

Об особенностях метода доступа к каналу в сетях NB-Fi *

П.А. Левченко, Д.В. Банков, А.И. Ляхов, Е.М. Хоров

levchenko@wireless.iitp.ru, bankov@iitp.ru, lyakhov@iitp.ru,
khorov@wireless.iitp.ru

Институт проблем передачи информации имени А.А. Харкевича Российской академии наук,
Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)

Аннотация В 2019 году в Российской Федерации был утверждён стандарт протокола NB-Fi, который описывает энергоэффективные сети дальнего радиуса действия (англ.: Low Power Wide Area Networks, LPWANs). Сети класса LPWAN являются перспективным решением для развёртывания беспроводных сенсорных сетей, и планируется широкое применение сетей LPWAN на базе протокола NB-Fi. Однако на данный момент в научной литературе практически не представлены исследования протокола NB-Fi, и открытой задачей является исследование возможностей данного протокола, потенциальных преимуществ и недостатков. В этой работе приведен обзор метода доступа к каналу в сетях NB-Fi, исследована вероятность ошибочной передачи и потери пакета в зависимости от интенсивности трафика, выявлены факторы, которые могут привести к снижению производительности сети и предложены способы улучшения надёжности передачи данных.

1 Введение

С развитием Интернета вещей появляется всё больше беспроводных сенсорных сетей, для развёртывания которых разрабатываются технологии энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (англ.: Low Power Wide Area Networks, LPWANs). Прогнозируется, что 14% соединений Интернета вещей будет относиться к сетям класса LPWAN [1]. Технологии LPWAN позволяют, хоть и с небольшой скоростью (по сравнению со скоростями, достижимыми в сотовых сетях или в сетях Wi-Fi), передавать данные большого числа устройств на большие расстояния при малых затратах мощности. Одной из таких технологий является технология NB-Fi.

* Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ

В 2019 году стандарт протокола NB-Fi был утверждён в качестве предварительного национального стандарта Российской Федерации ПНСТ 354-2019 [2]. Протокол NB-Fi стал первым отечественным стандартизированным решением, которое планируется к широкому применению в сценариях мониторинга экологической ситуации, сбора данных для ЖКХ, городского планирования и управления инфраструктурой. Протокол NB-Fi регламентирует работу сетей LPWAN, в которых высокая дальность передачи при малом потреблении энергии достигается за счёт использования узкополосной модуляции радиосигналов, и имеет ряд сходств с протоколами таких известных технологий LPWAN, как Sigfox [3] и LoRaWAN [4]. Однако протокол NB-Fi имеет и множество отличительных особенностей, из-за которых большая часть результатов исследований, посвящённых другим LPWAN-технологиям, неприменима для сетей NB-Fi, а подробных исследований протокола NB-Fi в научной литературе не представлено — NB-Fi упоминался ранее только в обзорных статьях, например [5, 6]. В то же время, поскольку планируется массовое применение сетей NB-Fi в народном хозяйстве, задача исследования и оптимизации протокола NB-Fi является актуальной.

В данной работе протокол NB-Fi исследуется с точки зрения эффективности метода доступа к каналу: рассматриваются особенности, которые могут повлиять на пропускную способность сети и вероятность потери пакета, выделяются «узкие места», и предлагаются решения для того, чтобы избежать потери эффективности.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится краткое описание протокола NB-Fi. В разделе 3 описывается исследуемый сценарий работы сети NB-Fi. В разделе 4 приведены результаты моделирования сети NB-Fi и их анализ. Заключение работы содержится в разделе 5.

2 Описание протокола

Сеть NB-Fi состоит из оконечных устройств, базовых станций и единого сервера. Передача данных между базовыми станциями и оконечными устройствами осуществляется через беспроводной канал по протоколу NB-Fi. Сети NB-Fi используют для передачи данных нелицензируемые диапазоны частот, в которых установлены ограничения на излучаемую мощность, например, в диапазоне 868,7–869,2 МГц, где максимальная излучаемая мощность составляет 100 мВт. По стандарту базовые станции обязаны осуществлять приём и передачу многих сигналов одновременно и принимать сигналы на любых частотах в пределах рабочей полосы частот. В то же время, базовые станции соединены с сервером через широкополосный канал связи.

