

Об эффективности методов доступа к каналу с прослушиванием несущей в сетях NB-Fi

Д.В. Банков*, А.И. Ляхов*, И.Д. Павлова*,**, Е.М. Хоров*

*Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

**Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
Москва

Поступила в редколлегию 01.08.2022 г.

Аннотация—Протокол NB-Fi является перспективным решением для реализации энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия и был принят в 2022 г. в качестве национального стандарта Российской Федерации. Устройства NB-Fi передают данные в нелицензируемых диапазонах радиочастот и могут работать в двух режимах: с и без прослушивания несущей. В данной работе сравнивается энергопотребление устройств NB-Fi в этих режимах при различных способах реализации прослушивания. Показано, что даже при невысокой интенсивности трафика (от 30 пакетов в секунду) и неполной видимости устройств в сети, прослушивание несущей позволяет значительно снизить энергопотребление устройств в сравнении с режимом без прослушивания несущей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: NB-Fi, LPWAN, Listen Before Talk, метод доступа к каналу с прослушиванием несущей

DOI: 10.53921/18195822_2022_22_3_177

1. ВВЕДЕНИЕ

Важной составляющей Интернета вещей являются энергоэффективные сети дальнего радиуса действия (англ.: Low Power Wide Area Network, LPWAN), которые, согласно прогнозам, к 2023 г. будут обслуживать 14% всех Интернет-соединений [1]. Из множества технологий LPWAN следует выделить технологию NB-Fi [2, 3], принятую в качестве национального стандарта Российской Федерации. Предполагается массовое внедрение стандарта NB-Fi в России в системы Интернета вещей, используемые для мониторинга экологической ситуации, сбора данных для ЖКХ, городского планирования и управления инфраструктурой. Для эффективного использования данной технологии и выполнения требований к качеству обслуживания пользователей в различных сценариях необходимо знать пределы возможностей этого протокола.

Сети NB-Fi работают в нелицензируемых диапазонах частот, в связи с чем на процедуру доступа устройств NB-Fi к каналу накладывается ряд ограничений в зависимости от режима работы устройств. Устройства NB-Fi по умолчанию работают в режиме без прослушивания канала. Работа устройств в таком режиме проста в реализации, однако устройства должны соблюдать ограничения на рабочий цикл устройств — долю занимаемого канального времени. Также устройства NB-Fi могут работать в режиме с прослушиванием канала перед передачей (англ.: Listen Before Talk, LBT). Второй режим сложнее в реализации, но, как показывают классические исследования методов множественного доступа с прослушиванием несущей (англ.: Carrier Sense Multiple Access, CSMA) [4], более эффективен с точки зрения вероятности доставки данных. В то же время прослушивание канала перед передачей вносит дополнительные расходы энергии, в то время как энергопотребление устройств является одним из ключевых показателей эффективности для сетей LPWAN.

На данный момент в литературе имеются лишь обзорные исследования протокола NB-Fi, в которых рассматривается только режим работы без прослушивания несущей [3, 5, 6]. При этом, отсутствуют исследования энергопотребления устройств в сетях NB-Fi и исследования режима LBT в сетях NB-Fi. Имеются работы, в которых для сетей других технологий сравниваются методы доступа к каналу без прослушивания несущей (Aloha) и CSMA [4, 7–9], однако в данных работах не сравнивается энергопотребление устройств и не учитываются особенности сетей NB-Fi, связанные с доступом устройств к каналу и возможностью передачи данных с разной скоростью. Сравнение энергопотребления устройств в режиме Aloha и «ненастойчивый CSMA» проводится в работах [10, 11] для сетей LoRaWAN. В [11] показано, что режим CSMA достигает большей вероятности доставки пакета, чем режим Aloha, но при этом имеет большее энергопотребление. Как показано в [10], данный результат справедлив только для слабонагруженной сети, в то время как в сети, состоящей из большого числа устройств, CSMA позволяет снизить энергопотребление устройств. В то же время, в [10] не исследуются другие разновидности CSMA и не дается ответ на вопрос, какой тип CSMA окажется более эффективным. В данной работе при помощи имитационного моделирования сравнивается энергопотребление устройств NB-Fi при использовании доступа к каналу без прослушивания несущей и при использовании различных разновидностей CSMA.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приведено описание протокола NB-Fi. В разделе 3 описываются исследуемые методы доступа к каналу с прослушиванием несущей перед передачей. В разделе 4 описывается исследуемый сценарий работы сети NB-Fi и приводится постановка задачи. Численные результаты исследования приведены в разделе 5. Заключение работы содержится в разделе 6.

