

Сравнение энергопотребления устройств в сетях NB-Fi и LoRaWAN при выполнении ограничений на рабочий цикл и долю потерянных пакетов¹

А. А. Федорищева^{*,**}, Д. В. Банков^{*,**}, А. В. Баранников^{*,**},
Р. А. Злобин^{*,**}, Е. А. Степанова^{*,**}, А. А. Третьяков^{*,**}

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

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

Поступила в редколлегию 01.07.2025 г. Принята 15.10.2025 г.

Аннотация—В связи с развитием Интернета вещей появляются и распространяются новые технологии энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (англ.: Low Power Wide Area Network, LPWAN). Возникает задача сравнения и выбора наиболее эффективной LPWAN-технологии для передачи данных в различных сценариях. В данной работе сравниваются NB-Fi и LoRaWAN — две LPWAN-технологии, использующие нелицензируемые диапазоны частот, принятые в качестве ГОСТ в России. Сравнение проводится по минимальному энергопотреблению устройств, которое можно достичь, настраивая параметры передачи в сети так, чтобы выполнять ограничения на долю потерянных пакетов и на рабочий цикл устройств. Показано, что технология LoRaWAN позволяет добиться наименьшего энергопотребления при передаче больших пакетов данных и при низкой интенсивности трафика, в остальных случаях наилучшее энергопотребление показывает технология NB-Fi.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: NB-Fi, LoRaWAN, PLR, энергопотребление, рабочий цикл.

DOI: 10.53921/18195822_2025_25_3_523

1. ВВЕДЕНИЕ

С появлением Интернета вещей начали бурно развиваться технологии энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (англ.: Low-Power Wide-Area network, LPWAN). На данный момент широкое распространение получили такие LPWAN-технологии, как LoRaWAN, NB-IoT, Sigfox и NB-Fi. В связи с появлением большого количества LPWAN-технологий возникает вопрос о том, какая из технологий наиболее эффективна в различных сценариях. В данной работе рассматриваются две наиболее популярные в России LPWAN-технологии, принятые в качестве ГОСТ и использующие нелицензируемые диапазоны частот: NB-Fi [1] и LoRaWAN [2].

LPWAN-технологии обычно используются для телеметрии, и в таких сценариях использования важными показателями эффективности работы сети является надёжность доставки данных и энергопотребление конечных устройств (далее *сенсоров*). Обычно требуется минимизировать энергопотребление сенсоров при соблюдении ограничения на долю потерянных пакетов (англ.: packet loss ratio, PLR). Для обеспечения надёжности доставки в NB-Fi и в LoRaWAN данные могут доставляться либо с подтверждениями (в дальнейшем такой режим работы устройств будем называть ACK), либо без них, но с безусловными повторами (в дальнейшем будем такой режим работы устройств называть NoACK). У каждого режима есть

¹ Исследование осуществлено в рамках Госзадания № FFNU-2025-0039 ИППИ РАН

свои преимущества и недостатки. С одной стороны, режим АСК предпочтительнее, потому что в режиме NoASK сенсоры потенциально тратят больше канальных ресурсов и энергии на повторы, которые могут быть не нужны. С другой стороны, интенсивность подтверждаемого трафика ограничена. Это связано с тем, что рассматриваемые технологии работают в нелицензируемом диапазоне частот, где для обеспечения возможности сосуществования сетей разных операторов или сетей разных технологий вводится ограничение на рабочий цикл устройств (англ.: Duty Cycle, DC) — долю времени, в течение которого канал занят данным устройством. Это ограничение распространяется и на базовую станцию сети. При высокой интенсивности трафика сенсоров, работающих в режиме АСК, может возникнуть ситуация, когда для отправки подтверждений на все получаемые кадры базовая станция должна будет нарушить ограничение на рабочий цикл. Чтобы этого не допустить, требуется ограничивать интенсивность подтверждаемого трафика.

Задачу минимизации энергопотребления сенсоров при соблюдении ограничений на PLR и DC можно решать, назначая доле x_A сенсоров режим АСК, а оставшейся доле — режим NoASK. При этом в режиме NoASK сенсор R_N раз будет передавать пакет с одними и теми же пользовательскими данными. Далее требуется выбрать значения параметров x_A и R_N так, чтобы минимизировать энергопотребление при выполнении ограничений на PLR и DC. В работах [3] и [4] разрабатываются алгоритмы для выбора этих параметров для технологий NB-Fi и LoRaWAN, соответственно. В данных работах решаются похожие задачи для разных технологий и остаётся открытым вопрос, какая из технологий является более эффективной.

В данной работе с помощью имитационного и аналитического моделирования проводится сравнение минимального энергопотребления технологий NB-Fi и LoRaWAN при выполнении ограничений на PLR и DC, когда настройка сетей проводится с использованием вышеупомянутых алгоритмов, при различной интенсивности трафика в сети и при разных размерах передаваемых пакетов. Полученные результаты позволяют при заданных параметрах трафика и ограничениях на PLR и DC выбрать технологию, достигающую наименьшего энергопотребления.

Дальнейшее изложение построено следующим образом. В разделе 2 приводится краткое описание технологий NB-Fi и LoRaWAN. В разделе 3 содержится обзор литературы. В разделе 4 описаны сценарий и постановка задачи статьи. В разделе 5 описан алгоритм выбора параметров x_A и R_N . В разделе 6 приводятся численные результаты сравнения NB-Fi и LoRaWAN. В разделе 7 содержится заключение.

2. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Описание протокола NB-Fi

Сеть NB-Fi состоит из сервера, базовых станций и сенсоров и имеет топологию типа «звезда из звезд» (Рис. 1). Для передачи данных в восходящем канале в сетях NB-Fi выделяется рабочая полоса шириной не менее 51,2 кГц, в нисходящем канале — не менее 102,4 кГц, при этом восходящий и нисходящий каналы не должны пересекаться.

В восходящем канале используется относительная двоичная фазовая манипуляция несущей, в нисходящем — двоичная фазовая манипуляция или относительная двоичная фазовая манипуляция несущей. Сенсоры NB-Fi могут передавать данные на четырех скоростях: 50, 400, 3200, 25600 бит/с. Скорость передачи определяет длительность кадра T_{Data} и диапазон частот Δ , занимаемый кадром при передаче (см. таблицу 1).