2.1 Модуляция

В сетях NB-Fi используется относительная двоичная фазовая манипуляция несущей для пакетов восходящего направления (UPLINK-пакетов) и относительная двоичная фазовая манипуляция несущей или двоичная фазовая

манипуляция несущей для пакетов нисходящего направления (DOWNLINK-пакетов).

Сигналы можно передавать с четырьмя разными скоростями: 50, 400, 3200 и 25600 бит/с. В силу соотношения неопределенности сигналы, передаваемые на разных скоростях, будут занимать разный диапазон по частоте, иметь разные мощности сигналов, при которых возможен приём, и, соответственно, разные максимальные дальности передачи.

2.2 Режимы работы

Оконечные устройства NB-Fi могут работать в трёх режимах работы. При использовании режима без приема (англ.: No RX) устройство передает данные при необходимости, остальное время устройство находится в режиме «сон» и не может принимать данные. При работе в режиме прерывистого приёма (англ.: Discontinuous RX) устройство передает данные и переходит в режим приёма на непродолжительное время сразу после окончания передачи. Сервер буферизирует все запросы на отправку данных устройству и выполняет передачу данных во время «открытия» временного «окна», когда устройство переходит в режим приёма. При использовании режима непрерывного приёма (англ.: Continuous RX) устройство передает данные при необходимости, в остальное время находится в режиме приёма.

2.3 Метод доступа к каналу

Для восходящего направления выделяется рабочая полоса шириной не менее 51,2 кГц, а для нисходящего направления — не менее 102,4 кГц. Каждому устройству назначается центральная частота в нисходящем направлении, которая зависит от скорости и идентификатор устройство. Центральная частота для передачи в восходящем направлении выбирается при каждой передаче (в том числе и повторной) и зависит от скорости, идентификатора устройства и имитовставки пакета. Рассмотрим подробнее метод выбора центральной частоты передачи в восходящем направлении.

Частота передачи UPLINK-пакета равна:

$$F_{UL} = \begin{cases} F_{base} + O_{UL,band} + O_{UL,channel}, & id \bmod 2 = 1, \\ F_{base} + O_{UL,band} - O_{UL,channel}, & id \bmod 2 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где id — идентификатор устройства, F_{base} — базовая частота передачи UPLINK-пакетов, $O_{UL,band}$ — смещение рабочей полосы частот относительно базовой, и $O_{UL,channel}$ — смещение несущей частоты. Последние две величины зависят от набора параметров.

Смещение рабочей полосы частот относительно базовой вычисляется по формуле:

$$O_{UL,band} = BW_{UL} \times O_{UL} \times S_{UL}, \quad (2)$$

Таблица 1: Интервал для повторной передачи кадра.

Скорость передачи, бит/с	T_{delay} , мс	T_{listen} , мс	T_{rnd} , мс
50	5900	60000	5000
400	740	30000	1000
3200	95	6000	100
25600	15	6000	100

где $BW_{UL} = 6400 \times 2^{W_{UL}}$, а O_{UL} , S_{UL} , W_{UL} — заданные параметры, обозначающие, соответственно, значение и направление смещения рабочей полосы передачи UPLINK-пакетов, относительно базовой частоты и ширину рабочей полосы передачи UPLINK-пакетов. Их характерные значения: $W_{UL} = 0, \dots, 15$, $O_{UL} = 0 \dots 127$, $S_{UL} = \pm 1$.

Смещение несущей частоты заданного пакета вычисляется по формуле:

$$O_{UL,channel} = \frac{((id + mic) \bmod 256) \times G_{UL}}{255}, \quad (3)$$

где mic — 3 младших байта имитовставки пакета, а G_{UL} — полоса перестройки несущей частоты передачи UPLINK-пакетов, которая в зависимости от скорости передачи (BR) равна:

$$G_{UL} = \begin{cases} \frac{BW_{UL} - 2 \times BR - 2000}{2}, & \text{если } BW_{UL} > BR \times 2 + 2000, \\ G_{UL} = 0, & \text{если } BW_{UL} \leq BR \times 2 + 2000. \end{cases} \quad (4)$$

Центральная частота в нисходящем направлении вычисляется аналогичным образом с одним изменением: отсутствует mic , поэтому центральная частота остаётся неизменной для всех передач одного устройства в нисходящем направлении.