2. ОПИСАНИЕ ПРОТОКОЛА NB-FI

Сеть NB-Fi использует топологию «звезда» и состоит из сервера, базовых станций и конечных устройств (далее называемых *сенсорами*). Сервер обменивается информацией с базовыми станциями через проводное соединение. Сенсоры обмениваются данными с базовой станцией по протоколу NB-Fi через беспроводной канал.

Сети NB-Fi работают в нелицензируемых диапазонах частот. В Российской Федерации сети NB-Fi используют диапазон частот 868,7–869,2 МГц, при этом мощность излучения сенсоров не превышает 25 мВт, а мощность излучения базовой станции не превышает 100 мВт.

2.1. Модуляция

В сетях NB-Fi для передачи пакетов в восходящем (англ.: UPLINK) и нисходящем направлениях (англ.: DOWNLINK) используется относительная двоичная фазовая манипуляция несущей. В нисходящем направлении также может быть использована двоичная фазовая манипуляция несущей.

Для передачи данных устройства могут использовать скорости передачи в 50, 400, 3200 и 25600 бит/с, от которых зависит, какой диапазон частот займет передача и как долго она продлится: чем больше скорость, тем «шире» пакет по частоте и «короче» по времени. Стоит отметить, что в отличие от других технологий, например, LoRaWAN [12], в которых различные скорости передачи данных обладают различной спектральной интенсивностью, измеряемой в единицах бит/Гц/с, в сетях NB-Fi для всех скоростей передачи данных спектральная эффективность одинаковая, а повышенная надежность для низких скоростей, обеспечивается исключительно более узкой полосой, и, как следствие, повышением спектральной плотности мощности сигнала. В сетях NB-Fi кадры в восходящем и нисходящем потоке имеют одинаковый размер 288 бит, из которых полезная нагрузка составляет до 64 бит. Длительность кадров T_{Frame} на разных скоростях приведена в табл. 1.

Таблица 1. Временные константы

Скорость передачи r , бит/с	T_{Frame} , мс	T_{delay} , мс	T_{listen} , мс	T_{rnd} , мс
50	5760	5900	60000	5000
400	720	740	30000	1000
3200	90	95	6000	100
25600	11,25	15	6000	100

2.2. Режимы работы

Сенсоры могут работать в двух режимах: без прослушивания несущей перед передачей (далее Aloha) и с прослушиванием несущей. В первом режиме сенсор не прослушивает канал перед передачей и сразу передает пакет, если он передается впервые, или после случайной отсрочки, если передается повторно. При включении второго режима сенсор, прежде чем отправить пакет, должен оценить уровень сигнала в полосе частот, в которой предполагается отправка данных, чтобы убедиться в отсутствии передачи другими устройствами. Если не обнаружена передача другими сенсорами, происходит передача пакета. В противном случае сенсор не должен выполнять передачу до тех пор, пока уровень сигнала в данной полосе частот не упадет ниже установленного значения.

2.3. Выбор частоты передачи

В стандарте NB-Fi наложено ограничение на минимально допустимую ширину нисходящего канала — 102,4 кГц и восходящего канала — 51,2 кГц. В данной работе рассматриваются сети, использующие наименьшую ширину восходящего и нисходящего каналов.

В восходящем канале выделенный частотный диапазон характеризуется базовой частотой передачи UPLINK-пакетов B_{ul} . Внутри этого диапазона сенсорам может задаваться некоторое константное смещение относительно базовой частоты O_{ul} , благодаря которому разные поддиапазоны частот могут выделяться разным группам сенсоров. Внутри своего поддиапазона каждый сенсор еще имеет некоторое псевдослучайное смещение частоты C_{ul} . В результате частота отправки UPLINK-пакетов вычисляется по формуле

$$F_{ul} = \begin{cases} B_{ul} + O_{ul} + C_{ul}, & \text{если порядковый номер пакета четный,} \\ B_{ul} + O_{ul} - C_{ul}, & \text{если порядковый номер пакета нечетный.} \end{cases} \quad (1)$$

Псевдослучайное смещение несущей частоты C_{ul} зависит от содержимого передаваемого пакета и вычисляется как

$$C_{ul} = \frac{((I + M) \bmod 256) \times G_{ul}}{255}, \quad (2)$$

где I — идентификатор устройства, M — имитовставка пакета, G_{ul} — полоса перестройки несущей частоты передачи UPLINK-пакетов,

$$G_{ul} = \begin{cases} \frac{W_{ul} - r \times 2 - 2000}{2}, & \text{если } W_{ul} > r \times 2 + 2000, \\ 0, & \text{если } W_{ul} \leq r \times 2 + 2000, \end{cases} \quad (3)$$

где W_{ul} — ширина рабочей полосы частот, r — скорость передачи UPLINK-пакетов, измеряемая в битах в секунду (см. табл. 1). Далее в работе рассматривается работа сети с параметрами $O_{ul} = 0$ и $W_{ul} = 51200$.

