

УДК 621.391 : 004.725.5

© 2024 г. А.А. Федорищева, Д.В. Банков, А.И. Ляхов, Е.М. Хоров

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ LoRaWAN
ПРИ СОВМЕСТНОМ ОБСЛУЖИВАНИИ ПОДТВЕРЖДАЕМОГО
И НЕПОДТВЕРЖДАЕМОГО ТИПОВ ТРАФИКА¹**

LoRaWAN является одной из самых популярных энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия. Ключевым требованием в таких сетях является низкое энергопотребление. Для его уменьшения в данной статье разработан алгоритм выбора параметров сети. В алгоритме учитывается, что сенсоры могут передавать данные как с подтверждениями, так и без них. Также в алгоритме принимается во внимание ограничение на рабочий цикл.

Ключевые слова: LoRaWAN, LPWAN, математическое моделирование, энергопотребление, рабочий цикл.

DOI: 10.31857/S055529232404003X, **EDN:** ONDBON

§ 1. Введение

С каждым годом Интернет вещей (англ.: Internet of Things, IoT) набирает все большую популярность. Так, согласно [1], в 2021 г. число IoT-устройств превысило 10 млрд, и ожидается, что к 2030 г. число таких устройств возрастет более чем в два раза. Такой стремительный рост Интернета вещей привел к развитию беспроводных технологий с низким энергопотреблением, в частности, технологий энергоэффективных сетей дальнего радиуса действия (англ.: low-power wide-area network, LPWAN). Одной из наиболее популярных и известных во всем мире LPWAN-технологий является LoRaWAN, которая и исследуется в данной статье.

В сценариях развертывания сетей LoRaWAN часто необходимо обеспечивать доставку данных с заданной надежностью, т.е. с ограничением на долю потерянных пакетов (англ.: packet loss ratio, PLR) и с минимальным энергопотреблением конечных устройств (далее – сенсоров). Для обеспечения надежности передачи данных в технологии LoRaWAN может использоваться два режима передачи: с подтверждениями (в дальнейшем этот режим работы упоминается как режим ACK) и с безусловными повторами, но без подтверждений (в дальнейшем упоминается как режим NoACK). С одной стороны, использование режима ACK предпочтительнее, потому что в режиме NoACK 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 сеть LoRaWAN работает 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 ACK, может возникнуть ситуация, когда для отправки подтверждений

¹ Исследование выполнено в рамках Госзадания № FFNU-2022-0035 ИППИ РАН.

на все получаемые кадры базовая станция должна будет нарушить ограничение на рабочий цикл. Чтобы этого не допустить, требуется ограничивать интенсивность подтверждаемого трафика.

Таким образом, интенсивность трафика в режиме АСК не должна превышать некоторого значения, зависящего от ограничения на рабочий цикл, а в режиме NoАСК сенсоры потребляют большое количество энергии. Для того чтобы снизить среднее энергопотребление устройств в сети, предлагается некоторой доле устройств назначить режим АСК, а оставшейся доле – NoАСК. В данной статье ставится задача нахождения доли устройств, работающих в режиме АСК, и количества попыток передач в режиме NoАСК, при которых среднее энергопотребление сенсоров на передачу пакета будет минимальным и будут выполняться ограничения на рабочий цикл и PLR. Подобная задача рассматривалась для сетей LoRaWAN [2–4] и NB-Fi [5], однако в этих работах не приводится алгоритм выбора минимального энергопотребления.

Далее в § 2 описан протокол LoRaWAN, в § 3 описан исследуемый сценарий. В § 4 представлена математическая модель, в § 5 обсуждаются численные результаты, полученные с помощью имитационной модели, и приводится описание алгоритма для снижения энергопотребления, в § 6 представлено заключение.

§ 2. Описание протокола LoRaWAN

Сеть LoRaWAN состоит из сервера, базовых станций и сенсоров и имеет топологию “звезда из звезд”. Взаимодействие сенсора и базовой станции происходит через основные и служебный каналы. В основном канале данные могут передаваться как в восходящем направлении, так и в нисходящем. Служебный канал предназначен только для передачи подтверждений. Обычно ограничение на рабочий цикл составляет 1% в основных каналах и 10% в служебных каналах. Для передачи сенсор выбирает один основной канал из F непересекающихся каналов и там осуществляет передачу данных.

Для обеспечения надежной доставки могут использоваться режимы работы с подтверждениями (АСК) и без подтверждений (NoАСК). В режиме АСК базовая станция после получения данных отправляет два подтверждения: одно в основном канале, а другое – в служебном. Первое окно приема подтверждения в основном канале открывается через время T_1 (равное 1 с) после завершения отправки данных. Второе окно приема открывается в служебном канале через время T_2 (равное 2 с) после конца отправки данных. При неуспешной попытке передачи данные повторно отправляются через время τ_A , равномерно распределенное в интервале $[a, b]$. Количество попыток передач ограничено значением R_A .

В режиме NoАСК 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 $[0; T_{\text{Rep}}]$. Режим NoАСК не предполагает отправки подтверждений.

Оба этих режима работы имеют свои плюсы и минусы. Так, режим АСК позволяет не отправлять лишние пакеты с данными, что экономит энергопотребление сенсора и ресурсы канала. Но в то же время при высокой интенсивности трафика нельзя настроить все сенсоры для работы в режиме АСК из-за ограничения на рабочий цикл, поэтому целесообразно передавать часть трафика в режиме NoАСК.

§ 3. Сценарий и постановка задачи

Рассмотрим следующий сценарий работы сети LoRaWAN. Пусть M сенсоров равномерно распределены в круге радиуса r , в центре которого находится базовая станция [6]. Сенсоры генерируют пакеты данных одинакового размера в моменты вре-

мени, соответствующие потоку Пуассона [7] с суммарной интенсивностью Λ . Они делятся на две группы по способу передачи кадров. Доля сенсоров x_A передает данные в режиме АСК, где максимальное число попыток передач составляет R_A . Оставшаяся доля сенсоров передает данные в режиме NoАСК, где каждый пакет передается R_N раз.