2.4 Механизм подтверждения доставки пакета и повторной отправки

В технологии NB-Fi предусмотрен режим группового подтверждения доставки данных. Если он выключен, то кадры отправляются без подтверждения. В противном случае, в зависимости от выбранного режима, подтверждение должно поступать на каждый 2^n -й кадр, где $n = 0, \dots, 5$.

Если устройство не получило подтверждение в ответ на переданный кадр, то через случайный интервал времени $T_{delay} + T_{listen} + T_{rnd} \times X$ осуществляется повторная передача кадров, где X — случайная величина, распределённая равномерно в интервале $(0, 1)$, а T_{delay} , T_{listen} и T_{rnd} параметры, зависящие от скорости передачи в восходящем направлении. Их значения представлены в табл. 1. Стоит отметить, что параметры повторных передач кадров подобраны таким образом, что в случае коллизии кадра, передаваемого на скорости 50 бит/с с кадром, передаваемым на какой-либо другой скорости, повторная коллизия невозможна. Аналогично для кадра, передаваемого на скорости 400 бит/с.

3 Исследуемый сценарий

Рассмотрим следующий сценарий работы сети NB-Fi. Сеть состоит из сервера, одной базовой станции и 1000 оконечных устройств, которые распределены равномерно в круге радиуса 1 км, в центре которого находится базовая станция. Устройства работают в режиме прерывистого приёма и передают пакеты на сервер. Пакеты на устройствах генерируются в соответствии с потоком Пуассона. В нисходящем направлении трафик отсутствует кроме пакетов с подтверждениями, которые отправляются на каждый полученный пакет данных от оконечных устройств. Скорости передачи назначаются устройствам при их инициализации, кадры подтверждения передаются на тех же скоростях, что и пакеты в восходящем направлении. На устройствах присутствует буфер, вмещающий один пакет. Если во время передачи пакета на устройстве генерируется новый пакет, то в случае неудачной попытки передачи пакет отбрасывается и устройство переходит к обработке нового пакета. Также если новый пакет генерируется, когда в буфере уже есть пакет, то старый пакет из буфера отбрасывается. Максимальное количество повторных попыток передачи одного кадра равно 7. Длина всех пакетов одинаковая и равна 288 битам.

Устройства передают с мощностью 25 мВт. Для вычисления затухания мощности сигнала используется модель Окамуры-Хата. Передаваемый пакет принимается успешно, если соотношение мощности сигнала к мощности интерферирующих сигналов и шума в используемой полосе частот в течение передачи всего пакета оказывается выше 7 дБ. При этом пренебрегаем потерями, вызванными случайными шумами — пакеты могут быть приняты неудачно только из-за коллизий с другими пакетами.

4 Результаты моделирования

Для описанного сценария была реализована имитационная модель с помощью которой исследовалась эффективность работы сети NB-Fi.

На рис. 1 показана доли ошибочных пакетов (англ.: Packet Error Rate, PER) от интенсивности общего трафика для пяти разных способов назначения скоростей: в четырех случаях всем устройствам назначается одинаковая скорость, в пятом — скорости распределяются равномерно. Для интенсивностей меньше 1 с^{-1} , PER имеет практически одинаковые значения для сценариев, в которых все устройства передают с одинаковой скоростью. Схожесть значений объясняется тем, что при малых интенсивностях трафика PER практически полностью определяется вероятностью успеха при первой попытке передачи пакета, которая зависит от вероятности пересечения кадров по времени и по частоте. В случае, когда все устройства в сети передают на одинаковой скорости, эта вероятность практически не зависит от конкретной скорости передачи, потому что длительность кадра обратно пропорциональна ширине кадра по частоте. Таким образом, при передаче на одинаковой скорости, чем больше вероятность пересечения кадров по