В нисходящем канале центральная частота для каждого сенсора выбирается один раз аналогично тому, как это делается для UPLINK-пакетов, но не зависит от имитовставки M .

2.4. Механизм подтверждения доставки пакета и повторной отправки

Устройства NB-Fi могут работать в режиме без подтверждений и с подтверждениями, причем подтверждения могут отправляться на группу из 2^n кадров, $n = 0, \dots, 5$. При использовании механизма группового подтверждения, сенсор, отправляя последний кадр из группы, ставит флаг, сигнализирующий о необходимости базовой станции послать подтверждающий кадр, в котором содержится информация о недоставленных кадрах в группе. Через интервал времени T_{delay} (см. табл. 1) после начала передачи пакета, в ответ на который должен прийти кадр подтверждения, сенсор начинает прослушивать нисходящий канал и в течение интервала времени T_{listen} ждет подтверждение. В случае групповой отправки, кадр подтверждения содержит битовую маску, в которой указывается, какие кадры были получены. При получении подтверждения, сенсор повторно отправляет недоставленные кадры из группы. Если сенсор не получает подтверждение по истечении T_{listen} , он повторяет отправку последнего кадра через случайное время, распределенное равномерно в интервале $(0, T_{rnd})$ (см. табл. 1). Повторные передачи осуществляются до получения подтверждения всех отправленных кадров или до достижения ограничения на максимальное количество повторных передач (настраиваемый параметр).

3. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ДОСТУПА К КАНАЛУ С ПРОСЛУШИВАНИЕМ НЕСУЩЕЙ

Доступ к каналу в режиме LBT может быть организован различными способами, которые соответствуют различным разновидностям множественного доступа к каналу с прослушиванием несущей (англ.: Carrier Sense Multiple Access, CSMA). В данной работе рассматриваются режимы работы ненастойчивого и p -настойчивого CSMA.

Сенсор в режиме *ненастойчивого CSMA* выбирает центральную частоту при поступлении пакета согласно уравнению (1). В течение промежутка времени σ сенсор прослушивает канал, который собирается занять. В работе значение σ выбрано равным длительности символа на используемой сенсором скорости (см. табл. 2). При таком значении σ сенсор может оценить мощность сигнала в диапазоне частот, в котором планируется передача. Также при выбранных значениях σ сигнал от сенсора успевает распространиться до всех сенсоров, находящихся в пределах области видимости данного сенсора. Если канал свободен, т.е. уровень сигнала в полосе частот ниже порогового значения, то сразу после прослушивания сенсор начинает передавать пакет. Если канал занят, сенсор снова прослушивает канал спустя случайную отсрочку и повторяет этот алгоритм до тех пор, пока канал не освободится. В данной работе случайная отсрочка выбирается равновероятно в интервале $[0, T_{Frame}]$, где T_{Frame} — длительность кадра на используемой сенсором скорости передачи.

Также рассмотрен режим ненастойчивого CSMA с переносом частоты, алгоритм которого состоит в том, что после прослушивания среды в случае, если канал занят, сенсор начнет прослушивать канал на другой частоте, выбранной согласно уравнениям (1)–(3) с одним отличием: вместо имитовставки пакета M используется случайное целое число, выбираемое равновероятно на интервале $[0, 255]$. Таким образом, первый раз центральная частота передачи выбирается в соответствии со стандартным алгоритмом выбора частоты в восходящем направлении, а при повторных прослушиваниях — равновероятно из доступного на используемой скорости передачи интервала.

В режиме p -настойчивого CSMA сенсор также прослушивает канал в течение промежутка времени σ . Если канал свободен, сенсор сразу приступает к передаче пакета. Если канал занят, сенсор ждет, когда канал освободится, и с вероятностью p передает пакет, а с вероятностью $1 - p$ в течение интервала времени σ заново прослушивает канал. Заметим, что описание процедуры LBT в стандарте NB-Fi наиболее соответствует p -настойчивому CSMA с параметром $p = 1$, также называемому *настойчивым CSMA*.

