

ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИКИ АБОНЕНТСКИХ РАДИОЛИНИЙ И ИНФОРМАЦИОННОЙ ЕМКОСТИ СПУТНИКОВОЙ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-11-32-39

Manuscript received 25 August 2021;
Accepted 20 September 2021

Нгуен Дык Ань,
МФТИ, Москва, Россия,
anhforce@gmail.com

Ключевые слова: Интернет вещей, спутниковый IoT, сети LPWAN, технология LoRa

Совершенно очевидно, что важность и влияние Интернета вещей на все сферы жизни сегодня неоспоримы. Для реализации соединения и обмена информацией между объектами нельзя упомянуть беспроводные сети, сети LPWAN... Однако у вышеперечисленных сетей все еще есть некоторые ограничения, которые необходимо преодолеть, такие как зоны покрытия, задержка принимаемого сигнала и некоторые другие специальные функции. Поэтому исследования и разработка спутниковой системы с функцией Интернета вещей очень перспективны и актуальны. Кроме того, чтобы конкурировать с наземными сетями по стоимости оборудования, стоимости услуг, а также удобству эксплуатации и использования, необходимо создание спутниковых сетей для работы с наземными сетями. Результат анализа технологий LPWAN в наземных сетях показал, что наиболее приемлемой для работы с спутниковой системой является технологией LoRa. В данной статье представлена оценка энергетики абонентских радиолиний спутниковой системы IoT, реализуемой на основе технологии LoRa. Показано, что защита от помех на линии "Земля-КА" не менее 6-8 дБ (худший случай). В том числе показана возможность работы абонентов при отсутствии прямой видимости спутника IoT, в рабочей зоне которого находится абонентское средство потребителя. Проведены расчеты информационной емкости спутниковой системы IoT и определен предельный пакет данных абонентского средства потребителя.

Информация об авторе:

Нгуен Дык Ань, аспирант, Физтех-школа Радиотехники и Компьютерных Технологий, Московский Физико-Технический Институт (национальный исследовательский университет), город Москва, Россия

Для цитирования:

Нгуен Дык Ань. Оценка энергетики абонентских радиолиний и информационной емкости спутниковой низкоорбитальной системы интернета вещей // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №11. С. 32-39.

For citation:

Nguyen Duc Anh (2021) Estimation of energy intensity of subscriber radio lines and information capacity of the LEO satellite system of the internet of things. *T-Comm*, vol. 15, no.11, pp. 32-39. (in Russian)

Введение

Благодаря бурному развитию цифровых технологий в последние годы Интернет вещей (IoT) начинает проникать во все сферы жизни. Это помогает повысить эффективность работы производственных структур, систем экологического мониторинга и качество жизни людей. Важной частью системы сетей IoT являются сети LPWAN. Стоимость и удобство обслуживания, конкурентоспособное по ценовым параметрам оборудование – преимущества сетей LPWAN. Они конкурируют с сотовыми сетями, в частности с сетями 4G, использующими стандарт NB-IoT. Однако сети LPWAN, как и сотовые сети, имеют ограничения зоны покрытия, задержку приема сигнала и некоторые другие функции, например, работа в движении, которые не могут быть гарантированы.

Следовательно, актуально исследовать и развернуть спутниковую систему, которая отвечает вышеуказанным требованиям, но является конкурентоспособной по ценовым параметрам для абонентов и обеспечивают технические и эксплуатационные критерии соизмеримые или лучше по сравнению с традиционными сетями LPWAN и сотовыми сетями. В конечном итоге должны создаваться гибридные бесшовные сети для спутниковых систем IoT, наземных сетей LPWAN и сотовых сетей. Главный тезис – абоненту безразлично, какие технологии используются. Его интересует конечный результат, т.е. цена услуги и ее качество.

Сегодня спутниковый IoT предоставляется с использованием систем подвижной спутниковой службы (ПСС) (табл. 1). Анализ действующих систем показывает, что в перспективе они не могут конкурировать с наземными сетями IoT в первую очередь по ценовым параметрам абонент-

ского оборудования и качеству услуг [1,2]. В этих системах отсутствует техническая возможность работы абонентского устройства от автономной обычной батарейки. Кроме того, технические параметры существующих систем ПСС не позволяют реализовать ряд задач IoT, которые требуют обеспечить анализ информации и управляющее воздействие в режиме близком реальному времени (например, контроль динамичных систем, в том числе беспилотных летательных аппаратов и иных подобных систем).

Новые проекты с целевой функцией спутникового IoT пока находятся на стадии стартапа. Достаточно достоверных их технических параметров еще нет. Анализ имеющихся сведений показывает, что большинство новых проектов планируется реализовать путем развертывания многоспутниковой группировки на основе нано спутников, т.е. с массой 5-10 кг. Естественно, что срок активного существования таких спутников не может быть более 2-3 лет, такие спутники не могут поддерживать требуемое многоспутниковое орбитальное построение.