Алгоритм выбора центральной частоты для восходящего и нисходящего каналов приведен в стандарте NB-Fi [1]. Упрощенно, центральная частота в восходящем канале выбирается псевдослучайным образом для каждой передачи, включая повторную. Центральная частота в

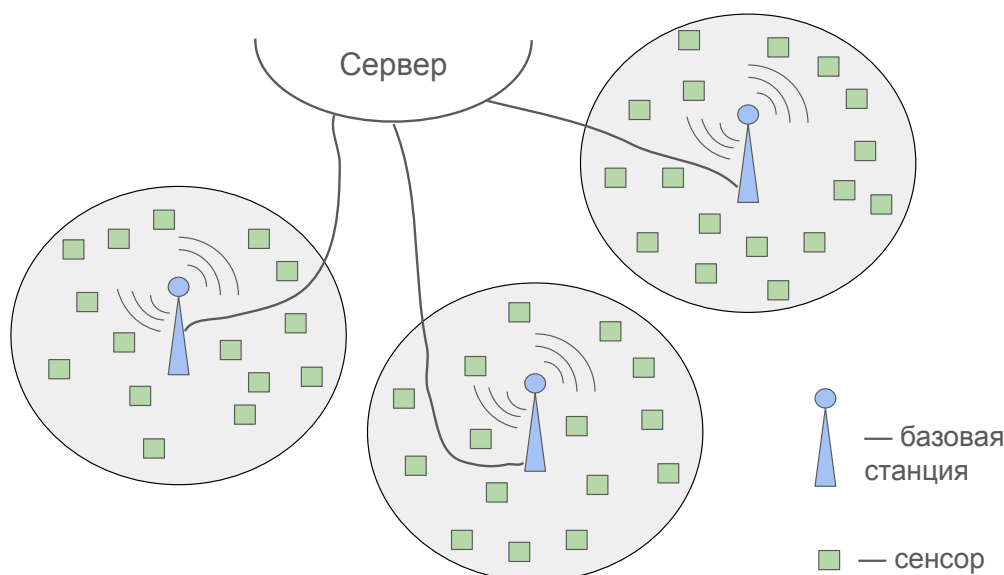


Рис. 1. Топология сетей NB-Fi и LoRaWAN.

Таблица 1. Параметры передачи кадров NB-Fi на разных скоростях

Скорость передачи, бит/с	Δ , Гц	T_{Delay} , мс	T_{Listen} , мс	T_{BO} , мс	T_{Data} , мс
50	50	5900	60000	5000	5760
400	400	740	30000	1000	720
3200	3200	95	6000	100	90
25600	25600	15	6000	100	11,25

нисходящем канале выбирается при инициализации устройства и остается неизменной для всех передач к одному сенсору. Согласно стандарту, если выполняется соотношение $\Delta < BW - 2000$, где BW — ширина рабочей полосы частот, то восходящий и нисходящий каналы делятся на 511 подканалов, каждый из которых с равной вероятностью выбирается для передачи сигнала. В противном случае сигнал отправляется на центральной частоте рабочей полосы канала соответствующего направления.

В режиме работы АСК (Рис. 2) через интервал времени T_{Delay} после начала отправки данных сенсор переходит в режим приема на интервал времени T_{Listen} , ожидая получить кадр подтверждения от базовой станции. Если в течение некоторого интервала времени (будем называть этот интервал окном приема подтверждения) подтверждение не поступает, то сенсор совершает повторную попытку передачи данных через случайную отсрочку τ_A , равномерно распределенную на отрезке времени $[0; T_{BO}]$. Повторные попытки передачи продолжаются до тех пор, пока их количество не достигнет ограничения на число повторных попыток или пока сенсор не получит подтверждение. Значения интервалов T_{Delay} , T_{Listen} , T_{BO} , а также длительности кадра T_{Data} , определенные в стандарте [1], приведены в таблице 1.

В режиме работы NoАСК (Рис. 3) сенсор отправляет R_N раз пакеты с одними и теми же пользовательскими данными, при этом время между повторами — случайная величина τ_N , равномерно распределенная на отрезке $[0; T_{Rep}]$. Данный режим не описан в стандарте NB-Fi, однако может быть реализован на уровне приложения.

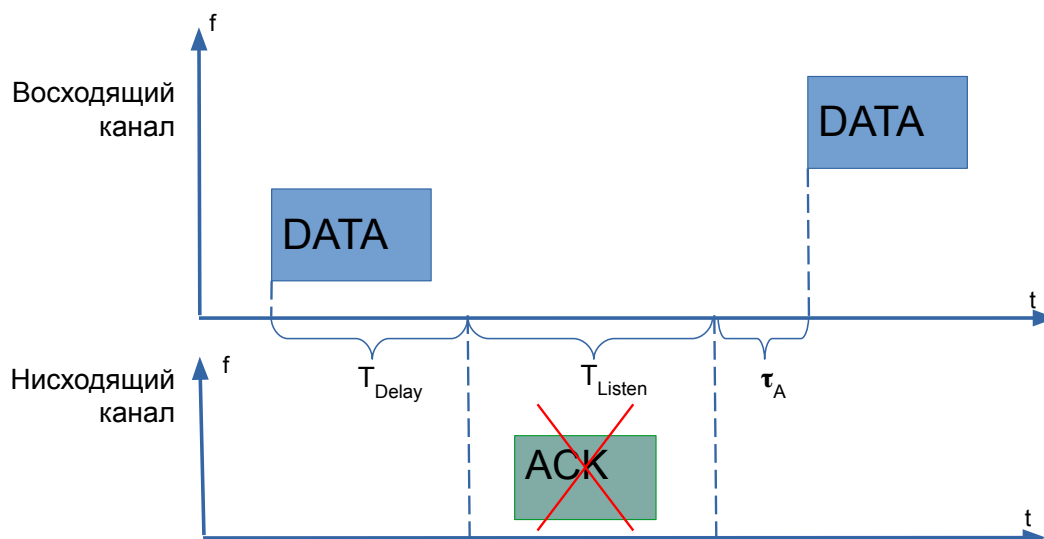


Рис. 2. Передача данных в режиме ACK для технологии NB-Fi.