Таблица 2. Параметры сценария

Скорость передачи, бит/с	σ , мкс	S дБм	R_{sensor} , м	R_{base} , м
50	20000	-150	4270	12150
400	2500	-141	2460	7650
3200	312,5	-132	1420	4810
25600	39,06	-123	820	3030

Таблица 3. Потребляемая сенсором мощность [10]

P_{tx} , мВт	P_{rx} , мВт	P_{sense} , мВт
419,6	44,06	4,32

4. ИССЛЕДУЕМЫЙ СЦЕНАРИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим сеть, состоящую из сервера, 1000 сенсоров и базовой станции. Для передач сенсоров в восходящем потоке используется частотный диапазон шириной 51,2 кГц, а для передач в нисходящем потоке используется частотный диапазон шириной 102,4 кГц. При этом выделенный диапазоны для передачи в восходящем потоке используются сенсорами целиком без разделения на поддиапазоны. Базовая станция находится в центре круга радиуса R , а сенсоры распределены в этом круге равномерно. Сенсоры генерируют пакеты, которые передают базовой станции. Поступление сгенерированных пакетов описывается потоком Пуассона с интенсивностью λ . Скорости передачи данных назначаются при инициализации устройств и одинаковы для восходящего и нисходящего направлений. Подтверждение отправляется на каждый пакет. Максимальное число попыток отправки пакета равно семи. Если по истечении всех попыток пакет не был доставлен, то он считается потерянным. На устройствах присутствует буфер, вмещающий один пакет. Новый пакет при генерации помещается в буфер. В случае, если буфер не был пустой, новый пакет вытесняет старый, который считается потерянным. Длина всех пакетов равна 288 битам.

Для вычисления затухания мощности сигналов от сенсоров до базовой станции используется модель Окамуры-Хаты [13], а от сенсоров к сенсорам — модель из статьи [14]. Разные модели распространения используются из-за того, что предполагается, что сенсоры находятся на одинаковой высоте, а базовая станция находится на возвышении 30 м относительно сенсоров. Минимальное соотношение сигнал-шум для успешной передачи равно 7 дБ (учитывая входной коэффициент шума базовой станции, равный 2 дБ, и отношение сигнал/шум, равное 5 дБ, которое соответствует вероятности битовой ошибки 10^{-5}). Если соотношение полезного сигнала к помехам, вызванным тепловым шумом и передачами других устройств, меньше этого значения, то пакет считается поврежденным. Предельная чувствительность приема S , максимальное расстояние R_{base} , на котором базовая станция может принять пакет, и максимальное расстояние R_{sensor} , на котором сенсор может «услышать» сигнал от другого сенсора, указаны в табл. 2. Считается, что пакет может быть поврежден только из-за коллизии с другими пакетами данной сети.

Сенсоры потребляют различную мощность в зависимости от того, в каком состоянии они находятся (см. табл. 3). При передаче данных сенсор потребляет мощность P_{tx} , при приеме — P_{rx} , при прослушивании канала в режиме LBT и при ожидании подтверждения — P_{sense} .

В данной работе ставится следующая задача: в описываемом сценарии сравнить среднее энергопотребление устройств на передачу пакета при использовании сенсорами таких методов доступа, как Aloha, ненастойчивый CSMA, p -настойчивый CSMA и ненастойчивый CSMA с переносом частоты.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для описанного в разделе 4 сценария была разработана имитационная модель для исследования энергопотребления E сенсора на успешно переданный пакет в зависимости от интенсивности трафика. Величина E вычисляется, как отношение суммарного энергопотребления сенсоров за время эксперимента, деленное на количество успешных пакетов. Данное значение усреднялось по 50 прогонам эксперимента с разными начальными значениями генератора случайных чисел.

На рис. 1–4 показаны зависимости энергопотребления от суммарной интенсивности трафика для шести режимов работы сенсоров (Aloha, ненастойчивый CSMA, ненастойчивый CSMA со сменой частоты, настойчивый CSMA, p -настойчивый CSMA с $p = 0,1$, p -настойчивый CSMA с $p = 0,01$) для разных скоростей передачи данных.

Рассмотрим сеть радиуса $R = 0,4$ км. В такой сети все сенсоры находятся в области видимости друг друга.