В основных каналах данные и подтверждения передаются на одной сигнально-кодовой конструкции (СКК) [8]. В служебном канале используется самая надежная из доступных СКК (DR0).

На каждом сенсоре присутствует буфер, вмещающий в себя один пакет. Во время генерации пакет записывается в буфер. Если при генерации пакета в буфере уже есть пакет, то старый пакет вытесняется, а на его место помещается новый. Сенсор изымает пакет из буфера и начинает его передачу, если он не передает какой-либо другой пакет или если заканчивается попытка передачи предыдущего пакета.

В данной статье требуется разработать алгоритм для поиска доли сенсоров x_A , работающих в режиме АСК, и количества попыток передач R_N для режима NoАСК, минимизирующих среднее энергопотребление сенсоров так, чтобы рабочий цикл базовой станции не превышал ограничение DC^* , а PLR не превышал ограничение PLR^* .

Таким образом, задачу поиска таких значений x_A и R_N можно записать следующим образом:

$$\min_{x_A, R_N} E(\Lambda, x_A, R_N) \quad (1)$$

при условиях $DC(\Lambda, x_A, R_N) \leq DC^*$, $PLR(\Lambda, x_A, R_N) \leq PLR^*$,

где $E(\Lambda, x_A, R_N)$ – среднее энергопотребление сенсора на успешную передачу пакета, $PLR(\Lambda, x_A, R_N)$ – доля потерянных пакетов и $DC(\Lambda, x_A, R_N)$ – рабочий цикл базовой станции.

§ 4. Математическая модель

Здесь приводится математическая модель, позволяющая оценить долю потерянных пакетов, рабочий цикл базовой станции и энергопотребление сенсоров в сети LoRaWAN. За основу взята математическая модель из работы [4], которая была расширена для режима NoАСК. Также был использован подход из [5] с некоторыми изменениями, учитывающими метод доступа к каналу в сети LoRaWAN. Все формулы выводятся в предположении малой интенсивности трафика.

В модели величины, относящиеся к режиму АСК, обозначены индексом A , а величины, относящиеся к режиму NoАСК, обозначены индексом N . Индекс N/A означает, что после подстановки N или A получается величина, соответствующая режиму NoАСК или АСК.

Далее в п. 4.1 рассчитывается вероятность успешной доставки кадра. В п. 4.2 определяется вероятность того, что сенсор начнет передачу кадра. В п. 4.3 представлены формулы для расчета доли потерянных пакетов. В п. 4.4 оценивается энергопотребление, а в п. 4.5 – рабочий цикл.

4.1. Вероятность успешной доставки кадра. Суммарная интенсивность генерации кадров для передачи с учетом двух режимов работы рассчитывается как

$$\lambda = \Lambda x_A + \Lambda(1 - x_A)R_N. \quad (2)$$

Вероятности успешной первой попытки передачи будут одинаковыми для режимов АСК и NoАСК, т.е.

$$P_{S,ini}^A = P_{S,ini}^N = P_{S,ini},$$

где $P_{S,ini}$ определяется по результатам работы [4, раздел IV-A] с подстановкой суммарной интенсивности (2). Вероятность успешной повторной передачи $P_{S,re}^A$ для режима АСК определяется, как и в [4, раздел IV-B], с подстановкой интенсивности (2).

Вероятность успешного повтора после неудачной попытки передачи в режиме работы NoASK равна

$$P_{S,re}^N = \frac{\left(x_A + R_N(1 - x_A) \left((1 - P^c) \frac{R_N - 1}{R_N} + \frac{1}{R_N}\right)\right) P_{S,ini}^N}{x_A + (1 - x_A) R_N}, \quad (3)$$

где P^c – вероятность возникновения повторной коллизии для кадров, передаваемых после случайной отсрочки, которая определяется из работы [4]. Первое и второе слагаемые в скобках описывают повтор после коллизии, которая произошла с пакетом, передаваемым в режиме АСК и NoASK соответственно. После коллизии с пакетом, который передавался в режиме АСК, вероятнее всего больше не будет пересечения с этим пакетом. Это связано с тем, что время, через которое произойдет повторная попытка передачи в режиме АСК больше, чем время, через которое происходит повтор в режиме NoASK. Поэтому вероятность успешной передачи равна $P_{S,ini}^N$. Коллизия с пакетом, передаваемым в режиме NoASK, может вызвать пересечение их повторных пакетов, поскольку интервалы времен, в течение которых происходит повторная передача, пересекаются. В связи с этим повторной коллизии не будет с вероятностью

$$(1 - P^c) \frac{R_N - 1}{R_N},$$

где $\frac{R_N - 1}{R_N}$ означает, что у пакета, с которым была коллизия, в предыдущий раз была не последняя попытка передачи, т.е. будет по крайней мере еще одна попытка передачи, которая снова вызовет коллизию. Если до текущей повторной отправки была коллизия с пакетом, у которого была последняя попытка передачи, то коллизии с этим пакетом больше не будет, т.е. с вероятностью

$$\frac{1}{R_N} P_{S,ini}^N$$

будет успешная повторная попытка передачи.