При этом, как правило, планируется централизованное предоставление услуг, т.е. сервисы формируются в едином “облаке”. Потребитель сервиса не может произвести контроль сохранности своих данных и их достоверности.

Анализ известных (публикуемых) параметров показывает, что заявленные свойства системы на основе нано спутников зачастую не соответствуют показателям, которые возможно достичь при использовании нано спутников в силу ограниченности их энергетических ресурсов.

Таблица 1

Системы спутниковой связи ПСС, предоставляющие услуги IoT (январь 2019 г.)

Системы	Inmarsat	Thuraya	Iridium	Globalstar
Абонентские устройства	SAT-401	T2M-DUAL GSM	EDGE	StarONe C
Габариты, мм	Φ112 x 37	133 x 103 x 40	130 x 80 x 30	82 x 68 x 26
Масса модема, г	220	395	205	108
Полная масса	Н.д.	1350	Н.д.	Н.д.
Потребление, Вт:				
Спящий режим	1.5мВт	Н.д.	Н.д.	Н.д.
Прием	1.5	Н.д.	1	Н.д.
Передача	6.0	Н.д.	16	Н.д.
Питание, В	3.2-32	10 - 34	9 - 32	8 -22
ЭИИМ, дБВт	0-9		2	Н.д.
Задержка, сек	60	Н.д.	20	Н.д.
Пакеты, байт:				
Передача	До 21	До 140	До 340	Н.д.
Прием	До 100	Н.д.	До 270	Н.д.
Интерфейс	RS232	RS232, 3G	RS232	USB
Навигация	GPS	GPS	нет	GPS
Цена без инсталляции, \$	950	845	480	207
Минимальный тариф в месяц	\$16* 1500 байт	\$ 13 3333 байт	\$20 12000 байт	\$14.5 250 пакетов

Результаты анализа сведений о новых проектах много-спутниковых систем показывают, что целесообразно создание низкоорбитальной многоспутниковой системы с целевой функцией IoT на основе глобально-распределенного принципа формирования сервисов (т.е. не на основе централизации), в том числе сервисов IoT, требующих реакции, в том числе в реальном времени. Для решения задачи космические аппараты должны быть более мощными, чем нано спутники и обеспечивать поддержание требуемого орбитального построения многоспутниковой группировки не менее 4-5 лет, что связан с необходимостью достижения коммерциализации таких систем.

1. Энергетика абонентских радиолиний спутниковой системы Интернета вещей

Как отмечено выше, в настоящее время некоторые компании в разных странах уже начали разработать проекты спутниковых систем IoT. В России АО «ВИСАТ-ТЕЛТ» первое начало разработать проект «Марафон IoT» для многофункциональной спутниковой системы. В системе «Марафон IoT» предполагается несколько функционалов. Целевая функция (функционал) предусматривает обычные типовые сервисы IoT, аналогичные предлагаемым в сотовых сетях и сетях LPWAN. Этот режим в данном случае обозначен как OFF-Line и используется безлицензионный диапазон частот ISM [9].

Одной из проблем является обеспечения энергетике абонентских радиолиний «Земля-КА» и «КА-Земля» с учетом типовых параметров абонентского устройств, которые в массовом порядке применяются в наземных сетях LPWAN. Следует отметить, что в системе «Марафон IoT» кроме режима OFF-Line предусмотрен и режим ON-Line, который ориентирован на предоставления сервисов, требующих реакции близкой к реальному времени. В данной статье этот режим не рассматривается.

На рисунке 1 представлена зависимость угла обзора Земли со спутника при высоте орбиты 750 км от заданного минимального угла места работы абонента (с учетом неточности ориентации КА до 5°). При угле места 30° угол обзора примерно 100°. Угол обзора в простейшем случае можно соотнести с шириной диаграммы направленности бортовой антенны. Это обеспечивает простейшая антенна с усилением в максимуме примерно 4-5 дБ. Но для минимизации коллизий, повышения энергетике радиолиний и емкости системы следует рассмотреть вариант наличия минимум 4-х фиксированных лучей на каждом спутнике. Усиление в этом случае повысится минимум в четыре раза (минимум 8 дБ в зоне).