На рис. 1 изображена зависимость энергопотребления на успешно переданный пакет от интенсивности трафика для скоростей 50 и 400 бит/с. Видно, что при малой интенсивности трафика энергопотребление для режимов Aloha и CSMA практически не отличается. Это объясняется тем, что при малой интенсивности трафика сенсоры с большой вероятностью передают в разные интервалы времени и, поскольку для передачи требуется узкий диапазон частот, выбираемые ими каналы пересекаются редко. В результате в случае режима Aloha коллизии случаются редко, а в случае CSMA для сенсора канал обычно оказывается свободным и на прослушивание канала потребляется немного энергии. При больших интенсивностях трафика в режиме Aloha потребляется значительно больше энергии из-за коллизий и связанных с ними повторными попытками передачи. Из всех видов CSMA больше всего энергии потребляется при использовании настойчивого CSMA — на прослушивание канала и повторные передачи в случае коллизий, вероятность которых в этом режиме больше в сравнении с другими алгоритмами прослушивания канала, которые тратят почти одинаковое небольшое количество энергии.

На рис. 2 изображена зависимость энергопотребления на успешно переданный пакет от интенсивности трафика для скоростей 3,2 кбит/с и 25,6 кбит/с. Заметим также, что для скорости передачи данных, равной 25,6 кбит/с, не показана зависимость для ненастойчивого

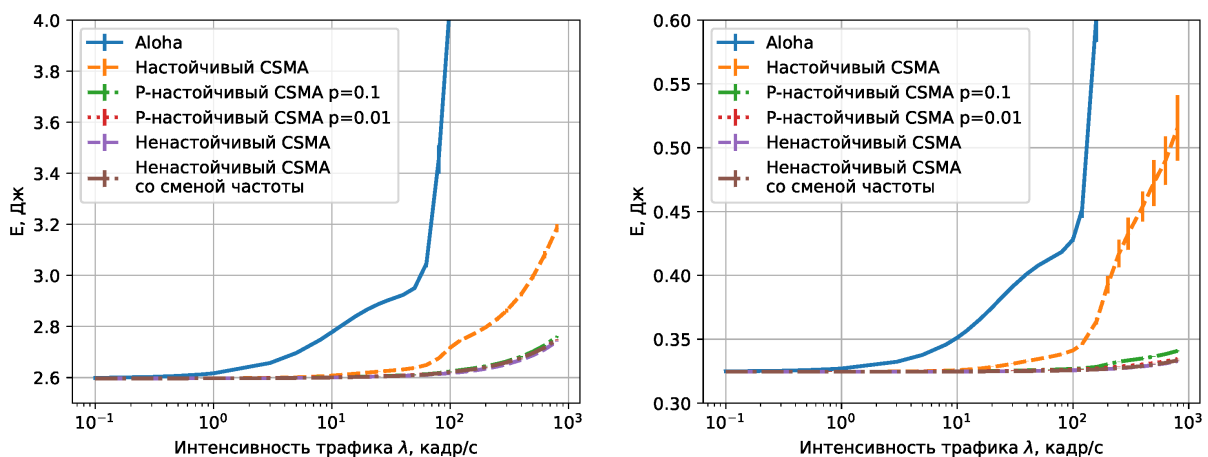


Рис. 1. Зависимость среднего энергопотребления сенсоров на успешно переданный кадр от интенсивности трафика, $R = 0,4$ км, $r = 50$ бит/с (слева) и $r = 400$ бит/с (справа).