4.2. Вероятность начала обслуживания кадра. Согласно сценарию буфер сенсора вмещает в себя только один кадр. Если новый кадр генерируется во время передачи текущего кадра, то после окончания попытки передачи старый кадр удаляется и начинается обслуживание нового. Если до окончания попытки передачи генерируется несколько новых кадров, то все кадры, кроме самого нового, отбрасываются. Найдем вероятность того, что кадр не будет отброшен до начала его передачи:

$$P_{start}^{N/A} = (1 - P_{busy}^{N/A}) + P_{busy}^{N/A} \times \left(P_{ini}^{N/A} P_{buf}(T_{ini}^{N/A}) + P_{re}^{N/A} P_{buf}(T_{re}^{N/A})\right), \quad (4)$$

где $P_{busy}^{N/A}$ – вероятность того, что во время генерации сенсор занят передачей пакета, $P_{ini}^{N/A}$ и $P_{re}^{N/A}$ – вероятности того, что при этом текущая попытка передачи является первой и повторной соответственно, $P_{buf}(T)$ – вероятность того, что в течение времени T пакет не удалится из буфера, $T_{ini}^{N/A}$ и $T_{re}^{N/A}$ – продолжительности первой и повторной попытки передачи соответственно. Первое слагаемое описывает случай, когда сенсор сгенерировал пакет в тот момент, когда не было передачи другого пакета, т.е. пакет сразу же начал передаваться, как только он был сгенерирован. С вероятностью $P_{busy}^{N/A}$ сенсор занят передачей пакета, поэтому новый пакет будет

помещен в буфер. В этом случае сенсор передает пакет из буфера, если на сенсоре больше не было сгенерировано пакетов во время передачи пакета. Текущая попытка передачи является первой с вероятностью $P_{\text{ini}}^{N/A}$ и повторной с вероятностью $P_{\text{re}}^{N/A}$. Найдем данные величины.

Вероятность того, что во время генерации сенсор занят передачей другого пакета, можно найти как отношение задержки передачи пакета $D^{N/A}$ к среднему времени генерации $\frac{M}{\Lambda}$, где M – количество сенсоров:

$$P_{\text{busy}}^{N/A} = \min \left\{ \frac{\Lambda D^{N/A}}{M}, 1 \right\}. \quad (5)$$

Задержка D^N в режиме NoACK определяется аналогично [5]:

$$D^N = T_{\text{Data}} + \mathbb{1}\{R_N > 1\} \times P_{G,\text{ini}}^N \sum_{i=0}^{R_N-2} (P_{G,\text{re}}^N)^i \left(T_{\text{Data}} + \frac{T_{\text{Rep}}}{2} \right), \quad (6)$$

где $\mathbb{1}\{\dots\}$ – индикаторная функция, которая равна 1, если условие в скобках выполняется, и равна 0, если условие не выполняется, T_{Data} – длительность кадра с данными, $\frac{T_{\text{Rep}}}{2}$ – средняя отсрочка в режиме NoACK, $P_{G,\text{ini}}^N$ и $P_{G,\text{re}}^N$ – вероятности того, что во время первой и повторной попытки передачи, соответственно, на сенсоре не сгенерируется новый кадр. Эти величины вычисляются так же, как и в [5, п. 5.2].

Вычислим задержку для режима ACK. Если была успешная попытка передачи, то задержка вычисляется как

$$D_S^A = T_{\text{Data}} + P_{\text{Ack1}} (T_1 + T_{\text{Ack}}) + (1 - P_{\text{Ack1}}) (T_2 + T_{\text{Ack0}}), \quad (7)$$

где T_{Ack} и T_{Ack0} – длительности кадров подтверждения в основном и служебном канале соответственно, P_{Ack1} – вероятность доставки первого подтверждения, которая находится как в [4, раздел IV-A] с подстановкой суммарной интенсивности (2). Средняя задержка после неуспешной попытки передачи вычисляется как

$$D_{\text{Re}}^A = T_{\text{Data}} + T_2 + T_{\text{listen0}} + \frac{a+b}{2}, \quad (8)$$

где T_{listen0} – длительность окна приема в служебном канале, $\frac{a+b}{2}$ – среднее время, через которое будет совершена повторная попытка передачи.

Итоговая формула для вычисления задержки имеет следующий вид:

$$D^A = D_S^A + \mathbb{1}\{R_A > 1\} \times (1 - P_{S,\text{ini}}^A) P_{S,\text{re}}^A P_{G,\text{ini}}^A \times \\ \times \sum_{i=1}^{R_A-1} i D_{\text{re}}^A ((1 - P_{S,\text{re}}^A) P_{G,\text{re}}^A)^{i-1}, \quad (9)$$

где $P_{G,\text{ini}}^A$ и $P_{G,\text{re}}^A$ – вероятности того, что во время первой и повторной попыток передач, соответственно, не будут сгенерированы новые пакеты с данными в режиме ACK. Данные величины вычисляются так же, как и в [4]. Здесь первое слагаемое – задержка при успешной попытке передачи. Второе слагаемое – время, затрачиваемое на повторные попытки передачи. При доставке после i повторных попыток передачи к задержке добавляется $i D_{\text{re}}^A$, при этом вероятность такого события равна произведению вероятности не доставить кадр с первой попытки $(1 - P_{S,\text{ini}}^A)$ и во время $i-1$ повторных попыток $((1 - P_{S,\text{re}}^A)^{i-1})$, но доставить на i -й повторной попытке

ке $(P_{S, \text{re}}^A)$, и при этом учитывается, что во время всех повторных попыток передачи кадр не был вытеснен новым кадром $(P_{G, \text{ini}}^A (P_{G, \text{re}}^A)^{i-1})$.

Согласно [5] вероятность $P_{\text{buf}}(T)$ того, что в течение времени T пакет не удалится из буфера, рассчитывается как

$$P_{\text{buf}}(T) = \frac{M}{\Lambda \times T} (1 - e^{-\frac{\Lambda}{M} T}). \quad (10)$$

Продолжительности первой попытки передачи T_{ini} в режимах NoACK и ACK равны $T_{\text{ini}}^N = T_{\text{Data}}$ и $T_{\text{ini}}^A = D_S^A$ соответственно. Длительности повторной попытки передачи T_{re} в режимах NoACK и ACK равны $T_{\text{re}}^N = T_{\text{Data}} + T_{\text{Rep}}$ и $T_{\text{re}}^A = D_{\text{Re}}^A$ соответственно.