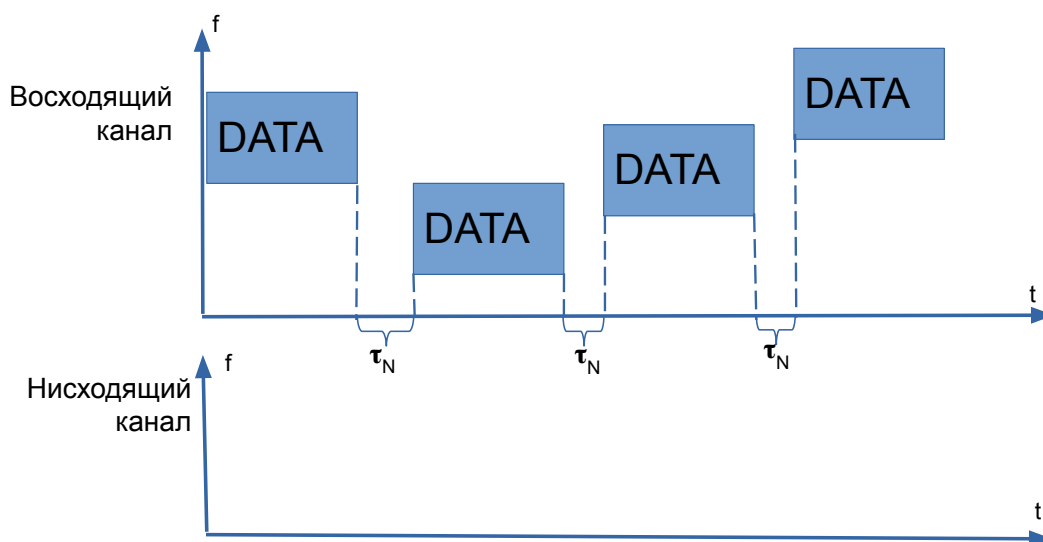


Рис. 3. Передача данных в режиме NoACK для технологии NB-Fi.

2.2. Описание протокола LoRaWAN

Аналогично NB-Fi, сеть LoRaWAN состоит из сервера, базовых станций и сенсоров и имеет топологию «звезда из звезд» (Рис. 1). Взаимодействие сенсора и базовой станции происходит через F основных каналов и один служебный. В основном канале данные могут передаваться как в восходящем направлении, так и в нисходящем. Служебный канал предназначен только для передачи подтверждений.

Сенсоры могут работать в одном из двух режимов: режим АСК или режим NoАСК. Во время режима АСК сенсоры получают подтверждение от базовой станции за каждый успешно переданный пакет с данными. В режиме NoАСК базовая станция не передает подтверждения.

В режиме АСК (Рис. 4) базовая станция после получения данных отправляет два подтверждения: одно в основном канале, а другое — в служебном. После завершения отправки данных через время T_1 (по умолчанию равное 1 с) сенсор открывает первое окно приема подтверждения в том же канале, в котором происходила отправка данных. В течение этого окна сенсор прослушивает канал и ожидает получить там подтверждение. Длительность окна приема должна быть достаточной для того, чтобы детектировать преамбулу кадра подтверждения. Если подтверждение пришло, то считается, что пакет с данными был передан успешно, после чего сенсор не будет открывать еще одно окно для приема второго подтверждения. Если первое подтверждение не пришло, то через время T_2 (по умолчанию равное 2 с) после конца отправки данных открывается второе окно приема подтверждения в служебном канале. Если подтверждение поступило, то кадр считается переданным успешно. Если подтверждение не пришло, то передача была неуспешной, и через случайную отсрочку τ_A , которая равномерно распределена в интервале $[a, b]$ (по умолчанию $a = 1$ с, $b = 3$ с), сенсор отправляет пакет с теми же данными в случайно выбранном основном канале. При этом количество попыток передачи одних и тех же данных ограничено некоторым значением R_A .

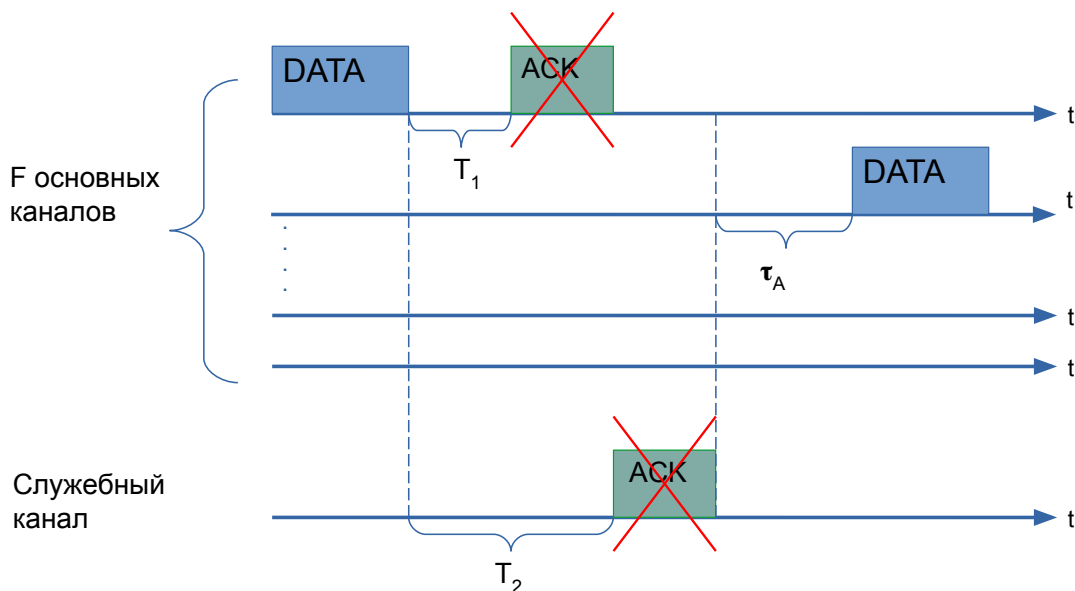


Рис. 4. Передача данных в режиме АСК для технологии LoRaWAN.

В режиме NoАСК (Рис. 5) сенсор R_N раз передает пакет с одними и теми же данными через случайную отсрочку τ_N , каждый раз выбирая случайный основной канал для передачи. В режиме NoАСК случайная отсрочка равномерно распределена в интервале времени $[0; T_{Rep}]$. Режим NoАСК не предполагает отправки подтверждений, поэтому сенсор после передачи не прослушивает канал.

3. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В научной литературе представлен ряд работ, сравнивающих технологии LoRaWAN и NB-Fi. Многие из них, например, работы [5, 6], сравнивают номинальные параметры между раз-

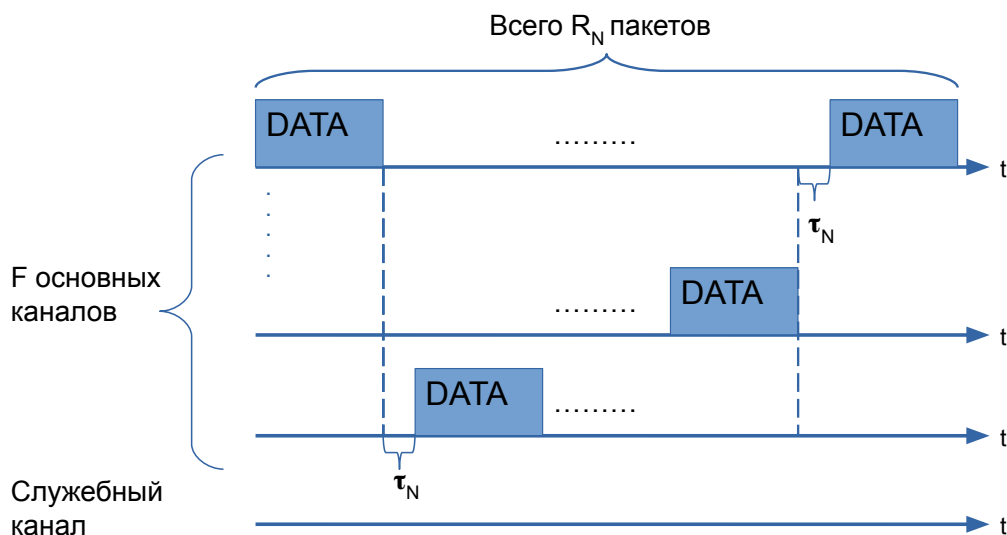


Рис. 5. Передача данных в режиме NoACK для технологии LoRaWAN.

личными LPWAN-технологиями, но при этом не оценивают, как показатели эффективности работы сетей будут зависеть от нагрузки на сеть. Более подробное сравнение с учетом нагрузки на сеть проведено в работе [7]. В ней сравниваются PLR, доля ошибочных пакетов и задержка в разных сценариях для таких LPWAN-технологий, как NB-Fi, Sigfox и LoRaWAN. Однако в данной работе не рассмотрен сценарий, где устройства могут работать в разных режимах работы, и не исследовано энергопотребление устройств.

Многие работы посвящены анализу отдельных технологий. Так, в работе [8] исследован метод доступа к каналу в сетях NB-Fi. Авторы разработали математическую модель передачи данных в сети NB-Fi, позволяющую оценить долю потерянных пакетов (англ.: Packet Loss Rate, PLR), долю ошибочных пакетов и задержку для режима ACK. Однако в данной статье не исследовано энергопотребление сенсоров, не учтено ограничение на рабочий цикл устройств и не рассмотрен режим NoACK.

Для обеспечения возможности одновременного сосуществования разных сетей в стандарте NB-Fi предусмотрен режим работы с прослушиванием несущей (англ.: Listen Before Talk, LBT). Сенсоры, работающие в режиме LBT, не обязаны выполнять ограничение на DC. В работах [9, 10] исследовано энергопотребление сенсоров NB-Fi, работающих в режиме LBT. Однако данный режим является опциональным и приводит к большему энергопотреблению, вследствие чего большинство устройств не используют LBT и вместо этого соблюдают ограничение на DC.

В [3] исследован сценарий работы сети NB-Fi, где часть устройств работает в режиме ACK, а остальная часть — в режиме NoACK. В данной работе на основе математической модели, описанной в [8], разработана математическая модель, позволяющая оценить долю потерянных пакетов, рабочий цикл и энергопотребление устройств. Также в данной работе разработан алгоритм для выбора доли устройств, работающих в режиме ACK, и количества попыток передач в режиме NoACK, при которых энергопотребление будет минимальным.

В работе [11] показано, что в сетях LoRaWAN увеличение доли сенсоров, работающих в режиме ACK, приводит к утрате возможности передачи данных из-за ограничения рабочего цикла, в результате чего не будет отправлено значительное количество подтверждений.

Это, в свою очередь, увеличивает количество повторных передач, что приводит к увеличению энергопотребления. Однако в данной статье не приводится алгоритм для снижения энергопотребления.

В статье [12] рассмотрены два режима работы сети LoRaWAN и учитывается ограничение на DC. Авторы данной работы представили математическую модель передачи данных в сети LoRaWAN, позволяющую оценить пропускную способность и вероятность некорректной доставки пакета. В результате выяснено, что увеличение доли сенсоров, работающих в режиме АСК, приводит к снижению производительности сети. Однако в данной работе не рассматривалось энергопотребление устройств и не решалась задача выбора числа попыток передачи в режиме NoACK и доли устройств, передающих с подтверждениями, для удовлетворения требований на PLR и минимизации энергопотребления.

В работе [13] представлена математическая модель сети LoRaWAN для оценки вероятности успешной доставки пакета в зависимости от интенсивности генерации данных в режиме АСК. Данная модель расширена в [4] для описания работы сети LoRaWAN, где часть устройств работает в режиме АСК, а остальная часть — в режиме NoACK. Разработанная математическая модель позволяет найти PLR, DC и энергопотребление устройств, на её основе разработан алгоритм настройки сети, минимизирующий энергопотребление устройств при выполнении ограничений на PLR и DC.

Таким образом, для технологий NB-Fi и LoRaWAN разработаны алгоритмы выбора доли устройств, работающих в режиме АСК, и числа попыток передачи для устройств, работающих в режиме NoACK, для минимизации энергопотребления сенсоров при обеспечении требуемой надежности доставки и DC. Нерешённой задачей остаётся сравнение энергопотребления сетей NB-Fi и LoRaWAN при использовании данных алгоритмов.