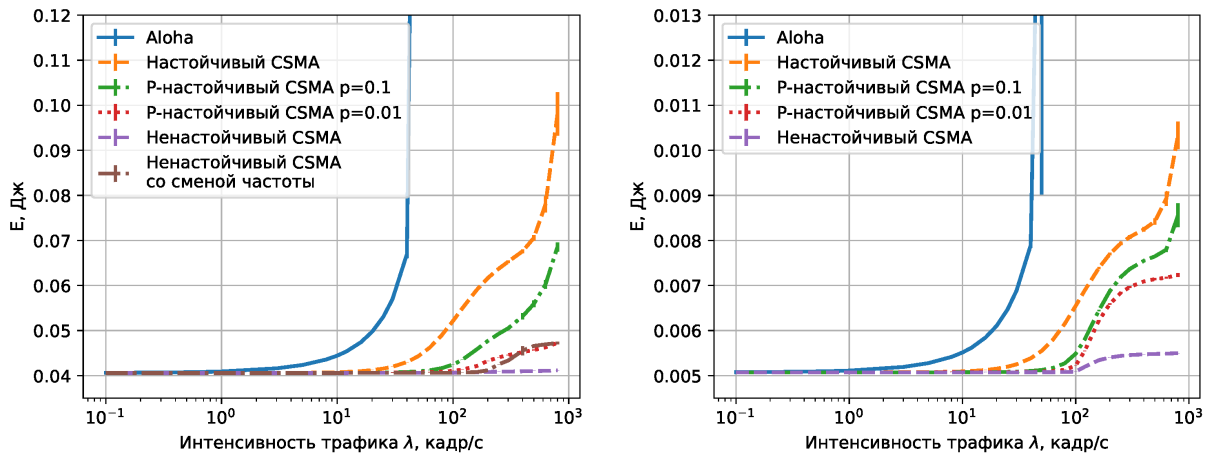


Рис. 2. Зависимость среднего энергопотребления сенсоров на успешно переданный кадр от интенсивности трафика, $R = 0,4$ км, $r = 3,2$ кбит/с (слева) и $r = 25,6$ кбит/с (справа).

CSMA с переносом частоты: при таких соотношениях скорости передачи и ширины канала все устройства передают на одной центральной частоте. При малой интенсивности трафика энергопотребление также почти не отличается для разных режимов. При больших интенсивностях сенсоры в режиме Aloha тратят много энергии на повторные отправки пакетов из-за коллизий. Также становится заметной разница между энергопотреблением при разных видах CSMA, что связано с различным временем прослушивания канала и вероятностью коллизии. Больше всего энергии потребляется в режиме настойчивого CSMA. Это связано с тем, что при использовании настойчивого CSMA сенсор должен прослушивать канал, ожидая освобождение канала, а также с тем, что когда во время передачи данных каким-то сенсором несколько других сенсоров генерируют кадры и планируют их передать в пересекающихся диапазонах частот, то по окончании текущей передачи они начинают свою передачу одновременно, и происходит коллизия. После настойчивого CSMA наибольшее энергопотребление получается при использовании p -настойчивого CSMA с $p = 0,1$, и немного меньшее энергопотребление получается при $p = 0,01$. Как и в случае настойчивого CSMA, при использовании p -настойчивого CSMA сенсор потребляет энергию, прослушивая канал и ожидая, пока канал освободится. В случае, когда несколько сенсоров генерируют кадры во время чужой передачи, после окончания передачи может произойти коллизия, вероятность которой возрастает при увеличении p . Наименьшее энергопотребление имеет ненастойчивый CSMA, так как при его использовании сенсор потребляет меньше всего энергии на прослушивание канала и при этом избегает коллизии.

Рассмотрим сеть радиуса $R = 3$ км. В такой сети не все устройства могут заметить передачу друг друга, поэтому прослушивание среды оказывается менее эффективным, чем в сети радиуса $R = 0,4$ км. На рис. 3 и 4 показана зависимость энергопотребления на успешно переданный пакет от интенсивности трафика для скоростей 50, 400, 3200 и 25600 бит/с, соответственно. Результаты для скорости 50 бит/с аналогичны результатам для сценария с радиусом сети равным $R = 0,4$ км, что связано с тем, что при такой скорости сенсоры с высокой вероятностью могут передавать на непересекающихся диапазонах частот. Для скоростей передачи данных 400, 3200 и 25600 бит/с результаты отличаются от предыдущего сценария — появляется разница в энергопотреблении при большой интенсивности трафика при работе в разных режимах CSMA. Это связано с тем, что сенсоры, обнаружив занятую среду и подождав, пока она освободится, не могут задетектировать передачу сенсоров, находящихся далеко, но в