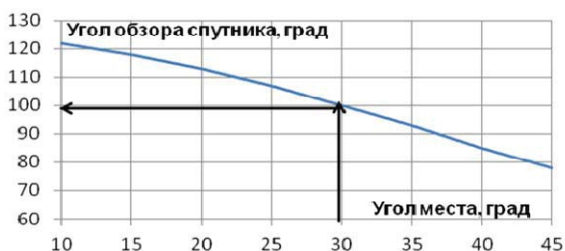


Рис. 1. Зависимость угла обзора со спутника от заданного рабочего угла места на Земле

Анализ технологий LPWAN показал, что технология LoRa наиболее приемлема для работы в спутниковой системе с целевой функцией Интернета вещей [8]. Основной режим OFF-Line предусматривает использование сигнально-кодовых конструкций (СКК) LoRa, которые потенциально обеспечивают работу радиолинии при уровне C/N минус 20-21 дБ.

Рабочая зона спутника формируется из четырех лучей. Каналы и работают в режиме временного разделения (англ. Time-division duplexing, TDD). Причем трафик в направлении от абонента минимум на порядок превышает трафик в обратном направлении.

Оценки энергетике абонентских радиолиний в режиме OFF-Line для частот 868/915 (ISM диапазон) предполагает, что на спутнике установлена антенная решетка, формирующая 4 фиксированных луча, диаграмма направленности каждого луча 25°x100°. Параметры абонентских радиолиний и лучей спутника приведены в таблице 2.

Предполагается, что абонентские средства потребителей такие же, как применяются в наземных сетях LoRaWAN (табл. 3).

Результаты оценки энергетического потенциала абонентских радиолиний при использовании СКК LoRa приведены в таблице 4.

Таблица 2

Параметры спутника (абонентские радиолинии ISM диапазона)

Параметр	Луч 1		Луч 2		Луч 3		Луч 4	
	Граница	Центр	Граница	Центр	Граница	Центр	Граница	Центр
Ширина ДН луча, град.	25 x 100		25 x 100		25 x 100		25 x 100	
Усиление антенны КА, дБ (ПРД и ПРМ)	7.0	10.0	7.8	10.8	7.8	10.8	7.0	10.0
Наклонная дальность, км	1400	1150	900	8		850	1400	1150
Шумовая температура, К	600	600	600	6		600	6	
Мощность ПРД, Вт	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Полоса частот канала, кГц	125	125	125	1		125	1	

Таблица 3

Параметры абонентского устройства LoRa

Параметр	Значение для своего АУ	Значения для АУ помехи
Ширина ДН, град.	120 x 120	180 x 180
Усиление, дБи	2.0	-3.0
Шумовая температура, К	1500	1500
Мощность ПРД, Вт	0.025	0.025
Поляризация	0.7 круговая	линейная

Таблица 4

Итоговые значения энергетики абонентской радиолинии 868/915 МГц

Радиолиния "КА-Земля"								
Параметр радиолинии	Луч 1		Луч 2		Луч 3		Луч 4	
	Граница max	Центр	Граница max	Центр	Граница max	Центр	Граница max	Центр
C/N, дБ	-9.1	-3.9	-4.7	-1.5	-4.7	-1.5	-9.1	-3.9
Радиолиния "Земля-КА"								
C/N, дБ	-11.2	-7.0	-6.7	-3.3	-6.7	-3.3	-11.2	-7.0
I/N, дБ	-19.2	-13.9	-14.7	-11.3	-19.2	-13.9	-14.7	-11.3

Примечание: I/N отношение мощности помехи к мощности шума.

Из данных таблицы 4 следует, что в лучах достаточно установить условия работы при двух значениях коэффициента SF модуляции LoRa, например, SF9 и SF10.

Таблица 5

Значения C/N (SNR), требуемые в радиолинии при различных коэффициентах SF для канала 125 кГц

SF	Битовая скорость, бит/с	Чувствительность, дБм,	LoRa демодулятор C/N, дБ
7 (128)	5469	-124	-7.5
8 (256)	3125	-127	-10
9 (512)	1758	-130	-12.5
10 (1024)	977	-133	-15
11 (2048)	537	-135	-17.5
12 (4096)	293	-137	-20

Из таблицы 5 следует, что ограничиваясь двумя значениями SF9 и SF8, достигаются запасы в радиолинии минимум 1.3 дБ, но в 80% рабочей зоны более 5 дБ. При переходе к SF=10 запасы достигают примерно 4-12 дБ.

2. Требуемые запасы в абонентских радиолиниях режима OFF-Line

При выборе SF следует учитывать, что абоненты могут находиться в закрытых помещениях. Исследованию проникновения сигналов в закрытые помещения посвящено множество материалов. Например, в рекомендации ITU-R P.2040-1 [5] для частоты 860 МГц представлены данные потерь сигнала спутника при проникновении в различные типы зданий. Значения затуханий находятся в пределах 2.9-7.5 дБ. В лесном массиве следует принимать значение 0.2дБ/м на частоте 1ГГц, т.е. при наклонной дальности 50м дополнительное затухание 10 дБ.