Чтобы найти $P_{\text{ini}}^{N/A}$ и $P_{\text{re}}^{N/A}$, нужно посчитать среднее количество попыток передач $R_{\text{av}}^{N/A}$ в режимах NoACK и ACK. Для режима ACK

$$R_{\text{av}}^A = 1 + \mathbb{1}\{R_A > 1\} \times (1 - P_{S, \text{ini}}^A) P_{G, \text{ini}}^A \sum_{i=0}^{R_A-2} ((1 - P_{S, \text{re}}^A) P_{G, \text{re}}^A)^i. \quad (11)$$

Для режима NoACK

$$R_{\text{av}}^N = 1 + \mathbb{1}\{R_N > 1\} \times P_{G, \text{ini}}^N \sum_{i=0}^{R_N-2} (P_{G, \text{re}}^N)^i. \quad (12)$$

Тогда

$$P_{\text{ini}}^{N/A} = \frac{1}{R_{\text{av}}^{N/A}}$$

– вероятность первой попытки передачи,

$$P_{\text{re}}^{N/A} = \frac{R_{\text{av}}^{N/A} - 1}{R_{\text{av}}^{N/A}}$$

– вероятность повтора.

Подставив $P_{\text{busy}}^{N/A}$, $P_{\text{ini}}^{N/A}$, $P_{\text{re}}^{N/A}$, $T_{\text{ini}}^{N/A}$, $T_{\text{re}}^{N/A}$ в (4), найдем вероятность начала обслуживания кадра $P_{\text{start}}^{N/A}$.

4.3. Доля потерянных пакетов. Средняя по сети доля потерянных пакетов определяются как

$$PLR = PLR_A x_A + PLR_N (1 - x_A), \quad (13)$$

где PLR_A и PLR_N – значения PLR в режимах ACK и NoACK соответственно. Эти величины могут быть найдены как

$$PLR_{N/A} = 1 - P_S^{N/A} P_{\text{start}}^{N/A}. \quad (14)$$

Вероятности успешной попытки передачи в режиме ACK и NoACK вычисляются как

$$\begin{aligned} P_S^{N/A} &= P_{S, \text{ini}}^{N/A} + \mathbb{1}\{R_{N/A} > 1\} \times (1 - P_{S, \text{ini}}^{N/A}) P_{G, \text{ini}}^{N/A} P_{S, \text{re}}^{N/A} \times \\ &\times \sum_{i=0}^{R_{N/A}-2} \left((1 - P_{S, \text{re}}^{N/A}) P_{G, \text{re}}^{N/A} \right)^i. \end{aligned} \quad (15)$$

Первое слагаемое описывает успешную передачу во время первой попытки. Второе слагаемое – вероятность неуспешной первой попытки, но успешной i -й попытки и вероятность того, что пакет не будет вытеснен после каждой попытки из-за генерации нового пакета.

4.4. Энергопотребление. Оценим среднее энергопотребление сенсора за одну успешную доставку. В данной метрике учитывается как энергопотребление для успешных попыток передачи, так и для неуспешных попыток передачи.

Учтем, что энергопотребление для режима АСК и NoАСК будет разным, тогда среднее энергопотребление можно найти как

$$E = E_A x_A + E_N (1 - x_A), \quad (16)$$

где E_A , E_N – энергопотребление сенсора для режимов АСК и NoАСК соответственно.

Рассмотрим режим АСК. В этом режиме сенсор тратит энергию на отправку пакета с данными, прослушивание канала и получение подтверждения. В LoRaWAN окно приема подтверждения имеет небольшую длительность, поэтому предположим, что подтверждения будут приходить сразу же, как только открывается окно приема подтверждения.

Во время первой попытки передачи сенсор тратит энергию E_{TX} на отправку пакета, и с вероятностью $P_{S,ini}^A$ попытка передачи успешна. Если получено подтверждение в основном канале, то среднее энергопотребление для приема подтверждения составляет $P_{S,ini}^A E_{RX}$, где E_{RX} – энергия, затрачиваемая для приема подтверждения в основном канале. С учетом того, что подтверждение было получено только в основном канале, среднее энергопотребление равно $P_{S,ini}^A E_{RX} P_{Ack1}$, где P_{Ack1} – вероятность успешного приема подтверждения в основном канале, которое определяется в [4]. Если подтверждение в основном канале не приходит, но получено подтверждение в служебном канале, то среднее энергопотребление на получение подтверждения в служебном канале составляет

$$E_{listen} + P_{S,ini}^A E_{RX0},$$

где E_{listen} – энергия, затрачиваемая на прослушивание всего окна приема в основном канале, E_{RX0} – энергия, затрачиваемая для приема подтверждения в служебном канале. С учетом вероятности того, что подтверждение было получено только в служебном канале, среднее энергопотребление для прослушивания основного канала и приема подтверждения в служебном канале составит

$$(E_{listen} + P_{S,ini}^A E_{RX0})(1 - P_{Ack1}).$$

Таким образом, формула энергопотребления для первой успешной попытки передачи примет следующий вид:

$$E_{ini}^S = E_{TX} + P_{S,ini}^A E_{RX} P_{Ack1} + (E_{listen} + P_{S,ini}^A E_{RX0})(1 - P_{Ack1}). \quad (17)$$

Если первая попытка передачи была неуспешной, но какая-то повторная попытка передачи оказалась успешной, то к среднему энергопотреблению станции добавляется средняя энергия, потребляемая за все повторные попытки передачи, равная

$$E_{re}^S = (1 - P_{S,ini}^A) P_{G,ini}^A P_{S,re}^A \sum_{i=1}^{R_A-1} \left(i(E_{listen} + E_{listen0} + E_{TX}) + E_{RX} P_{Ack1} + (E_{listen} + E_{RX})(1 - P_{Ack1}) \right) \left((1 - P_{S,re}^A) P_{G,re}^A \right)^{i-1}, \quad (18)$$

где E_{listen0} – энергия, затрачиваемая сенсором для прослушивания служебного канала.