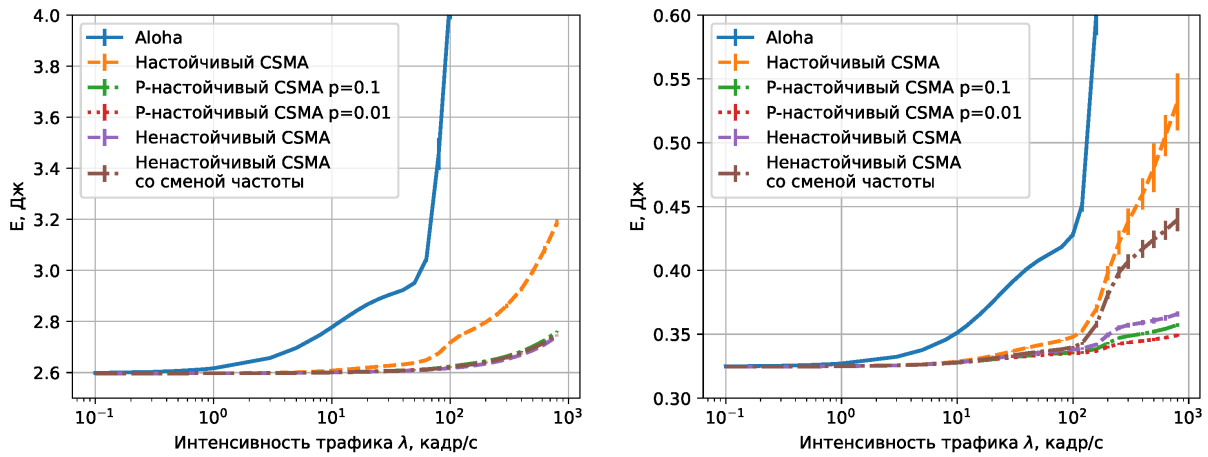


Рис. 3. Зависимость среднего энергопотребления сенсоров на успешно переданный кадр от интенсивности трафика, $R = 3$ км, $r = 50$ бит/с (слева) и $r = 400$ бит/с (справа).

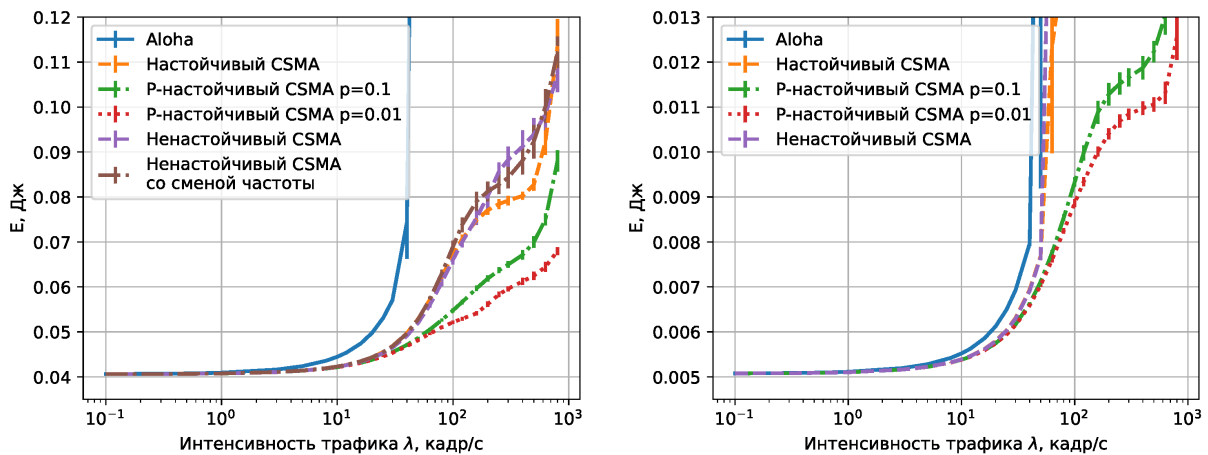


Рис. 4. Зависимость среднего энергопотребления сенсоров на успешно переданный кадр от интенсивности трафика, $R = 3$ км, $r = 3,2$ кбит/с (слева) и $r = 25,6$ кбит/с (справа).

режиме p -настойчивого CSMA сенсор приступает к передаче только с вероятностью p , если канал свободен, и в результате передает реже, чем при использовании ненастойчивого или настойчивого CSMA. В результате p -настойчивый CSMA оказывается более эффективным из-за более редких попыток передачи. Заметим, что различие между энергопотреблением CSMA в сценариях $R = 0,4$ км и $R = 3$ км тем больше, чем больше скорость. Этот эффект связан с двумя факторами. Во-первых, расстояние, на котором сенсор может детектировать передачу другого сенсора, уменьшается при увеличении скорости. Во-вторых, при увеличении скорости падает вероятность того, что сенсоры смогут выбрать непересекающиеся диапазоны частот для передачи.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были рассмотрены сети NB-Fi при использовании методов доступа к каналу с прослушиванием несущей перед передачей и без прослушивания. Сравнивались методы доступа Aloha, ненастойчивый CSMA, ненастойчивый CSMA с переносом частоты и p -настойчивый

CSMA. Рассматривались сценарии малой сети радиуса 0,4 км, в которой все сенсоры находятся в зоне видимости друг друга, и большой сети радиуса 3 км, в которой некоторые сенсоры не могут детектировать передачи других сенсоров. Для данных сценариев были получены зависимости среднего энергопотребления на успешно переданный пакет от суммарной интенсивности трафика.