Обобщенная вероятностная оценка потерь проникновения в закрытое помещение представлена на рисунке 2 применительно к наземным беспроводным сетям [3]. Из данных рисунка 2 следует, что с вероятностью 90% потери не будут превосходить более 12 дБ в диапазоне 868/915 МГц и высокая зависимость потерь на проникновение от угла прихода сигнала, который изменяется при движении спутника (или абонента), это свойство можно использовать для повышения надежности доставки пакетов за счет их повторяющихся запросов.

Предельным случаем потерь проникновения следует считать проникновение сигнала в металлический кунг с металлической обрешеткой окон. В этом случае потери проникно-

вения составляют в интервале 19.8-20.4 дБ. То есть при необходимости можно обеспечить связь с датчиком в таком кунге, но для очень малого процента времени.

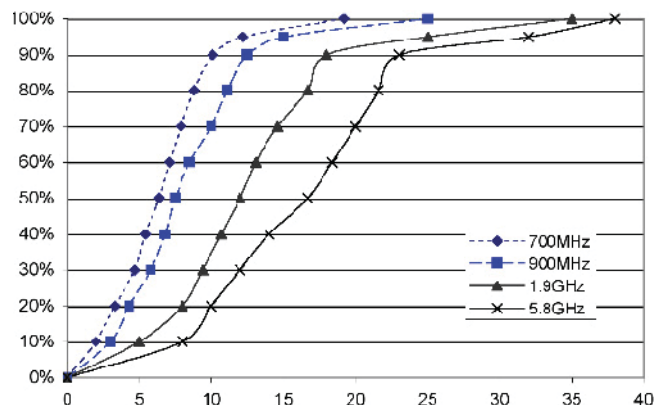


Рис. 2. Вероятность, что потери проникновения не превысят заданной величины (дБ)

Технологию LoRaWAN с модуляцией LoRa целесообразно рассматривать в качестве основной при реализации ретрансляционной аппаратуры, работающей в режиме OFF-Line. При этом следует учитывать, что при использовании специальных дешевых абонентских антенн, отличающихся от стандартных, применяемых в абонентских устройствах LoRa, усиление можно увеличить еще примерно на 2-3 дБ и даже более для решения специальных задач.

В результате запасы по энергетике увеличиваются минимум до 6-7 дБ, а в 80% зоны обслуживания луча достигают 14-15дБ. В результате можно сделать вывод, что в данном случае абонентские средства потребителей могут работать в закрытых помещениях, что является уникальным свойством для спутниковых систем связи. При этом в случае необходимости имеется возможность перейти на использование SF12, что добавляет в энергетике канала еще 5 дБ (общий запас 11-20дБ), но эквивалентная скорость канала снижается примерно в три раза. Соответственно и емкость системы снижается.

3. Информационная емкость спутниковой системы IoT в режиме OFF-Line

Целевая функция Интернета вещей реализуется на основе типового протокола LoRaWAN и сигнально-кодовой конструкции LoRa. В соответствии с оценками энергетического потенциала радиолиний может использоваться расширение спектра, соответствующее SF=9, 10 в некоторых случаях и SF=8.

Однако учитывая, что могут быть ситуации, при которых у абонента нет прямой видимости спутника, следует принять запасы. Эти запасы примем от 4 дБ до 12 дБ. Таким образом, целесообразно минимальную емкость системы оценивать при SF=10 для типового канала 125 кГц.

Кроме того, следует принять размер типового пакета и среднюю интенсивность их поступления на бортовой модуль ISM LoRa. Естественно, что сценариев может быть множество. Для оценки примем, что средний пакет составляет 23 байта, цикличность их передач от абонентов – один раз в час.

Оценку целесообразно выполнять для одного канала. Затем, для оценки емкости КА, полученные значения линейно увеличить исходя их условия, что в каждом луче 8 каналов и число лучей 4, т.е. умножить на 32.

В результате потенциальная емкость системы определяется с учетом того, что в полностью развернутой группировке действует 252 активных КА. Причем эта емкость распределена неравномерно на поверхности Земли. Максимально доступная емкость увеличивается в направлении полюсов Земли. Кроме того, с учетом различных ограничений по количеству частотных каналов, разрешенных в конкретном регионе (стране) емкость системы варьируется. То есть однозначного ответа на вопрос о емкости системы не может быть, можно говорить исключительно о потенциальной максимально достижимой емкости спутника и системы при заданном объеме пакетов, цикличности передачи абонентских средств потребителей (АСП) с учетом необходимости квитирования пакетов или отсутствия таковой необходимости.