Если сенсор не получил подтверждение после всех R_A попыток передач, то среднее энергопотребление E_{re}^F на повторные попытки передачи рассчитывается как

$$E_{\text{re}}^F = (1 - P_{S,\text{ini}}^A) P_{G,\text{ini}}^A (1 - P_{S,\text{re}}^A)^{R_A-1} (P_{G,\text{re}}^A)^{R_A-1} \times \\ \times \left((R_A - 1) \times E_{\text{TX}} + R_A \times (E_{\text{listen}} + E_{\text{listen0}}) \right). \quad (19)$$

Если новый пакет был сгенерирован во время неуспешной первой попытки передачи, тогда передаваемый пакет будет вытеснен. В этом случае сенсор будет тратить на прослушивание двух каналов после передачи вытесненного кадра энергию

$$E_{\text{ini}}^G = (1 - P_{S,\text{ini}}^A) (1 - P_{G,\text{ini}}^A) (E_{\text{listen}} + E_{\text{listen0}}). \quad (20)$$

В случае если новый пакет был сгенерирован во время повторной попытки передачи, средняя энергия, затраченная на прослушивание канала и повторные попытки передачи, будет равна

$$E_{\text{re}}^G = (1 - P_{S,\text{ini}}^A) P_{G,\text{ini}}^A (1 - P_{G,\text{re}}^A) \mathbb{1}\{R_A > 1\} \times \\ \times \sum_{i=0}^{R_A-2} (P_{G,\text{re}}^A)^i (1 - P_{S,\text{re}}^A)^{i+1} \left((i+2)(E_{\text{listen}} + E_{\text{listen0}}) + (i+1)E_{\text{TX}} \right). \quad (21)$$

Сумма всех вышеперечисленных энергий равняется энергопотреблению сенсора, затрачиваемого на один переданный пакет. Поделив сумму на вероятность успеха P_S^A , можно получить среднее энергопотребление сенсора за один успешно переданный пакет в режиме АСК:

$$E_A = \frac{E_{\text{ini}}^S + E_{\text{re}}^S + E_{\text{re}}^F + E_{\text{ini}}^G + E_{\text{re}}^G}{P_S^A}. \quad (22)$$

Перейдем к подсчету энергопотребления в режиме NoАСК. В этом режиме энергия тратится только для передачи пакетов с данными.

Повторные попытки передачи происходят, если новый пакет не будет сгенерирован во время передачи. Поделив суммарное энергопотребление в режиме NoАСК на вероятность успешной передачи P_S^N , можно получить энергопотребление за один успешно переданный пакет:

$$E_N = \frac{E_{\text{TX}} + \mathbb{1}\{R_N > 1\} E_{\text{TX}} P_{G,\text{ini}}^N \sum_{i=0}^{R_N-2} (P_{G,\text{re}}^N)^i}{P_S^N}. \quad (23)$$

4.5. Рабочий цикл. Предположим, что интенсивность восходящего трафика мала, поэтому каждый сенсор поодиночке не нарушает ограничений на рабочий цикл. Однако сенсоров достаточно много, и базовая станция может нарушить ограничение на рабочий цикл в нисходящем канале, поэтому рассмотрим ограничение на рабочий цикл для подтверждений. Интенсивность генерации подтверждаемого трафика определяется как Λ_A . Согласно сценарию, в нисходящем канале передаются только пакеты с подтверждениями, тогда время, в течение которого нисходящий канал занят, определяется длительностью пакета с подтверждением T_{Ack} . Учтем, что подтверждение будет отправлено в случае успешной доставки кадра с данными, т.е. с вероятностью P_S^A . Для рабочего цикла в основном канале нужно учесть, что этот основной канал будет выбран с вероятностью $\frac{1}{F}$. Таким образом, рабочий цикл

Энергопотребление сенсоров

	Мощность, мВт	Время, с	Энергия, мДж
Передача в основном канале, TX	419,60	0,191	80,14
Прием в основном канале, RX	44,06	0,074	3,26
Прослушивание в основном канале, listen	44,06	0,025	1,10
Передача в служебном канале, TX0	419,60	2,990	1254,60
Прием в служебном канале, RX0	44,06	1,090	46,70
Прослушивание в служебном канале, listen0	44,06	0,401	17,67

для одного основного канала может быть найден как

$$DC_{\text{main}} = \min\left(\frac{\Lambda x_A \times P_S^A \times T_{\text{Ack}}}{F}, 1\right). \quad (24)$$

Для служебного канала аналогично получаем

$$DC_{\text{service}} = \min\left(\Lambda x_A \times P_S^A \times T_{\text{Ack}0}, 1\right), \quad (25)$$

где $T_{\text{Ack}0}$ – длительность кадра с подтверждением в служебном канале, где данные передаются на самой низкой скорости.

§ 5. Численные результаты

Для валидации математической модели была разработана дискретно-событийная имитационная модель, учитывающая особенности метода доступа к каналу в сети LoRaWAN. Далее приведены результаты для $M = 1000$ сенсоров, равномерно распределенных в круге радиуса $r = 1$ км.

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 NoACK равномерно распределена в интервале времени $[0; T_{\text{Rep}}]$, где $T_{\text{Rep}} = 2$ с. Также согласно спецификации $T_1 = 1$ с, $T_2 = 2$ с. Максимальное число попыток передачи в режиме АСК равно $R_A = 8$.

Согласно [9] ограничение на рабочий цикл базовых станций, работающих в Европе в диапазоне частот 863–870 МГц, составляет 1% в основном канале и 10% в служебном канале. Будем рассматривать ограничение на долю потерянных (т.е. не доставленных по любым причинам) пакетов, равное 10^{-3} .