Анализ результатов моделирования показал, что при суммарной нагрузке ниже 1 кадра в секунду использование CSMA не дает значимого выигрыша в энергопотреблении относительно Aloha. При высокой нагрузке (больше 30 кадров в секунду) CSMA позволяет более чем в два раза понизить энергопотребление по сравнению с Aloha. Из рассмотренных видов CSMA, самые высокие показатели энергопотребления в области высокой интенсивности трафика имеет настойчивый CSMA. При этом в сетях с малым радиусом при высокой интенсивности трафика наименьшее энергопотребления показывает ненастойчивый CSMA, а в сетях с большим радиусом — p -настойчивый CSMA с малым p .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cisco Annual Internet Report (2018-2023) White Paper. — Access mode: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (online; accessed: 7 December 2021).
2. ГОСТ Р 70036-2022. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi) : 2022.
3. Performance evaluation of channel access in NB-Fi networks / Bankov Dmitry, Levchenko Polina, Lyakhov Andrey, and Khorov Evgeny // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Vol. 67, no. 6. — P. 747–754.
4. Kleinrock L., Tobagi F. Packet Switching in Radio Channels: Part I - Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics // IEEE Transactions on Communications. — 1975. — Vol. 23, no. 12. — P. 1400–1416.
5. Low Power Wide Area Network Technologies for Smart Cities Applications / Pham Tung Lam, Nguyen Hoan, Nguyen Huy, Bui Van, and Jang Yeong Min // 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC) / IEEE. — 2019. — P. 501–505.
6. The IIoT/IoT device control model based on narrow-band IoT (NB-IoT) / Petrenko Alexey S, Petrenko Sergei A, Makoveichuk Krystina A, and Chetyrbok Petr V // 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) / IEEE. — 2018. — P. 950–953.
7. Blaszczyszyn Bartłomiej, Muhlethaler Paul, Banaouas Skander. A comparison of ALOHA and CSMA in wireless ad hoc networks under different channel conditions // INRIA-00530093. — 2010.
8. Mazin Asim, Elkourdi Mohamed, Gitlin Richard D. Comparison of slotted ALOHA-NOMA and CSMA/CA for M2M communications in IoT networks // 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall) / IEEE. — 2018. — P. 1–5.
9. Ortín Jorge, Cesana Matteo, Redondi Alessandro. How do ALOHA and listen before talk coexist in LoRaWAN? // 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. — 2018. — P. 1–7.
10. To Thanh-Hai, Duda Andrzej. Simulation of LoRa in ns-3: Improving LoRa Performance with CSMA // 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC). — 2018. — P. 1–7.
11. Baddula Mounika, Ray Biplob, Chowdhury Morshed. Performance Evaluation of Aloha and CSMA for LoRaWAN Network // 2020 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE) / IEEE. — 2020. — P. 1–6.
12. Dmitry Bankov, Evgeny Khorov, Andrey Lyakhov. LoRaWAN Modeling and MCS Allocation to Satisfy Heterogeneous QoS Requirements // Sensors — 2019. no. 19: 4204. <https://doi.org/10.3390/s19194204>

13. Hata Masaharu. Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services // IEEE transactions on Vehicular Technology. — 1980. — Vol. 29, no. 3. — P. 317–325.
14. Implementation and validation of an IEEE 802.11ah module for ns-3 / Tian Le, Deronne Sébastien, Latré Steven, and Famaey Jeroen // Proceedings of the Workshop on ns-3. — 2016. — P. 49–56.

On the Efficiency of Carrier Sense Multiple Access in NB-Fi Networks

Bankov D.V., Lyakhov A.I., Pavlova I.D., Khorov E.M

The NB-Fi protocol is a promising solution for the implementation of low power wide area networks. It was adopted in 2022 as a national standard of the Russian Federation. The NB-Fi devices transmit data in unlicensed spectrum and can operate in two modes: with and without carrier sense. This paper compares the power consumption of NB-Fi devices that use these modes with different carrier sense implementations. It is shown that even at the low traffic intensity (more than 30 packets per second) and the presence of hidden devices in the network, the carrier sense mode allows reducing significantly the power consumption of devices in comparison with the mode without carrier sense.

KEYWORDS: NB-Fi, LPWAN, Listen Before Talk, Carrier Sense Multiple Access