3.1. Соотношение для оценки емкости системы

Пакет физического уровня LoRa состоит из символов преамбулы, заголовка и полезной нагрузки. Символы представляют собой ряд двоичных данных. Объем битов в символе определяется коэффициентом расширения спектра сигнала LoRa

$$N_b^s = SF$$

Пример при SF=7 каждый символ представляет собой 7 битов данных и имеет диапазон значения от 0 до 127 (2^{SF}). Например, символ 1010111 имеет значение в десятичном виде 87. Символы формируются циклическими сдвигами по частоте. При сдвиге от низкой частоты до высокой он называется символом повышающей частоты, и в противоположенном случае будет понижающей частоты.

Преамбула обеспечивает временную синхронизацию для правильного восстановления символов. Она состоит из последовательности немодулированных символов повышающей частоты, за которыми следуют 2,25 символа немодулированной понижающей частоты для уведомления получателя о начале заголовка полезной нагрузки. Количество символов в преамбуле диапазоне от 6 до 65535.

После преамбулы передаются символы заголовка, которые содержат информацию о длине пакета, скорости кодирования, наличии CRC и полезной нагрузки. В режиме неявного заголовка можно удалить заголовок, чтобы уменьшить длину пакета и уменьшить продолжительность передачи пакета. В этом случае и передатчик, и приемник должны заранее знать параметры пакетов.

Количество символов в пакете физического уровня за исключением преамбул определяется формулой [4,6]:

$$payloadSymbNb = 8 + \text{ceil} \left(\frac{8 \cdot PL - 4 \cdot SF + 28 + 16 \cdot CRC - 20 \cdot H}{4 \cdot (SF - 2 \cdot DE)} \right) \cdot (CR + 4)$$

где

$PL = 12 + FRM$ – количество байтов полезных данных в пакете физического уровня;

FRM – количество байтов полезных данных на уровне приложения;

SF – коэффициент расширения спектра;

$CRC = 1$, когда передача поля CRC блока полезной нагрузки включена и $CRC=0$ – когда выключена;

$H=0$, когда передача заголовка включена и $H=1$ – когда заголовок отсутствует;

$DE=1$, когда оптимизация для низких скоростей передачи включена и $DE=0$ – когда выключена;

$CR=1.4$ – скорость кода.

Емкость сети LoRa определяется количеством передаваемых пакетов в направлении шлюза, которое прямо зависит от длительности передачи пакета. Длительность передачи пакетов

$$T_{packet} = T_{preamble} + T_{payload}$$

где

$T_{preamble} = (n_{preamble} + 4,25) \cdot T_{sym}$ – длительность передачи преамбулы;

$n_{preamble}$ – количество преамбулов;

$T_{payload} = payloadSymbNb \cdot T_{sym}$ – длительность передачи блока данных физического уровня;

$T_{sym} = \frac{2^{SF}}{W}$ – длительность передачи одного символа;

Ceil – функция округления до большего целого числа.

В процессе передачи пакетов данных возникают коллизии, из-за этого не все пакеты успешно обрабатываются в шлюзе. Емкость сети характеризуется допустимым количеством пакетов в направлении на шлюз Lora в сутки, которое составляет:

$$Throughput = N_f \cdot \frac{24 \cdot 3600 \cdot G}{T}$$

где

N_f – Количество частотных каналов;

G – интенсивность поступления пакетов;

T – время передачи одного пакета.

На основе этого соотношения можно оценить емкость КА за виток или емкость КА, отнесенную к одной РСС, исходя из времени видимости КА.

Кроме того, емкость системы будет зависеть от принятой модели работы. Возможны два основных варианта (Модели):

- шлюз только принимает пакеты, подтверждения их приема не требуется;
- шлюз принимает пакеты, каждому пакету требуется подтверждение его приема.

Для предварительной оценки можно принять модель, которая предполагает использование канала 125 кГц в режиме приема.

На рисунке 3 показано емкость канала в сутки. Емкость увеличивается с ростом допустимой вероятности потери пакетов (коллизий) и коэффициентов расширения спектров. Средний объем пакетов в сутки представляет 7 тысяч пакетов.

Число обслуживаемых АСП зависит от интенсивности передачи пакетов и объема этих пакетов. На рисунках 4, 5 представлена оценка количества абонентов, обслуживаемых одним каналом радиолинии 125 кГц при коэффициенте SF=10 и среднем размере полезных данных, передаваемых в

поле FRMPayload=10 байтов. При интенсивности передачи пакетов 1 пакет в день число обслуживаемых абонентов приблизительно 13 тысяч абонентов на канал 125 кГц. На рисунке 5 представлены данные для размера пакетов 10-80 байт.

