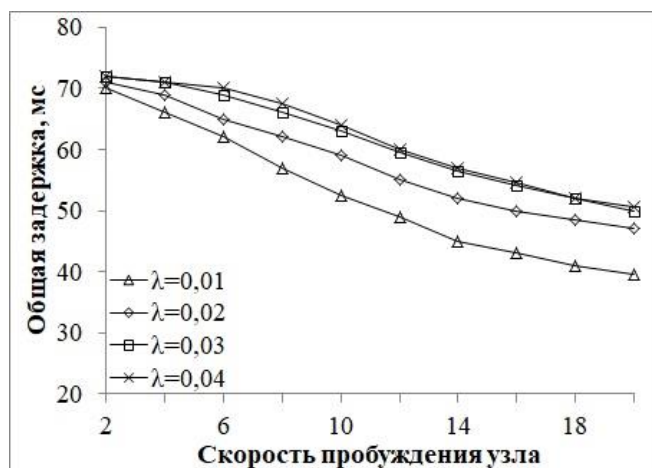


Рис. 6. График зависимости общей задержки от скорости пробуждения для λ от 0.01 до 0.04

На рис. 6 показан график зависимости $D_{\text{общ}}$ от μ_w для четырех разных λ при $m_0 = 3$, $m = 4$, $n = 1$, $L_1 = 100$, $\mu_w \in [2, 20]$, $\lambda \in [0.01, 0.04]$, $L_c = 10$, $L_3 = 100$ и $L_2 = 100$. Отсюда можно сделать вывод о значимости λ в работе сети. Увеличение μ_w уменьшает среднее время ожидания в режиме активного поиска, и вероятность того, что пакет будет отброшен из-за активного тайм-аута, уменьшается. Увеличение λ приводит к перегрузке канала, что, в свою очередь, инициирует большее количество сбоев пакетов из-за активного тайм-аута и большей задержки из-за механизма отката.

На рис. 7 показан график зависимости $D_{\text{общ}}$ от L_1 для четырех различных λ при $m_0 = 3$, $m = 4$, $n = 1$, $L_1 \in [25, 125]$, $\lambda \in [0.01, 0.04]$, $\mu_w = 10$; $L_c = 10$, $L_3 = 100$ и $L_2 = 100$. $D_{\text{общ}}$ растет с увеличением L_1 , так как вероятность приема маякового радиосигнала до активного тайм-аута значительно возрастает.

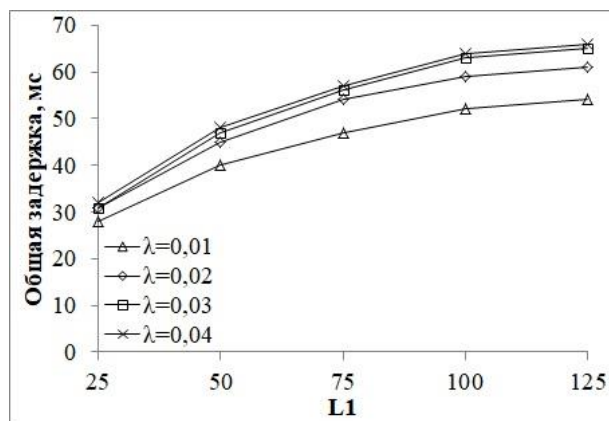


Рис. 7. График зависимости общей задержки от L_1 для λ от 0.01 до 0.04

4. Заключение

В результате исследования выявлено, что многопротокольные устройства могут работать более эффективно, при этом поддерживая необходимую производительность сети передачи данных.

Проанализированы показатели задержки с учетом изменения таких параметров, как повторные попытки CSMA/CA, количество узлов, скорость пробуждения и активное время.

Литература

1. *Jiaqi Cui*. CSMA/CA through put analysis in hybrid CSMA/CA and TDMA networks [Электронный ресурс]. URL: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3028882&dl=ACM&coll=DL> (дата обращения: 25.05.2018).
2. Analysis of superframe adjustment and beacon transmission for IEEE 802.15.4 cluster tree networks [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/257878023_Analysis_of_superframe_adjustment_and_beacon_transmission_for_IEEE_802154_cluster_tree_networks (дата обращения: 25.05.2018).
3. *Jianping Zhu*. Performance Analyses and Improvements for IEEE 802.15.4 CSMA/CA Scheme in Wireless Multihop Sensor Networks Based on HTC Algorithm [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/275460243_Performance_Analyses_and_Improvements_for_IEEE_802154_CSMA_CA_Scheme_in_Wireless_Multihop_Sensor_Networks_Based_on_HTC_Algorithm (дата обращения: 25.05.2018).
4. *Hao Wen*. An Improved Markov Model for IEEE 802.15.4 Slotted CSMA/CA Mechanism [Электронный ресурс]. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11390-009-9240-5> (дата обращения: 23.05.2018).
5. *Shakil Akhtar*. Semi-Markov performance model of CSMA/CD networks [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366489901096> (дата обращения: 25.05.2018).
6. *Minyu Fang*. Power Evaluation and Performance. Enhancement of CSMA/CA based WLANs [Электронный ресурс]. URL: https://www.hamilton.ie/publications/minyus_thesis.pdf (дата обращения: 25.05.2018).

Статья поступила в редакцию 21.11.2018.

Ушакова Маргарита Викторовна

ст. преподаватель кафедры геометрии и компьютерных наук ОГУ (460005, Оренбург, ул. Томилинская, 222А), e-mail: m.v.ushakova@mail.ru.

Ушаков Юрий Александрович

к.т.н., доцент кафедры геометрии и компьютерных наук ОГУ, e-mail: unpk@mail.ru.

Коннов Андрей Леонидович

к.т.н., доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин, Оренбургский филиал ПГУТИ (460000, Оренбург, ул. Пролетарская, 249), e-mail: andrey_konnov@mail.ru.

Горбачев Дмитрий Владимирович

к.т.н., доцент кафедры математических и естественно-научных дисциплин, Оренбургский филиал ПГУТИ, e-mail: gordi47@mail.ru.

Model of the distributed self-organizing network of IoT sensors

M. Ushakova, Yu. Ushakov, A. Konnov, D. Gorbachev

The paper considers the features of the simplified implementation of the protocol stack, the efficiency of routing and performance in the transit mode of data transfer devices, with the longest battery life priority. The solution to the problem of network devices in a network with a large number of sensors (for example, network of the Internet of things) is relevant and can be solved by creation of cellular network like mesh. But in such networks, there can be a situation when because of failure of one or several devices the operability of all network is broken. In this connection, it is offered to use for connections and data transmission the self-organized network on the basis of the channel Wi-Fi level and the PainlessMesh protocol. The four-dimensional model of Markov is developed for the research of application possibility of the proposed solution and analytical expressions for parameters assessment of network operation are obtained. Based on the resulting models the computing algorithm allowing to imitate scenarios of network operation is constructed. The models' adequacy is confirmed by scenario emulation of the sensors cluster operation. The main results of the paper are: in the scientific aspect – the developed models of network operation assessment parameters of IoT; in the practical aspect – received by means of simulation, dependences delay schedules including network nodes on the number of nodes and "awakening" nodes' speed. Besides, it is revealed that multiprotocol devices can work more effectively, at the same time supporting the necessary productivity of a data transmission network.

Keywords: wireless networks, Internet of things, self-organizing networks, routing, network protocol, relay node, gateway.