Все сенсоры передают данные на скорости 3125 бит/с (DR4). Сенсоры передают сигналы с мощностью 14 дБм, затухание сигнала вычислялось с использованием модели Окамуры – Хата [10]. Считаем, что на рассматриваемой скорости передача успешна, если соотношение сигнал-интерференция-шум больше $-7,5$ дБ.

Значения мощностей для прослушивания канала, передачи и приема пакета определены в [11] и приведены в табл. 1. 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 [12]. Кроме того, в табл. 1 рассчитано энергопотребление для передачи, приема кадра, а также прослушивания канала в служебном и основном каналах.

Перейдем к полученным результатам. Сначала рассмотрим рис. 1, на котором представлена зависимость PLR от суммарной интенсивности генерируемого трафика Λ в сети. Горизонтальной линией показана прямая $PLR^* = 10^{-3}$. Очевидно, что

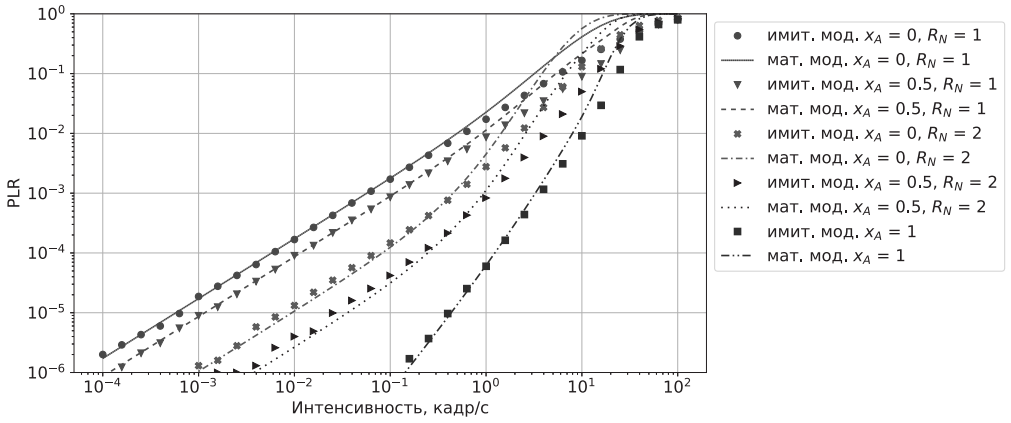


Рис. 1. Зависимость PLR от интенсивности трафика

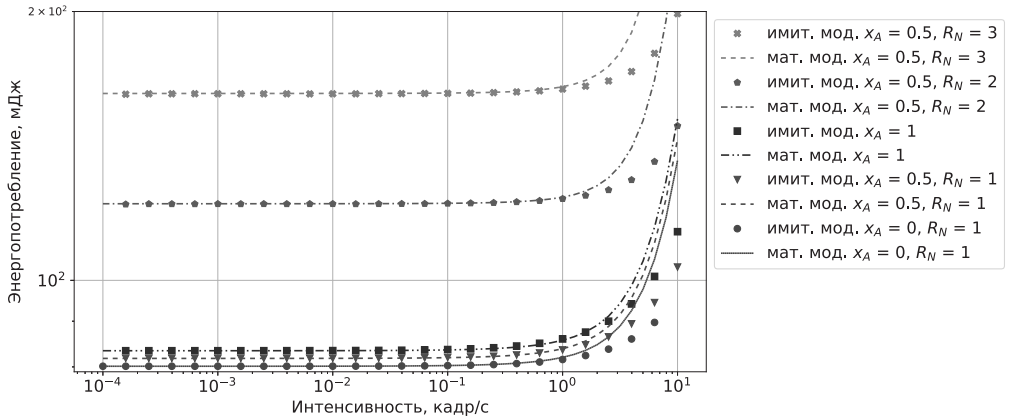


Рис. 2. Зависимость энергопотребления от интенсивности трафика

при $R_N = 1$ и $x_A = 0$, т.е. когда все сенсоры передают в режиме NoACK и делают только одну попытку передачи, наблюдается самое высокое значение для PLR . При увеличении доли x_A PLR уменьшается, так как в режиме ACK у сенсора есть возможность совершить дополнительные попытки передачи в случае неуспеха. При $x_A = 1$ наблюдается самое малое значение PLR из всех представленных. Также отметим, что при $x_A < 1$ увеличение R_N приводит к снижению PLR .

На рис. 2 приведена зависимость энергопотребления сенсоров от суммарной интенсивности генерируемого трафика Λ . Из рисунка видно, что энергопотребление уменьшается при уменьшении x_A , поскольку сенсоры, работающие в режиме ACK, потребляют дополнительную энергию для прослушивания канала и приема пакета с подтверждением. При больших интенсивностях энергопотребление значительно возрастает. Это связано с тем, что вероятность коллизии близка к единице и сенсоры в режиме ACK вынуждены делать повторные попытки передачи, что и приводит к увеличению энергопотребления. Сенсоры в режиме NoACK совершают по одной попытке передачи, которые в большинстве случаев оказываются неудачными, что также приводит к возрастанию среднего энергопотребления.