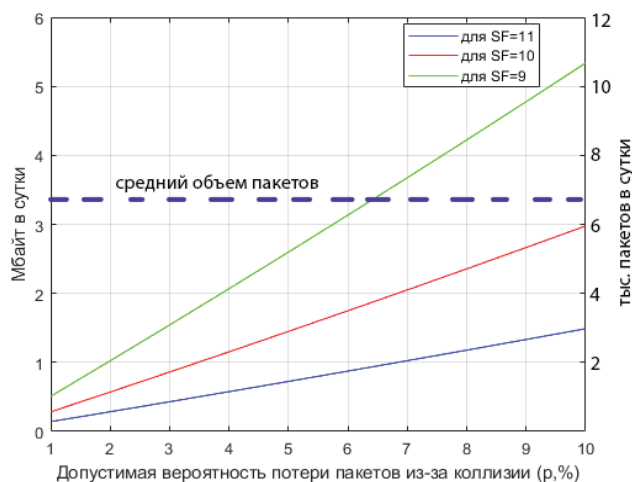


Рис. 3. Емкости радиоканала одного канала для разных коэффициентов расширения спектров

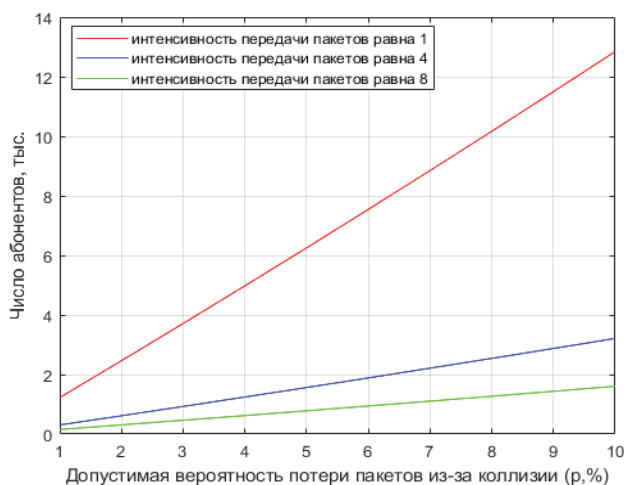


Рис. 4. Число абонентов, обслуживаемых в сутки для одного канала

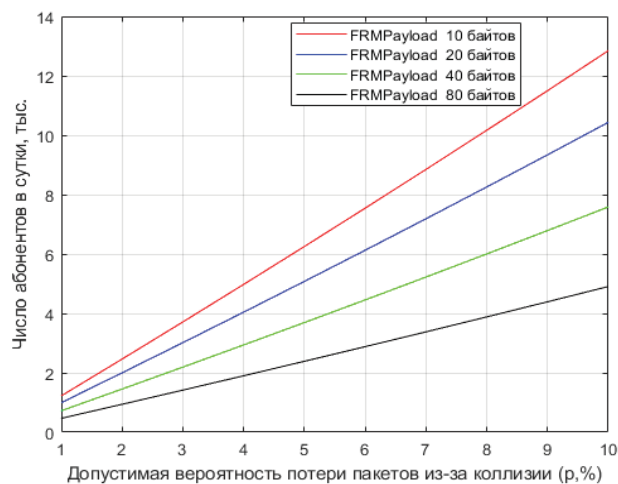


Рис. 5. Количество обслуживаемых абонентов при разных размерах передаваемых полезных данных для одного канала

3.2. Предельный размер пакетов АСП и минимаксная оценка емкости

Емкость сети определяется размером пакетов на физическом уровне, т.е. пакетами, которые транслируются в радиоканале в единицу времени. На рисунках 6 и 7 представлена структура пакетов LoRa [7]. Служебный объем информации пакета представлен в таблице 6. Применительно к частотным планам EU868 этот объем составляет примерно 6 байт. Допустимое максимальное значение PHYPayload зависит от типа СКК LoRa (табл. 7) и программных настроек (рис. 7). В соответствии с оценкой энергетики радиоканала максимально возможное значение SF для режима OFF-Line следует принять SF=9. Соответственно, минимальный объем емкости следует оценивать при объеме пакетов 134 байт. Максимальный объем емкости определяется минимальным пакетом FRMPayload, который зависит от особенности сервиса. Для оценки максимальной емкости следует принять FRMPayload = 8 байт, т.е. пакеты 14 байт в радиоканале. Для упрощения можно принять при SF9 и полосы 125 кГц значение $K = 0,797 \approx 0,8$ (отношение полезных максимальных данных к объему всего пакета).

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload	CRC
----------	------	----------	------------	-----

Пакет LoRa, передаваемый абонентом в направлении базовой станции

Preamble	PHDR	PHDR_CRC	PHYPayload
----------	------	----------	------------

Пакет LoRa, передаваемый базовой станцией в направлении абонента

Рис. 6. Структура пакета LoRa

Таблица 6

Сегменты пакета LoRa

Сегмент пакета	Объем	Размерность	Примечание
Preamble	(4,25)SF	бит	n-число символов
PHDR	16	бит	
PHDR_CRC	4	бит	
PHYPayload	Табл. 2		максимальные значения
CRC	16	бит	

n=8 устанавливается для EU868 и некоторых других планов

Битовая скорость в радиоканале $R_b = SF W/2^{SF} FEC$. Тогда число пакетов единицу времени в случае синхронной их передачи составит $N_{min} = R_b/1072 * T$ или $N_{max} = R_b/112 * T$, где T – интервал времени.