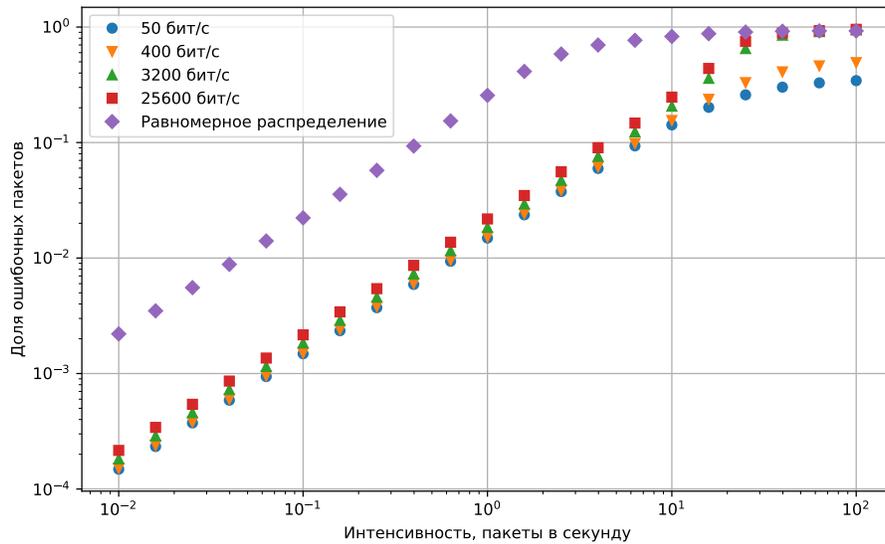


Рис. 1: Зависимость доли ошибочных пакетов от интенсивности трафика.

времени, тем меньше вероятность их пересечения по частоте и наоборот. В то же время, если устройства в сети передают кадры на разных скоростях, то у них уже нет возможности компенсировать высокую вероятность пересечения по времени за счёт низкой вероятности пересечения по частоте и наоборот — поэтому PER для равномерного распределения скоростей намного выше, чем для случаев, когда все устройства в сети используют одну скорость. При большой интенсивности трафика оказывается, что PER ниже для низких скоростей. Это объясняется тем, что при большой интенсивности трафика вероятность пересечения кадров по времени очень близка к единице и вероятность коллизии определяется вероятностью того, что кадры разных устройств будут передаваться на разных частотах, и эта вероятность тем выше, чем ниже скорость.

Стоит отметить такой важный фактор, влияющий на PER, как доставка подтверждений. Частота для передачи в нисходящем направлении не зависит от передаваемого кадра и определяется идентификатором устройства, как описано в разделе 2.3. Если устройств в сети много, может возникнуть ситуация, когда базовой станции надо отправить подтверждения разным устройствам на пересекающихся частотных интервалах. В этом случае передача подтверждений некоторым устройствам может быть отложена, и если задержка отправки подтверждения превосходит время ожидания (T_{listen} в табл.1), то подтверждение не будет доставлено. Возможным способом решения данной проблемы может быть отправление подтверждений не на каждый кадр, а на каждый 2^n -й кадр, как описано в разделе 2.4. При этом выбор значения n является открытой задачей и требует дополнительных исследо-

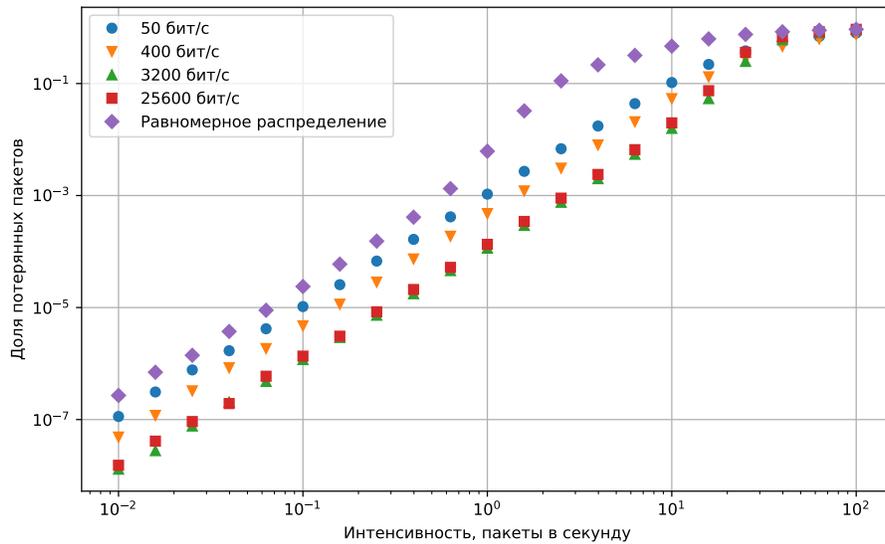


Рис. 2: Зависимость доли потерянных пакетов от интенсивности трафика.

ваний: увеличивая n можно снизить интенсивность трафика в нисходящем потоке, однако при этом возрастает задержка.

Рассмотрим зависимость доли потерянных пакетов (англ.: Packet Loss Rate, PLR) от интенсивности трафика (см. рис. 2). В отличие от PER, при малой интенсивности трафика PLR для разных скоростей получается разным: самый низкий PLR получается для скоростей 25600 бит/с и 3200 бит/с. PLR определяется вероятностью того, что устройство отбросит пакет, что может произойти по достижении максимального числа повторных попыток передачи пакета или из-за генерации нового пакета за время передачи текущего пакета. PLR зависит от вероятности успеха при попытке передачи кадра, длительности кадра и времени ожидания перед повторной попыткой передачи. Чем дольше кадр и время ожидания повторной попытки, тем больше вероятность, что за время его передачи сгенерируется новый кадр и старый будет отброшен в случае неудачной попытки — это объясняет соотношение PLR для разных скоростей.

Подводя итог полученным результатам, можно сделать следующие выводы. С точки зрения PLR эффективнее всего использовать наиболее быстрые скорости: 25600 бит/с или 3200 бит/с, а одновременное использование разных скоростей в одной сети приводит к увеличению PLR, PER и задержки. В то же время, возможны ситуации, когда устройства вынуждены использовать более низкие скорости передачи, например, при плохих канальных условиях. В таких случаях было бы эффективно вводить дополнительное разделение по частотам для разных скоростей передачи, чтобы избежать пересечения сигналов на разных скоростях.

5 Заключение

В данной работе был исследован метод доступа к каналу в сетях NB-Fi в сценарии с одной базовой станцией. При помощи имитационного моделирования получены зависимости доли ошибочных пакетов и вероятности потери пакета от интенсивности общего трафика. Анализ численных результатов выявил несколько потенциальных факторов, снижающих эффективность работы сети, таких как пересечение сигналов на разных скоростях, потери подтверждений из-за недостаточной пропускной способности канала в нисходящем потоке и из-за случайного пересечения частотных диапазонов, неэффективно подобранные интервалы, по истечении которых выполняется повторная попытка передачи. В дальнейшем планируется проведение исследований для решения данных проблем, разработка математических моделей сетей NB-Fi и алгоритмов выбора параметров с целью повышения эффективности сетей NB-Fi.

6 Благодарности

Авторы выражают благодарность Андрею Олеговичу Орлову, руководителю отдела цифровой обработки сигналов ООО «Телематические Решения», за консультацию по поводу протокола NB-Fi.

Список литературы

1. Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper (2020).
URL <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
2. ПНСТ 354-2019. Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi) (2019).
3. K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, F. Meyer, Overview of cellular LPWAN technologies for IoT deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT, in: 2018 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (percom workshops), IEEE, 2018, pp. 197–202.
4. D. Bankov, E. Khorov, A. Lyakhov, LoRaWAN modeling and MCS allocation to satisfy heterogeneous QoS requirements, *Sensors* 19 (19) (2019) 4204.
5. T. L. Pham, H. Nguyen, H. Nguyen, V. Bui, Y. M. Jang, Low Power Wide Area Network Technologies for Smart Cities Applications, in: 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), IEEE, 2019, pp. 501–505.
6. A. S. Petrenko, S. A. Petrenko, K. A. Makoveichuk, P. V. Chetyrbok, The IIoT/IoT device control model based on narrow-band IoT (NB-IoT), in: 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), IEEE, 2018, pp. 950–953.