При малых интенсивностях при $R_N = 2$ сенсоры потребляют почти в два раза больше энергии, чем при $R_N = 1$, поскольку делается в два раза больше попы-

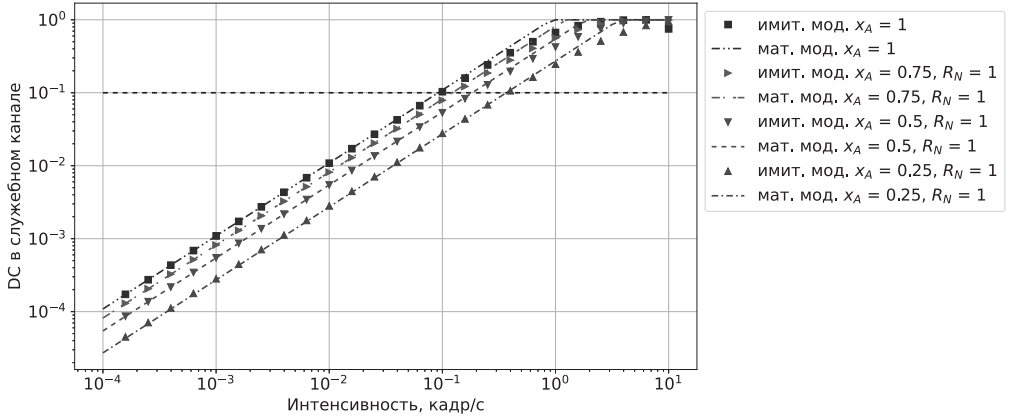


Рис. 3. Зависимость DC в служебном канале от интенсивности трафика

ток передач. Также из рисунка видно, что энергопотребление сенсоров возрастает с увеличением количества попыток передач.

Отметим, что при увеличении интенсивности трафика и R_N возрастает разница в результатах, полученных с помощью математической и имитационной моделей (рис. 2). Данная ошибка связана с тем, что вероятности коллизии в математической модели находятся в предположении малой интенсивности трафика (§ 4), в результате чего пренебрегается коллизиями более чем двух кадров. При большой интенсивности трафика в канале данное допущение вносит заметную ошибку.

Рассмотрим рис. 3, на котором приведена зависимость рабочего цикла базовой станции в служебном канале от суммарной интенсивности генерируемого трафика Λ при $R_N = 1$. Горизонтальной линией показана прямая $DC^* = 10\%$. Очевидно, при увеличении x_A возрастает рабочий цикл. Заметим, что рабочий цикл определяется количеством подтверждений, которые при малых интенсивностях трафика будут все отправлены, поэтому график в этом случае принимает линейный вид. При больших интенсивностях график DC выходит на плато, так как достигается емкость служебного канала.

Заметим, что длительность кадра подтверждения в основном канале значительно ниже, чем в служебном канале. Так, согласно табл. 1 длительность кадра подтверждения для самой высокой скорости в основном канале составляет $T_{Ack} = 0,074$ с, а длительность кадра подтверждения в служебном канале составляет $T_{Ack0} = 1,09$ с. Из математической модели следует, что при низкой интенсивности трафика рабочий цикл в служебном канале в $\frac{T_{Ack0}F}{T_{Ack}}$ раз больше, чем в основном канале. Таким образом, рабочий цикл в служебном канале почти в 45 раз больше, чем в основном, и поэтому можно следить за выполнением ограничения рабочего цикла только в служебном канале, так как для основного канала ограничение, равное 1%, будет выполнено, если соблюдается ограничение для служебного.

Подводя итоги полученным результатам, сформулируем алгоритм для выбора параметров x_A и R_N (см. Алгоритм 1) для заданных значений интенсивности трафика Λ и ограничений DC^* и PLR^* .

Если $PLR(\Lambda, x_A = 0, R_N = 1) \leq PLR^*$, то минимальное энергопотребление обеспечивается, когда все устройства работают в режиме NoACK 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 при минимальном возможном значении PLR, т.е. когда все устройства передают в режиме ACK

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:   if  $PLR(\Lambda, x_A = 1) > PLR^*$  then
6:     return Невозможно выполнить ограничение на  $PLR$  и  $DC$ 
7:   else
8:     Найти  $\hat{x}_A$  как  $PLR(\Lambda, \hat{x}_A, R_N = 1) = PLR^*$ 
9:     if  $DC(\Lambda, \hat{x}_A, R_N = 1) \leq DC^*$  then
10:       $x_A \leftarrow \hat{x}_A, R_N \leftarrow 1$ 
11:      return  $x_A, R_N$ 
12:     else
13:       for  $\hat{R}_N = 2$  до  $R_N^{\max}$  do
14:         Найти  $\hat{x}_A$  как  $\max x_A: DC(\Lambda, \hat{x}_A, \hat{R}_N) \leq DC^*$ 
15:         if  $PLR(\Lambda, \hat{x}_A, \hat{R}_N) \leq PLR^*$  then
16:            $x_A \leftarrow \hat{x}_A, R_N \leftarrow \hat{R}_N$ 
17:           return  $x_A, R_N$ 
18:       return Невозможно выполнить ограничение на  $PLR$  и  $DC$ 
```

($x_A = 1$). Если окажется, что $PLR(\Lambda, x_A = 1) > PLR^*$, то невозможно выполнить ограничение на PLR .

В противном случае для минимизации энергопотребления при $R_N = 1$ необходимо найти значение $\hat{x}_A$, при котором выполняется равенство

$$PLR(\Lambda, \hat{x}_A, R_N = 1) = PLR^*,$$

а далее проверить выполнение ограничения

$$DC(\Lambda, \hat{x}_A, R_N = 1) \leq DC^*.$$

Если при найденном $\hat{x}_A$ и при $R_N = 1$ ограничение на рабочий цикл выполнено, то искомые значения $x_A = \hat{x}_A$ и $R_N = 1$ для минимизации энергопотребления найдены.

Если ограничение на DC не выполняется, то нужно перейти к большему числу повторов: $R_N = 2$. При таком числе повторов для минимизации энергопотребления необходимо найти $\hat{x}_A$ как максимальное значение x_A , такое что

$$DC(\Lambda, \hat{x}_A, \hat{R}_N) \leq DC^*.$$

Если для найденного $\hat{x}_A$ выполняется ограничение

$$PLR(\Lambda, \hat{x}_A, R_N = 2) \leq PLR^*,$$

то искомые значения $x_A = \hat{x}_A$ и $R_N = 2$ найдены. Если ограничения не выполняются, то нужно увеличить R_N на единицу и повторить предыдущий шаг алгоритма с поиском x_A и проверкой выполнения ограничения на PLR . Увеличение R_N будет происходить до тех пор, пока не найдем удовлетворяющие ограничениям значения x_A и R_N или пока значение R_N не достигнет максимального значения $R_N^{\max}$. Если R_N достигло значения $R_N^{\max}$ и при этом не выполняется ограничение на PLR , то невозможно одновременно выполнить ограничение на PLR и рабочий цикл.

Заметим, что алгоритм решает задачу при ограничениях на PLR ниже 1%. В то же время большие значения PLR не являются практически интересными.

§ 6. Заключение

В данной статье была исследована сеть LoRaWAN, в которой сенсоры могут работать в режиме с подтверждениями и в режиме без подтверждений, но с безусловными повторами. Была разработана математическая модель, позволяющая оценить долю потерянных пакетов, рабочий цикл и энергопотребление сенсоров при заданной интенсивности трафика, доле устройств, работающих в режиме с подтверждениями, и количестве попыток передач в режиме без подтверждений. Был разработан алгоритм, который при помощи математической модели находит значения параметров сети, минимизирующих энергопотребление устройств при заданных ограничениях на долю потерянных пакетов и рабочий цикл.

В расширенной версии данной статьи [13] приведено более подробное описание протокола. Также в расширенной версии приведен график, сравнивающий энергопотребление алгоритма и энергопотребление базовых конфигураций сети и показывающий эффективность алгоритма.

В дальнейшем планируется реализация предложенного алгоритма в устройствах LoRaWAN и экспериментальное исследование его эффективности в различных сценариях развертывания сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jovanovic B. Internet of Things Statistics for 2024 — Taking Things Apart (online). DataProt: Cybersecurity Product Reviews, Tips & Latest News. <https://dataprot.net/statistics/iot-statistics/>. Accessed Aug. 2, 2024.
2. Centenaro M., Vangelista L., Kohno R. On the Impact of Downlink Feedback on LoRa Performance // Proc. IEEE 28th Annu. Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC 2017). Montreal, QC, Canada. Oct. 8–13, 2017. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292315>
3. Casals, L., Mir B., Vidal R., Gomez C. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN // Sensors. 2017. V. 17. № 10. Paper No. 2364 (30 pp.). <https://doi.org/10.3390/s17102364>
4. Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Mathematical Model of LoRaWAN Channel Access with Capture Effect // Proc. IEEE 28th Annu. Int. Symp. on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (IEEE PIMRC 2017). Montreal, QC, Canada. Oct. 8–13, 2017. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2017.8292748>
5. Федорищева А.А., Левченко П.А., Банков Д.В. Снижение энергопотребления устройств при ограничении на рабочий цикл в сетях NB-Fi // Сб. трудов 47-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН “Информационные технологии и системы” (ИТиС 2023). Огниково, 17–21 сентября 2023. М: ИППИ РАН, 2023. С. 459–474. https://doi.org/10.53921/itas2023_459
6. Карамышев А.Ю., Порай Е.Д., Хоров Е.М. Оценка емкости системы сверхнадежной связи с низкими задержками с помощью аппроксимаций для многосерверных систем массового обслуживания $G/G/s$ // Пробл. передачи информ. 2024. Т. 60. № 2. С. 36–52. <https://doi.org/10.31857/S0555292324020049>
7. Лихтциндер Б.Я., Привалов А.Ю. Обобщение формул для моментов очереди при неординарном пуассоновском потоке для очередей пакетов в системах телекоммуникаций // Пробл. передачи информ. 2023. Т. 59. № 4. С. 32–37. <https://doi.org/10.31857/S0555292323040046>
8. Угловский А.Ю., Мельников И.А., Алексеев И.А., Куреев А.А. Оценка низкого уровня ошибок с помощью выборки по значимости с равномерным распределением // Пробл. передачи информ. 2023. Т. 59. № 4. С. 3–12. <https://doi.org/10.31857/S0555292323040010>
9. LoRaWAN® Regional Parameters RP002-1.0.4. LoRa Alliance®, Fremont, CA, USA, 2022. Available at <https://resources.lora-alliance.org/technical-specifications/rp002-1-0-4-regional-parameters>.

10. *Hata M.* Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services // IEEE Trans. Veh. Technol. 1980. V. 29. № 3. P. 317–325. <https://doi.org/10.1109/T-VT.1980.23859>
11. *To T.-H., Duda A.* Simulation of LoRa in NS-3: Improving LoRa Performance with CSMA // Proc. 2018 IEEE Int. Conf. on Communications (ICC 2018). Kansas City, MO, USA. May 20–24, 2018. P. 1–7. doi:10.1109/ICC.2018.8422800
12. SX1276-7-8-9 Datasheet. LoRa Connect™ 137 MHz to 1020 MHz Long Range Low Power Transceiver. Semtech Corp., 2016. Available at <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276#documentation>.
13. Fedorishcheva A.A., Bankov D.V., Lyakhov A.I., Khorov E.M. Reducing Energy Consumption in LoRaWAN Networks with Duty Cycle Limitation // Probl. Inf. Transm. 2025. V. 61. № 1 (to appear).

Федорищева Анастасия Анатольевна

Банков Дмитрий Викторович

Ляхов Андрей Игоревич

Хоров Евгений Михайлович

Институт проблем передачи информации

им. А.А. Харкевича Российской академии наук, Москва

fedorishcheva@wireless.iitp.ru

bankov@wireless.iitp.ru

lyakhov@iitp.ru

khorov@wireless.iitp.ru

Поступила в редакцию

16.10.2024

После доработки

07.11.2024

Принята к публикации

13.12.2024