Для грубой оценки можно принять, что каждый спутник системы может за один виток принять 94 178 пакетов минимального объема (14 байт) или 9839 пакетов максимально допустимого объема (134 байт). Однако, использование емкости канала при случайном множественном доступе типа Алоха составляет не более 0.184, при уровне коллизий до 63%. Соответственно

$N_{min} = R_b/1072 * T * F$ или $N_{max} = R_b/112 * T * F$, где T – интервал времени, F – менее 0.184.

Таблица 7

**Объем составляющих сегмента PHYPayload
(максимум байт)**

SF	PHYPayload	MACPayload	FRMPayload*
Канал 125 кГц			
12		59	51
11		59	51
10		59	51
9	12	123	115
8	25	250	242
7	25	250	242
Канал 250 кГц			
12	1	123	115
11	2	250	242
10	2	250	242
9	25	250	242
8	25	250	242
7	25	250	242
Канал 500 кГц			
12	2	250	242
11	2	250	242
10	2	250	242
9	25	250	242
8	25	250	242
7	25	250	242

*Полезные данные на уровне приложений (сервиса)

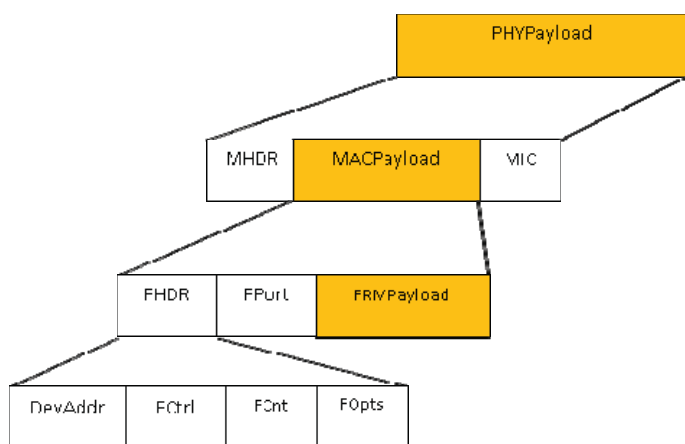


Рис. 7. Структура сегмента полезной нагрузки пакета

Время одного витка составляет примерно 100 минут. Соответственно, если АСП передает с темпом один пакет в час, то число обслуживаемых АСП в одном канале 125 кГц составит не более 10 397 максимум или не более 1 086 минимум.

В случае начала передачи пакетов от спутника вниз число, обслуживаемых АСП уменьшается, практически пропорционально интенсивности (времени) передачи. Принимая типовое значение для передачи 1/8 от времени работы, получим снижение числа обслуживаемых АСП примерно на 12,5%. Причем это снижение будет наблюдаться по всем рабочим каналам, даже если только один из них начал передачу. Это основной недостаток стандартной технологии LoRa (приемные каналы выключаются).

В системе “Марафон IoT” в режиме OFF-Line предлагается частотное разделение приемных каналов и каналов, которые могут работать как приемо-передающие, что может обеспечить достаточный уровень развязки между каналами при соответствующей компоновке бортовой ФАР.

Заключение

Анализ новых проектов спутниковых систем IoT с прямым доступом к абонетским устройствам потребителей и рынка IoT показывает, что целесообразно создание низкоорбитальной многоспутниковой системы передачи данных (МСПД) «Марафон IoT» для сервисов Интернета вещей. Технологию LoRaWAN с модуляцией LoRa целесообразно рассматривать в качестве основной при реализации ретрансляционной аппаратуры, работающей в режиме. В статье представлены оценки энергетики абонетских радиолиний в режиме OFF-Line для частот 868/915 (ISM диапазон) и следует, что защита от помех на линии «Земля-КА» минимум составляет 6-8 дБ, что позволяет обеспечить работу радиолиний при затенении абонетских устройств потребителей.

Емкость одного КА для минимального размера пакетов при передаче один пакет в час составляет 72 709 АСП, при максимальном объеме пакетов 7602 АСП. Целесообразно на данном этапе принять среднее значение емкости системы 10 млн. обслуживаемых АСП в режиме OFF-Line при наличии 252 КА.