4. СЦЕНАРИЙ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В данной работе рассматривается следующий сценарий. Пусть M сенсоров равномерно распределены в круге радиуса r , в центре которого находится базовая станция. Сенсоры генерируют данные в соответствии с потоком Пуассона с суммарной интенсивностью Λ . Сенсоры делятся на две группы по способу передачи кадров. Доля сенсоров x_A передает данные в режиме АСК, где максимальное число попыток передачи составляет R_A . Остальная доля сенсоров передает данные в режиме NoACK, где каждый пакет передается R_N раз.

В сетях LoRaWAN в основных каналах данные и подтверждения передаются на одной сигнально-кодовой конструкции (СКК). В служебном канале используется самая надежная СКК.

В сетях NB-Fi все сенсоры передают данные на одной скорости. В работе [8] показано, что с точки зрения PLR наиболее выгодно использовать одну скорость, доступную всем сенсорам в сети. Поскольку рассматривается сценарий с большим радиусом сети r , по умолчанию считаем, что сенсоры передают данные на самой низкой скорости — 50 бит/с.

На каждом сенсоре присутствует буфер, вмещающий в себя один пакет. Во время генерации пакет записывается в буфер. Если во время генерации сенсор ничего не передает, то он сразу же приступает к передаче сгенерированного пакета. Если во время генерации сенсор занят передачей, то после ее окончания сенсор извлекает пакет из буфера и приступает к его передаче. Если при генерации пакета в буфере уже есть пакет, то старый пакет вытесняется, а на его место помещается новый. Будем считать, что передача успешна, если соотношение сигнал-интерференция-шум превосходит некоторое значение $SINR^*$.

В сетях NB-Fi случайная отсрочка между передачами кадров с повторами распределена равномерно в интервале $[0; T_{Rep}]$, где считается, что $T_{Rep} = T_{BO}$ (см. таблицу 1).

В сетях используются алгоритмы, описанные в [3] и [4] устанавливающие долю сенсоров x_A , работающих в режиме АСК, и количество попыток передачи R_N для режима NoАСК так, чтобы DC базовой станции не превышал ограничение DC^* , PLR не превышал ограничение PLR^* а энергопотребление сетей NB-Fi и LoRaWAN при этом было минимальным. В работе ставится задача сравнить энергопотребление сетей NB-Fi и LoRaWAN при такой оптимальной настройке.

5. ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ЗАДАЧА И АЛГОРИТМ ЕЁ РЕШЕНИЯ

Задачу выбора параметров x_A и R_N можно переписать в виде оптимизационной задачи с ограничениями

$$\begin{aligned} \min_{x_A, R_N} \quad & E(\Lambda, x_A, R_N), \\ \text{s.t.} \quad & DC(\Lambda, x_A, R_N) \leq DC^*, \\ & PLR(\Lambda, x_A, R_N) \leq PLR^*, \end{aligned} \quad (1)$$

где $E(\Lambda, x_A, R_N)$, $DC(\Lambda, x_A, R_N)$ и $PLR(\Lambda, x_A, R_N)$ — среднее энергопотребление сенсора на успешно переданный кадр, DC и PLR, соответственно, при интенсивности трафика Λ , доле сенсоров, передающих в режиме АСК x_A , и количеству повторов в режиме NoАСК R_N .

Для решения данной оптимизационной задачи с учётом зависимостей энергопотребления, DC и PLR от Λ , x_A и R_N , в работах [3] и [4] были сформулированы алгоритмы выбора параметров x_A и R_N , которые можно обобщить для NB-Fi и LoRaWAN следующим образом (алгоритм 1).

Алгоритм 1 Алгоритм для выбора x_A и R_N

Require: Λ , DC^* , PLR^*

Ensure: x_A , R_N

```

1: if  $PLR(\Lambda, x_A = 0, R_N = 1) \leq PLR^*$  then
2:    $x_A \leftarrow 0, R_N \leftarrow 1$ 
3:   return  $x_A, R_N$ 
4: else
5:   Найти  $\widehat{x_A}$  как  $\min \{x_A : DC(\Lambda, x_A, R_N = 1) \leq DC^* \wedge PLR(\Lambda, x_A, R_N = 1) \leq PLR^*\}$ 
6:   if Такое  $\widehat{x_A}$  существует then
7:      $x_A \leftarrow \widehat{x_A}, R_N \leftarrow 1$ 
8:     return  $x_A, R_N$ 
9:   else
10:    for  $\widehat{R_N} = 2$  до  $R_N^{max}$  do
11:      Найти  $\widehat{x_A}$  как  $\max \{x_A : DC(\Lambda, x_A, \widehat{R_N}) \leq DC^* \wedge PLR(\Lambda, x_A, \widehat{R_N}) \leq PLR^*\}$ 
12:      if Такое  $\widehat{x_A}$  существует then
13:         $x_A \leftarrow \widehat{x_A}, R_N \leftarrow \widehat{R_N}$ 
14:        return  $x_A, R_N$ 
15:    return Невозможно выполнить ограничение на  $PLR$  и  $DC$ 
```

Алгоритм 1 получает на вход значения интенсивности трафика Λ и ограничения DC^* и PLR^* . Если $PLR(\Lambda, x_A = 0, R_N = 1) \leq PLR^*$, то минимальное энергопотребление обеспечивается, когда все устройства работают в режиме NoАСК и передают один раз, т.е. нужно назначить $x_A = 0$, $R_N = 1$. Если данное условие не выполняется, то нужно проверить, возможно ли выполнение ограничений на PLR и DC при $R_N = 1$. Для минимизации энергопотребления при $R_N = 1$ необходимо найти минимальное значение x_A , при котором выполняются неравенства $PLR(\Lambda, x_A, R_N = 1) \leq PLR^*$ и $DC(\Lambda, x_A, R_N = 1) \leq DC^*$. Если такое x_A существует, то искомые значения x_A и $R_N = 1$ для минимизации энергопотребления найдены.

Таблица 2. Энергопотребление сенсоров NB-Fi

Действие	Мощность, мВт	Время, с	Энергопотребление, мДж
Передача кадра	174,9	5,76	1007,42
Прием подтверждения	66	5,76	380,16
Прослушивание канала при ожидании подтверждения	66	60	3960

Если ограничение на DC не выполняется, то нужно перейти к большему числу повторов. Последовательно увеличиваем R_N от 2 до R_N^{max} и при рассматриваемом R_N для минимизации энергопотребления необходимо найти максимальное значение x_A такое, что $DC(\Lambda, x_A, \bar{R}_N) \leq DC^*$ и $PLR(\Lambda, x_A, R_N = 2) \leq PLR^*$. Если такое x_A существует, то искомые значения x_A и R_N найдены. Если R_N достигло значения R_N^{max} и при этом не существует значения x_A , удовлетворяющего DC и PLR, то невозможно подобрать такие R_N и x_A , при которых одновременно выполняются ограничения на PLR и DC.

6. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

6.1. Параметры моделирования

Сравним минимальное энергопотребление сенсоров, полученное при настройке с помощью алгоритма, описанного в разделе 5. Сравнение будем проводить для сетей NB-Fi и LoRaWAN с радиусом зоны покрытия 1 км, состоящих из $M = 1000$ сенсоров. Сенсоры передают сигналы с мощностью 14 дБм, затухание сигнала вычисляется с использованием модели Окамуры-Хата [14]. По умолчанию считаем, что ограничение на долю потерянных пакетов составляет $PLR^* = 10^{-3}$. Ограничение на рабочий цикл (для LoRaWAN в основном канале) составляет $DC^* = 10\%$, что соответствует типичному ограничению на рабочий цикл базовых станций, работающих в Европе в диапазоне частот 863-870 МГц.

Для сетей NB-Fi аналогично работе [8] считаем, что передача успешна, если соотношение сигнал-интерференция-шум превосходит $SINR^* = 7$ дБ. Согласно [15] для прослушивания канала (при отсутствии подтверждения), передачи и приема кадров потребляется мощность, приведенная в таблице 3. Также в таблице приведено время, затрачиваемое для выполнения этих действий и рассчитано потребление энергии.

Для сетей LoRaWAN случайная отсрочка τ_A для режима АСК равномерно распределена в интервале $[a; b]$, и, согласно спецификации, $a = 1$ с, $b = 3$ с. Случайная отсрочка τ_N для режима NoАСК равномерно распределена в интервале времени $[0; T_{Rep}]$, где $T_{Rep} = 2$ с. Также, согласно спецификации, $T_1 = 1$ с, $T_2 = 2$ с. Максимальное число попыток передачи в режиме АСК равно $R_A = 8$.

Считаем, что в сети LoRaWAN на рассматриваемой скорости передача успешна, если соотношение сигнал-интерференция-шум больше $SINR^* = -7,5$ дБ. Значения мощностей для прослушивания канала, передачи и приема пакета определены в [16] и приведены в таблице 3. Считаем, что для прослушивания канала во время окна приема подтверждения затрачивается та же мощность, что и для приема пакета. Конкретные продолжительности окон приема подтверждения не определены в спецификации, однако сказано, что они должны быть достаточными, чтобы определить преамбулу пакета подтверждения. Будем считать, что длительность прослушивания канала равна длительности преамбулы. Все длительности были вычислены согласно [17]. Также в таблице 3 рассчитано энергопотребление для передачи, приема кадра, а также прослушивания канала в служебном и основном каналах.

Для сравнения в похожих условиях, установим ширину рабочей полосы в восходящем канале для NB-Fi 409,6 кГц, а для LoRaWAN в восходящем канале выделим 3 полосы с шириной

Таблица 3. Энергопотребление сенсоров LoRaWAN

Действие	Мощность, мВт	Время, с	Энергопотребление, мДж
Передача в основном канале	419,60	0,107	44,90
Прием в основном канале	44,06	0,039	1,72
Прослушивание в основном канале	44,06	0,013	0,57
Передача в служебном канале	419,60	2,990	1254,60
Прием в служебном канале	44,06	1,090	48,03
Прослушивание в служебном канале	44,06	0,401	17,67

по 125 кГц. В нисходящем канале используется рабочая полоса шириной 102,4 кГц для NB-Fi и шириной 125 кГц для LoRaWAN.

6.2. Результаты моделирования

Для наиболее честного сравнения скорости передачи в LoRaWAN и NB-Fi были выбраны примерно одинаковыми: 400 бит/с для NB-Fi и 440 бит/с для LoRaWAN. Максимальный размер полезной нагрузки для одного пакета в технологии NB-Fi составляет 8 байт, поэтому сначала рассмотрим сети LoRaWAN и NB-Fi, в которых сенсоры передают 8 байт полезной нагрузки. На рисунке 6 представлена зависимость энергопотребления от интенсивности для сетей NB-Fi и LoRaWAN.

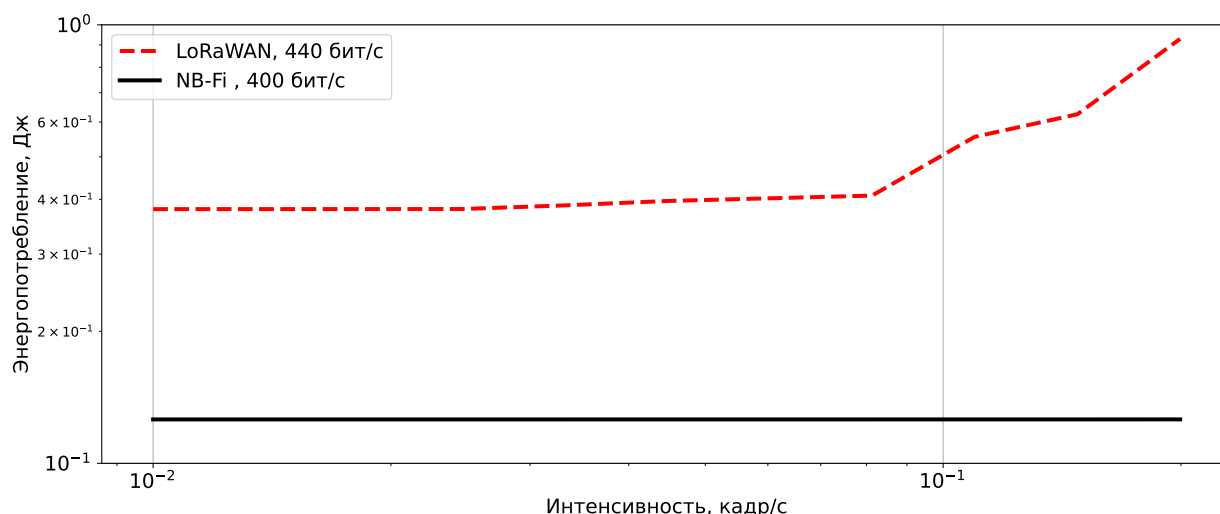


Рис. 6. Зависимость энергопотребления устройств от интенсивности при сравнимых скоростях и полезной нагрузке 8 байт.

Как можно ожидать, энергопотребление сенсоров растёт с увеличением интенсивности трафика, при этом на графике заметны изломы, которые соответствуют смене параметров x_d и R_N . При этом рост энергопотребления NB-Fi практически не заметен на фоне роста энергопотребления для LoRaWAN. Из рисунка видно, что при рассматриваемых условиях для любой интенсивности лучше использовать технологию NB-Fi: при малой интенсивности трафика энергопотребление сенсоров NB-Fi почти в два раза ниже, чем для LoRaWAN, и с ростом интенсивности разница растёт. Такое различие в значениях энергопотребления для технологий NB-Fi и LoRaWAN связаны с разным номинальным энергопотреблением устройств и с тем, что в NB-Fi ниже накладные расходы на передачу кадров.

Для многих приложений требуется передавать данные размером более 8 байт. Максимальная полезная нагрузка, которую может передать сенсор LoRaWAN на самой низкой скорости — 56 байт. Искусственно увеличим максимальный размер полезной нагрузки для NB-Fi и рассмотрим теперь случай, где размер полезной нагрузки одинаков для обеих технологий и составляет 56 байт. Численные результаты для обеих технологий приведены на Рис. 7. Из графика видно, что до интенсивности, примерно равной 0,03 кадра/с, для технологии LoRaWAN энергопотребление незначительно ниже, чем у NB-Fi. Затем с увеличением интенсивности энергопотребление LoRaWAN стремительно растет, в то время как энергопотребление NB-Fi незначительно возрастает в процессе смены параметров x_A и R_N . Данные изменения не заметны на графике, поскольку рост энергопотребления NB-Fi намного меньше, чем у LoRaWAN. Таким образом, при большом размере кадров, когда накладные расходы на передачу становятся менее существенными, LoRaWAN может достичь меньшего энергопотребления, чем NB-Fi.

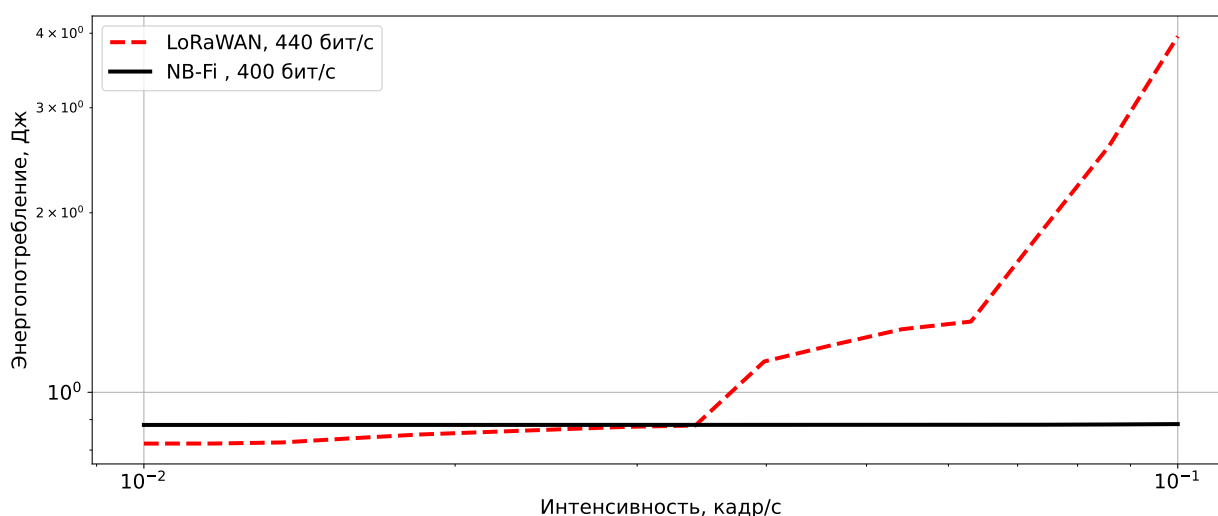


Рис. 7. Зависимость энергопотребления устройств от интенсивности при сравнимых скоростях и полезной нагрузке 56 байт.

Чтобы достичь в сети LoRaWAN энергопотребления, сравнимого с энергопотреблением сети NB-Fi, необходимо увеличить скорость передачи данных в сети LoRaWAN. Заметим, что при этом максимальное расстояние, на которое возможна передача данных, будет ниже. Так, на рис. 8 показано энергопотребление при скорости передачи 400 бит/с для NB-Fi и 980 бит/с для LoRaWAN. Из графика видно, что при малой интенсивности трафика LoRaWAN достигает почти в три раза меньшего энергопотребления, чем NB-Fi. При росте интенсивности трафика разница в энергопотреблении уменьшается, и при интенсивности, примерно равной 0,15 кадров/с достигает нуля. При дальнейшем росте интенсивности LoRaWAN потребляет больше энергии на передачу кадра, чем NB-Fi. Возрастание энергопотребления LoRaWAN связано с ростом интенсивности трафика и, как следствие, с увеличением доли x_A , а затем и с увеличением количества попыток передачи R_N . Заметим, что при рассматриваемых параметрах возрастание энергопотребления для NB-Fi связано с увеличением доли x_A при одной попытке передачи.

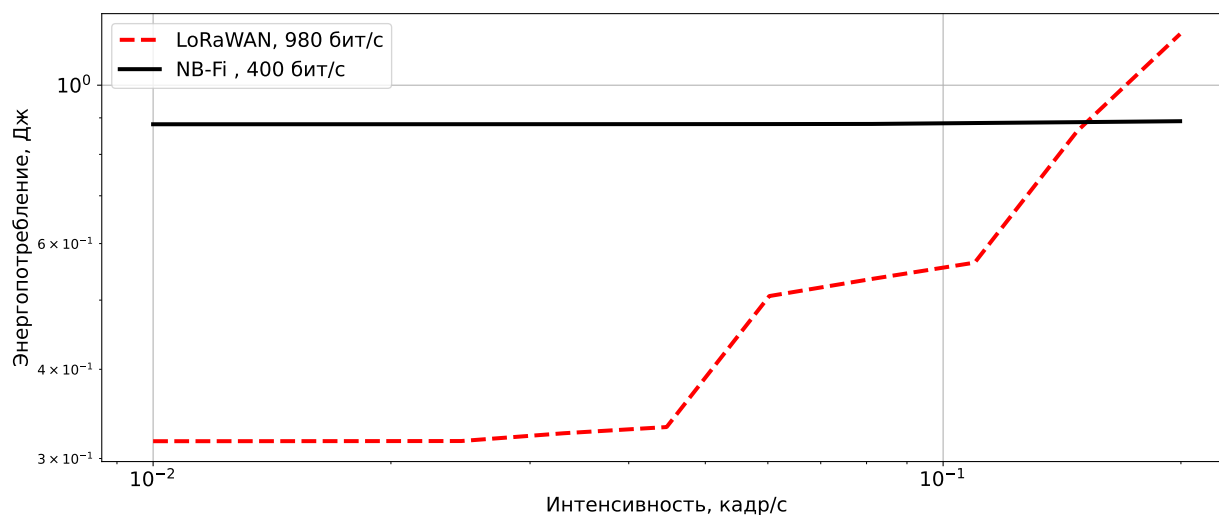


Рис. 8. Зависимость энергопотребления устройств от интенсивности при различных скоростях и полезной нагрузке 56 байт.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведено сравнение энергопотребления сенсоров в сетях LoRaWAN и NB-Fi, в которых параметры передачи устанавливаются так, чтобы выполнялись ограничения на долю потерянных пакетов и на рабочий цикл базовой станции. Выяснено, что технология NB-Fi позволяет достичь наименьшего энергопотребления при передаче очень коротких пакетов и при высокой интенсивности трафика. Технология LoRaWAN позволяет достичь наилучшего энергопотребления при передаче больших пакетов и при низкой интенсивности трафика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 70036-2022 Информационные технологии. Интернет вещей. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi) : 2022.
2. ГОСТ Р 71168-2023 Информационные технологии. Интернет вещей. Спецификация LoRaWAN RU : 2024.
3. Федорищева А.А., Левченко П.А., Банков Д.В. Снижение энергопотребления устройств при ограничении на рабочий цикл в сетях NB-Fi // Сборник трудов 47-й междисциплинарной школы-конференции ИПФИ РАН «Информационные технологии и системы 2023». — 2023. — С. 459–474.
4. Reducing energy consumption in LoRaWAN networks with duty cycle limitation / Fedorishcheva A., Bankov D., Lyakhov A., and Khorov E. // Problems of Information Transmission. — 2025. — Vol. 60, no. 1. — P. 56–71.
5. Low-power wide area network technologies for Internet-of-Things: A comparative review / Ikpehai Augustine, Adebisi Bamidele, Rabie Khaled M, Anoh Kelvin, Ande Ruth E, Hammoudeh Mohammad, Gacanin Haris, and Mbanaso Uche M // IEEE Internet of Things Journal. — 2018. — Vol. 6, no. 2. — P. 2225–2240.
6. 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.
7. Performance comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN / Levchenko Polina, Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // Sensors. — 2022. — Vol. 22, no. 24. — P. 9633.

8. On the Limits and Best Practice for NB-Fi: a New LPWAN Technology / Bankov Dmitry, Levchenko Polina, Lyakhov Andrey, and Khorov Evgeny // IEEE Internet of Things Journal. — 2023. — P. 12352–12365.
9. On the efficiency of carrier sense multiple access in NB-Fi Networks / Bankov Dmitry, Lyakhov Andrey, Pavlova Irina, and Khorov Evgeny // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2022. — Vol. 67, no. 1. — P. S93–S99. — Access mode: <https://link.springer.com/article/10.1134/S1064226922130010>.
10. On the Benefits of Listen Before Talk Scheme for NB-Fi Networks / Pavlova Irina, Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, and Lyakhov Andrey // Sensors. — 2023. — Vol. 23, no. 22. — Access mode: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/22/9054>.
11. Does bidirectional traffic do more harm than good in LoRaWAN based LPWA networks? / Pop Alexandru-Ioan, Raza Usman, Kulkarni Parag, and Sooriyabandara Mahesh // GLOBECOM 2017-2017 IEEE Global Communications Conference / IEEE. — 2017. — P. 1–6.
12. Centenaro Marco, Vangelista Lorenzo, Kohno Ryuji. On the impact of downlink feedback on LoRa performance // 2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) / IEEE. — 2017. — P. 1–6.
13. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. Mathematical model of LoRaWAN channel access with capture effect // 2017 IEEE 28th annual international symposium on personal, indoor, and mobile radio communications (PIMRC) / IEEE. — 2017. — P. 1–5.
14. 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.
15. Datasheet Low Power Ultra Long Range Transceiver : 2022.
16. Duda Andrzej, To Thanh-Hai. Simulation of LoRa in NS-3: improving LoRa performance with CSMA // IEEE ICC. — 2018.
17. Corporation Semtech. — SX1276/77/78/79—137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver : 2016.

Comparison of Device Energy Consumption in NB-Fi and LoRaWAN Networks With Limited Duty Cycle and Packet Loss Rate

A. A. Fedorishcheva, D. V. Bankov, A. V. Barannikov, R. A. Zlobin,
E. A. Stepanova, A. A. Tretiakov

Development of the Internet of Things has given rise to new technologies to build Low Power Wide Area Networks (LPWANs), and it is a relevant task to compare different LPWAN technologies and to select the most efficient ones for different scenarios. In this paper we compare NB-Fi and LoRaWAN: two LPWAN technologies that use unlicensed frequency bands and are standardized as Russian National Standards (GOST). We compare NB-Fi and LoRaWAN by the minimal energy consumption of end devices that can be achieved if we configure the network to satisfy the restrictions on the maximal packet loss rate and duty cycle. We show that LoRaWAN achieves the lowest energy consumption while transmitting long packets at low traffic rate, while NB-Fi achieves the lowest energy consumption in the remaining cases.

KEYWORDS: NB-Fi, LoRaWAN, PLR, energy consumption, duty cycle.