Литература

1. Анпилогов В.Р. Обзор докладов и обсуждений на круглом столе V международной конференции «Инжиниринг&Телекоммуникации – En&T 2018» // Технологии и средства связи. 2019. № S1 (специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание-2019»). С. 32-38.
2. Эйдус А.Г. Анализ действующих негеостационарных спутниковых систем на рынке M2M/IoT и оценка коммерческой перспективности планируемых многоспутниковых систем // Технологии и средства связи. 2018. Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание-2018». С. 20-27.
3. [ht://morse.colorado.edu/~tlen5510/text/classwebch3.html](http://morse.colorado.edu/~tlen5510/text/classwebch3.html) [дата обращения: 20.01.2021].
4. <https://techinfo.ru/content/емкость-сети-lora> [дата обращения: 19.05.2021].
5. Рекомендация МСЭ-R P.2040 – 1 (07/2015). Влияние строительных материалов и структур на распространение радиоволн на частотах выше приблизительно 100 МГц. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-1!!PDF-R.pdf.
6. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. On the Limits of LoRaWAN Channel Access // Engineering and Telecommunication (EnT), 2016 International Conference on / IEEE. 2016. Pp. 10-14.
7. N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM), 7 O.Hersent (Actility). LoRaWAN™ Specification // LoRa™ Alliance. 2015 January.
8. Анпилогов В., Нгуен Дык Ань. Технологии Lpwan и возможность их адаптации для спутниковых сетей IoT // Первая миля. 2020. № 6 (91). С. 44-53.
9. Анпилогов В.Р., Нгуен Д.А. Анализ совместимости спутниковых сетей IoT с устройствами SRD и LPWAN в диапазонах частот 868/915 МГц // Электросвязь. 2020. № 1. С. 37-43.

ESTIMATION OF ENERGY INTENSITY OF SUBSCRIBER RADIO LINES AND INFORMATION CAPACITY OF THE LEO SATELLITE SYSTEM OF THE INTERNET OF THINGS

Nguyen Duc Anh, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia, anhforce@gmail.com

Abstract

It is clear that the importance and impact of the Internet of Things on all areas of life is undeniable today. To implement the connection and exchange of information between objects, one cannot fail to mention wireless networks, LPWAN networks ... However, the above networks still have some limitations that need to be overcome, such as coverage areas, signal delay and some other special features. Therefore, research and development of a satellite system with the IoT function is very promising and relevant. In addition, in order to compete with terrestrial networks in terms of equipment cost, service cost, and ease of operation and use, it is necessary to create satellite networks to work with terrestrial networks. The result of the analysis of LPWAN technologies in terrestrial networks showed that Lora technology is the most suitable for working with a satellite system. The article presents an assessment of the energy of subscriber radio lines when the satellite system is compatible with the Lora network. It is shown that the protection against interference on the "Earth-spacecraft" link is not less than 6-8 dB (worst case). The required reserves in the subscriber radio lines of the OFF-Line mode have been determined. Calculations of the information capacity of the IoT satellite system were carried out and the maximum data package of the consumer's subscriber facility was determined.

Keywords: Internet of Things, satellite IoT, LPWAN networks, LoRa technology.

References

1. Anpilogov V.R. Review of reports and discussions at the round table of the V international conference "Engineering & Telecommunications - En & T 2018". *Technologies and means of communication*. 2019. No. S1 (special issue "Satellite communications and broadcasting - 2019"). Pp. 32-38.
2. Eidus A.G. Analysis of existing non-geostationary satellite systems in the M2M/IoT market and assessment of the commercial prospects of the planned multi-satellite systems. Eidus. *Technologies and means of communication*. 2018. Special issue "Satellite communications and broadcasting-2018". Pp. 20-27.
3. <http://morse.colorado.edu/~tlen5510/text/classwebch3.html>.
4. <https://itechinfo.ru/content/емкость-сети-lora>.
5. Recommendation ITU-R P.2040 - I (07/2015). Influence of building materials and structures on radio propagation above about 100 MHz - https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.2040-1-201507-1!!PDF-R.pdf.
6. Bankov Dmitry, Khorov Evgeny, Lyakhov Andrey. On the Limits of LoRaWAN Channel Access. *Engineering and Telecommunication (EnT), 2016 International Conference on / IEEE*. 2016. Pp. 10-14.
7. N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. Eirich (IBM), T. Kramp (IBM), O. Hersent (Actility). LoRaWAN™ Specification. LoRa™ Alliance. 2015 January.
8. Anpilogov V., Nguyen Duc Anh. LPWAN technologies and possibility of adaptation for IoT satellite networks. *First Mile*. 2020. No. 6 (91). Pp. 44-53.
9. Anpilogov V.R., Nguyen D.A. Analysis of compatibility of IoT satellite networks with SRD and LPWAN devices in the 868/915 MHz frequency bands. *Electrosvyaz*. 2020. No. 1. Pp. 37-43.

Information about author:

Behrooz Daneshmand, graduate student, Phystech School of Radio Engineering and Computer Technologies, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia