ТЕХНОЛОГИИ LPWAN И ВОЗМОЖНОСТЬ ИХ АДАПТАЦИИ ДЛЯ СПУТНИКОВЫХ СЕТЕЙ IoT

В.Анпилогов, к.т.н., заместитель генерального директора
АО "ВИСАТ-ТЕЛ" / avr@visat.tel,
Нгуен Дык Ань, аспирант МФТИ / anhforce@gmail.com

УДК 004.735, DOI: 10.22184/2070-8963.2020.91.6.44.53

Представлены технические параметры наиболее известных технологий LPWAN, большая часть которых относится к проприетарным. Особое место занимает LoRa – фактически единственная открытая технология. Как показал анализ возможности адаптации технологий LPWAN для использования в спутниковых сетях IoT, ориентированных на прямой доступ к оконечным устройствам, наиболее перспективная технология – LoRa. В статье приводятся графические данные взаимосвязи отношения сигнал/шум и вероятности ошибки на бит, которые обеспечивают объективную оценку бюджета абонентских радиолиний спутниковых каналов, реализованных на основе технологии LoRa.

История Интернета вещей началась много десятилетий назад. Еще в 1970-х годах была сформулирована задача автоматизации производственных и технологических процессов с использованием систем передачи данных, которые называли автоматическими системами управления технологическими процессами (АСУ ТП). С появлением интернета практическая ценность таких систем принципиально повысилась. Примерно с начала 2010-х годов в обиход вошло словосочетание "Интернет вещей".

Специфика спутниковых систем управления и контроля обусловлена их глобальностью. В начале 2000-х годов в качестве составной части АСУ ТП предлагались спутниковые решения SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition – диспетчерское управление и сбор данных) на основе технологии VSAT с узкополосными каналами. Но еще раньше, в конце 1980-х годов, появилось понятие межмашинного взаимодействия M2M с использованием спутниковых систем. Первой такой системой, по-видимому, следует считать OmniTRACS, созданную в 1988 году. Через несколько лет, в 1991-м, компания Eutelsat реализовала аналогичный проект Euteltracs. Эти системы были ориентированы на отслеживание и диспетчеризацию грузовых перевозок.

С появлением в начале 2000-х годов спутниковых систем подвижной спутниковой службы (ПСС) Iridium, Globalstar и др. услуги M2M стали одной из их дополнительных функций. Однако ни по ценовым, ни по эксплуатационным параметрам они не могут конкурировать с аналогичными услугами в наземных сетях [1-3], даже после глубокой модернизации систем ПСС.

Поскольку бесперспективность систем ПСС очевидна, формируется новый сегмент спутниковой связи, названный спутниковым Интернетом вещей (спутниковым IoT). Этот сегмент охватывает все функции и услуги, которые ранее обозначались как АСУ ТП, SCADA и M2M, а также задачи из области промышленного IoT (IIoT) и даже Интернета всего (IoE). Общее количество подключаемых устройств, по всем прогнозам, составит десятки миллиардов уже в ближайшие пять лет. Но применительно к спутниковому IoT не стоит скатываться в примитивизм с подключением холодильников, чайников и т.п. Хотя одна из ключевых задач спутникового IoT – обеспечение ценовых и эксплуатационных параметров абонентского оборудования и услуг, соизмеримых с аналогами в наземных сетях LPWAN и сотовых сетях. Очевидно, что потребителя не интересует, какие физические каналы используются,

если достигнуто равенство ценовых показателей и эксплуатационных параметров при решении его задач. В данном случае потенциальный рынок спутникового IoT – это общий рынок Интернета вещей. Однако очевидно, что такого паритета для всех сегментов рынка достичь невозможно, как и, например, создать всеобъемлющие сети 5G, даже в отдаленной перспективе. У каждой технологии свой целевой рынок.

Потребительский рынок услуг спутникового IoT анализируется в ряде отчетов компании NSR [4], но относиться к прогнозным результатам следует критически, поскольку выводы о развитии данного рынка базируются на анализе действующих систем ПСС. Альтернативные исследования [5] показывают, что рынок спутникового IoT по количеству прогнозируемых подключений может быть больше примерно в 50 раз, а его потенциальный объем – в четыре раза (примерно 10–12 млрд долл.) по сравнению с данными из прогнозов NSR. Но эти параметры могут быть достигнуты только при ценовых показателях услуги и абонентских устройств, соизмеримых с показателями, характерными для сетей LPWAN и сотовых сетей, в сегментах, где ликвидация ограничений рабочей зоны и тем более глобальность услуги – важные условия.

Решение этой задачи во многом зависит от технологии каналообразования, применяемой в спутниковой сети IoT. Следует отметить, что в данном случае рассматривается способ организации сети, в которой обеспечивается прямой доступ к оконечным устройствам IoT по аналогии с сетями LPWAN. Поэтому необходим объективный анализ технологий LPWAN для оценки возможности их адаптации к спутниковой сети IoT.

Технологии LPWAN

Современные технологии сетей IoT следует разделить на две самостоятельные группы. К первой относятся технологии, которые могут быть реализованы только при использовании полной инфраструктуры сетей сотовой связи (2G/3G/4G/5G). Наибольшую популярность получила технология NB-IoT [6]. Эта группа технологий не подходит для организации спутниковых сетей с прямым доступом к оконечным абонентским устройствам IoT. В таком случае спутниковый канал применяется как обычный backhaul [7]. Очевидно, что достичь паритета по ценовым показателям услуги в такой спутниковой сети IoT невозможно, поскольку сегмент сотовой сети дополняется дорогостоящим спутниковым каналом.

Во вторую группу входят технологии LPWAN, на основе которых создаются самостоятельные (выделенные) сети с целевой функцией Интернета вещей, обеспечивающие прямой доступ к оконечным устройствам IoT. Адаптация технологии LPWAN применительно к таким системам спутникового IoT представляет наибольший интерес, поскольку не требуется полной инфраструктуры сотовой сети. Однако у каждой технологии LPWAN свои особенности, которые, в конечном итоге, сказываются на возможности и/или эффективности их адаптации для спутниковой системы, ориентированной на обеспечение прямого доступа к оконечным устройствам IoT.

В табл.1 представлен ряд технологий LPWAN, которые предназначены для работы в диапазонах ISM ниже 1 ГГц, и их типовые технические параметры. Необходимо особо отметить, что указанные технические параметры не отражают всего многообразия их вариантов, следующих из официальных описаний технологии. Привести в статье все варианты невозможно, поэтому в табл.1 собраны параметры, соизмеримые между собой по энергетическим показателям и достаточные для количественных оценок эффективности технологий LPWAN. Следует учитывать, что не все технологии LPWAN имеют достаточное для анализа описание в открытых информационных источниках. Иногда указанные в них описания и параметры противоречивы, поэтому возможны разночтения с иными публикуемыми материалами. Некоторые технологии LPWAN упоминаются в массовых изданиях, но не имеют открытых технических описаний (или авторам они неизвестны), поэтому не представлены в табл.1 (например, Ingenu (RPMA), модификация LoRaWAN: Symphony Link и др.).

Среди технологий LPWAN можно выделить две группы. Первая – ультра "узкополосные технологии", вторая группа, которая представлена только технологией LoRaWAN и ее модификацией Symphony Link, – это условно "широкополосная" LPWAN.

Возможна классификация технологий LPWAN и по требованию синхронизации в сети, то есть протоколы асинхронные и синхронные.

У каждой технологии LPWAN свои особенности и приоритетные области использования при формировании сервисов IoT. Но общее для них свойство – это, как правило, возможность обеспечить работоспособность оконечных устройств от обычной бытовой батарейки в течение многих лет при очень низких ценных параметрах оборудования [8]. При этом передавать полезную

Таблица 1. Технические параметры технологий LPWAN

Параметр	LoRa	SigFox	NB-Fi	XNB	OpenUNB	Weightless-P	SNBWAN	DASH7	Mioty (Class A)
Полоса частот канала "вверх", кГц	125	0,1	0,05	0,1	0,1	12,5	0,4/0,8/6,4/51,2/204,8	25	2,38
Полоса частот канала "вниз", кГц		1,5				100			
Метод разделения каналов Tx/Rx	TDD	FDD	TDD	FDD	FDD	TDD			
Число каналов "вверх" (максимум)	8	1920	1024	5000	Н.д.	8 (по 12,5 кГц)	До 512	270 (EU)	42
Число каналов "вниз" (максимум)	1	128				1			
Модуляция на линии "вверх"	ЛЧМ, SF = 6...12 m=SF	DBPSK, m=1				OQPSK, m=2	4FSK, m=2	GFSK, m=1	GMSK , m=1
Помехоустойчивое кодирование на линии "вверх"	4/5, 2/3, 4/7, 1/2	Н.д.	1/2		Нет	1/2			1/3
Модуляция на линии "вниз"	ЛЧМ, SF=6....12 m=SF	GFSK, m=1	BPSK, m=1	Н.д.	BPSK, m=1	OQPSK, SF8, m=2	DBPSK, m=1	GFSK, m=1	GMSK, m=1
Помехоустойчивое кодирование на линии "вниз"	4/5, 2/3, 4/7, 1/2	Н.д.	½, 1/3			1/2			1/3
Roll-Off на линии "вниз" ("вверх")	0	0,14–0,28	Н.д.		Нет	0,8	Н.д.	0,2–0,4	Н.д.
Предельное значение C/N на линии "вверх", дБ	Минус 20	+6...+9	+5		+9	Минус 17,5	+6	+6	
Предельное значение C/N на линии "вниз", дБ		Н.д.				Минус 4,5	+9		
Множественный доступ	Aloha					MF-TDMA	SAloha	CSMA/CA	TS-UNB Проприетарный
Максимальный пакет "вверх", байт	255	26–29	40	Н.д.	27	302	Н.д.	256	24
Максимальный пакет "вниз", байт		28	Н.д.		25				
Максимальный объем полезной информации "вверх", байт	242	12	8		16	255	23	251	<245
Максимальный объем полезной информации "вниз", байт		8	8хп n=1,2...16						250
Ограничение интенсивности пакетов (или цикличность)	Менее 10%	140 в день "вверх", 4 в день "вниз"	Н.д.		0,1% "вверх" 1% "вниз"	В соответствии с НТД	В соответствии с НТД	В соответствии с НТД	В соответствии с НТД
Стандарт	LoRa Alliance Открытый	Проприетарный	WAWIOT Проприетарный ПНСТ 354-2019		СТРИЖ Закрытый проприетарный	Предварительный стандарт	Weightless Alliance Открытый частично	На стадии разработки	DASH7 Alliance условно открытый
Модем (чип)	SX127x SX126x	ATA8520 ATA8520E AX-SIGFOX	AX5043	AX8505 2f143	Н.д.	Н.д. Оборудование компании UBIK	AX805 2F143	SX1282 ADUCRF101	CC1352R
Контроллер	SX1301/1302	STM32	STM32	STM32				STM32, CC430	

информацию предполагается короткими пакетами с низкой цикличностью.

LoRa и LoRaWAN представлены в стандарте ETSI TR 103 526. Технология LoRa обычно трактуется как физический уровень сети в совокупности с конкретными физическими устройствами, а протокол LoRaWAN определяет правила каналообразования на всех уровнях OSI. Это наиболее распространенная открытая технология и открытый протокол, развитие и унификацию которых поддерживает LoRa Alliance [9, 10].

Ключевая особенность технологии LoRa – использование специфических сигнально-кодовых конструкций (СКК) с расширением спектра сигнала (подобно линейной частотной модуляции – ЛЧМ), которые могут надежно передавать информацию при уровне сигналов ниже уровня шума до 20 дБ ($C/N = \text{минус } 20 \text{ дБ при SF12}$), как на линии "вверх", так и на линии "вниз". Благодаря этому свойству обеспечивается повышенная помехозащищенность каналов передачи информации. Но расплата за это – снижение эффективности использования радиочастотного спектра. Например, скорость передачи в канале 125 кГц при самой высокой чувствительности (SF12) – примерно 250 бит/с (для такой скорости, например, при модуляции QPSK $\frac{1}{2}$ достаточно всего 250 Гц полосы частот, то есть в 50 раз меньше, но тогда и значение C/N нужно обеспечить в 400 раз более высокое).

В то же время избыточность полосы пропускания канала относительно скорости передаваемой информации обеспечивает устойчивость технологии LoRa при возникновении эффекта Доплера в части изменения частоты сигнала (статистический эффект) и скорости его изменения (динамический эффект) [11–16]. Предел устойчивости к статическому изменению частоты, заявленный в технических описаниях чипов LoRa (SX1276/77/78/79, SX1272/73), составляет до 25% от ширины полосы частот канала при включенном режиме оптимизации структуры пакета.

Устойчивость к эффекту Доплера в сочетании с возможностью работы ниже уровня шума – определяющее техническое свойство при выборе технологии LoRa для новых спутниковых систем IoT. Однако следует отметить, что предел устойчивости СКК LoRa к эффекту Доплера для различных сочетаний СКК окончательно пока не определен. Это предмет будущих исследований. Решение данной перспективной задачи осложняется мощным влиянием на достоверность передачи информации эффектов многолучевости на трассе распространения [17, 18], которые носят случайный характер.

SigFox рассматривается в [19–24]. В названии SigFox обозначается компания SIGFOX SACA (Франция), принадлежность к ее сети One global 0G и проприетарная технология SigFox. Характерная особенность технологии – использование множества сверх узких (100 Гц) каналов на линии "вверх" (от абонента к шлюзовой станции) с целью получения достаточной энергии радиоканала. В результате пропускная способность канала менее 100 бит/с, но таких каналов сотни. Первоначально технология SigFox была однонаправленной и поддерживала связь только по линии "вверх". В последующем технология дорабатывалась для обеспечения двусторонней связи. В канале "вниз" используется более широкая полоса частот, поскольку абонентское устройство должно быть дешевым, то есть обладать пониженной чувствительностью к изменению частоты, связанной с нестабильностью задающего генератора и перепадом температур.

Но если абонент находится в движении, технология SigFox неприменима вследствие проявления эффекта Доплера. Для обеспечения работоспособности в движении требуется организация сложных алгоритмов определения частот передачи и приема, основанных на измерении координат объекта и базовой станции (или спутника), их относительной скорости и вычислении прогноза изменения частоты. Решить эту задачу можно, но абонентское устройство заметно увеличится в цене, а его эксплуатационные показатели снизятся. Естественно, применение технологии SigFox для спутниковой системы IoT, реализуемой с использованием негеостационарных орбит, невозможно в случае прямого доступа к абонентским устройствам в диапазонах ISM. Однако есть сведения, что компания Eutelsat совместно с компанией SigFox создала и в конце 2018 года запустила демонстрационные низкоорбитальные спутники (проект ELO). Подробностей технических решений или результатов тестирования в открытом доступе нет.

NB-Fi, OpenUNB, XNB представлены в [25–28]. Технологии XNB и NB-Fi – производные от технологии SigFox. XNB поддерживается в сети компании "Стриж", а NB-Fi – в сети компании WAVIOT. Этим проприетарным технологиям присущи все свойства SigFox. Следует отметить, что в 2019 году протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала NB-Fi оформлен в России как предварительный национальный стандарт (ПНСТ 354-2019) сроком действия до апреля 2022 года. Но описание технологий и протоколов на физическом и канальном уровнях отрывочно и не раскрывает сути технологии и протоколов.

В 2019 году появился еще один проект российского предварительного стандарта, посвященный технологии под названием OpenUNB [26, 27]. Несмотря на содержащиеся в материале неточности и ошибки (<https://www.pvsm.ru/cat/openunb>), можно сделать вывод, что это очередная интерпретация технологии SigFox с попыткой компенсации нестабильности кварцевого генератора абонентского устройства.

В отличие от NB-Fi и OpenUNB, разработчики технологии XNB придерживаются принципа полностью закрытого проприетарного протокола. В качестве элементной базы в XNB и NB-Fi применяются чипы, по предварительным оценкам, тех же производителей, что и в оборудовании сети SigFox. Для OpenUNB данные не опубликованы.

Таким образом, XNB, NB-Fi и OpenUNB – технологии, подобные SigFox, не могут служить базовыми для использования в спутниковой системе IoT.

Dash7, Mioty, SNBWAN представлены в [29–37]. В отличие от технологий типа SigFox и LoRa, они основаны на синхронной передаче данных (приемнику и передатчику известно время передачи данных). Спектральная эффективность таких технологий заметно выше, чем технологии LoRa. То есть при одной и той же полосе частот канала потенциальное число подключений может быть больше в разы. Но в результате возникает проблема энергетического потенциала радиолинии, поскольку требуется достигать C/N не менее плюс 5–6 дБ для устойчивой работы (в отличие от технологии LoRa сигнал должен значительно превышать шумы в канале связи).

Кроме того, возникает проблема компенсации эффекта Доплера. Она решается (как и при использовании SigFox), но этот алгоритм для спутниковой сети IoT приводит к тому, что стоимость абонентского устройства значительно увеличивается за счет необходимости применения приемника GPS/ГЛОНАСС, который требуется для вычисления частотных уходов и скорости изменения частоты при определении требуемой рабочей частоты канала и его частотной подстройки. Наряду с этим необходимо постоянно обновлять альманахи всех спутников низкоорбитальной орбитальной группировки и передавать эти данные на абонентские устройства. Соответственно, на спутник должны постоянно загружаться обновленные служебные данные и со спутника транслироваться абонентам, а абонент должен хранить альманахи, обновлять его и выполнять вычисления. Объем служебной информации резко возрастает, что сводит на нет преимущества спектральной эффективности этих технологий, а при быстром или динамичном движении

абонента такой процесс может оказаться невозможным. Указанные проблемы исключают применение технологий на основе синхронной передачи данных для спутниковой сети IoT, требующей максимально невысокой стоимости и предельно низкого уровня потребления абонентских устройств.

Следует отметить интересную специфику технологий Mioty и DASH7. Так, особенность протокола Mioty заключается в том, что для передачи объемного пакета, например, нескольких сотен байт, его предварительно сегментируют на мелкие пакеты (предположительно по 12 байт), и каждый мелкий пакет передается на своей частоте. В результате снижается вероятность коллизии пакетов (по оценкам разработчиков технологии, выигрыш составляет примерно 20% по отношению к слотированной Alohe).

Разработка технологии DASH7 была инициирована Министерством обороны США и альянсом НАТО. В 2009 году Министерство обороны США выделило частной промышленности 429 млн долл. для развития DASH7, что имело большое значение для коммерциализации и стандартизации технологии. В итоге DASH7 была разработана компанией Savi Technology (2010 год) и впервые применена в ходе войны в Персидском заливе. В последующем технология DASH7 развивалась в направлении ее коммерциализации и расширения функций путем взаимодействия с метками RFID как с оконечными устройствами.

Однако эффект Доплера не позволяет адаптировать эти технологии к низкоорбитальной спутниковой системе IoT с сохранением конкурентоспособных ценовых параметров абонентских устройств.

Weightless-P рассматривается в [38]. Технология Weightless подразумевает три стандарта: Weightless-N, Weightless-W и Weightless-P. Обратимся к варианту Weightless-P (первая версия стандарта Weightless-P появилась только в 2017 году), который обеспечивает наиболее высокую энергетику каналов. Технология отличается от обычных технологий синхронной передачи возможными вариантами СКК, которые предусматривают расширение спектра в четыре или восемь раз по отношению к минимально требуемой полосе частот для максимальной битовой скорости при модуляции OQPSK с $FEC = 1/2$. Соответственно спектральная эффективность пропорционально снижается, как и в технологии LoRa, но благодаря этому появляется возможность принимать и передавать информацию ниже уровня шумов.

Стоит отметить, что на линии "вниз" полоса частот расширена до 100 кГц. Это дает возможность

работать в движении при наличии достаточно простых оконечных устройств и минимальном значении $C/N = -4,5$ дБ, что все же примерно на 12,5 дБ больше, чем на линии "вверх".

Тем не менее технология Weightless-P не получила широкого распространения.

Применение этой технологии для спутниковой сети IoT технически возможно, но экономически неэффективно, поскольку элементная база не представлена широко на открытом рынке.

ВЗАИМОСВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ

К ключевым характеристикам СКК обычно относятся спектральная и энергетическая эффективность, а также помехоустойчивость. Эти показатели связаны с пороговым отношением сигнал/шум (C/N) в канале с аддитивным белым гауссовым шумом (АБГШ). Шеннон показал, что потенциальная скорость R в канале с АБГШ определяется достигнутым значением C/N и шириной его шумовой полосы пропускания W . Причем R_b всегда менее битовой скорости в канале R :

$$R_b < R = W \log_2(1+C/N). \quad (1)$$

Степень приближения R_b к R – обобщенная характеристика эффективности СКК.

Скорость в физическом канале, в котором информация передается цифровыми многопозиционными методами манипуляции (фазы, частоты, амплитуды), характеризуется числом битов, передаваемых в секунду (с учетом коэффициента расширения спектра, если применяется).

Вероятность ошибочного приема бита информации (P_b) определяется достигнутым значением отношения энергии бита (E_b) к спектральной плотности мощности шума (N_0) в канале. Если принять, что P_b стремится к нулю, можно записать взаимосвязь:

$$C/N = E_b/N_0 (R/W). \quad (2)$$

Тогда соотношение Шеннона примет вид:

$$R_b < W \log_2(1+E_b/N_0 (R/W)). \quad (3)$$

В пределе при $R/W \rightarrow 0$ значение $E_b/N_0 = 0,693$ или минус 1,6 дБ независимо от значения C/N . Это значение называют пределом Шеннона.

Значение R_b взаимосвязано с параметрами используемого типа СКК:

$$R_b = R_s m \text{ FEC}, \quad (4)$$

где R_s – символьная скорость;

m – число бит в одном символе;

FEC – коэффициент помехоустойчивого кодирования.

Из (2) и (4) следует оценка взаимосвязи значения C/N , используемой СКК и значения E_b/N_0 :

$$C/N = E_b/N_0 m \text{ FEC } (R_s/W). \quad (5)$$

Для СКК без расширения спектра $R_s = W/(1+r)$. В случае расширения спектра, например для СКК LoRa, получаем $m = SF$, $R_s = W/2^{SF}$, где $FEC = 4/(4+CR)$, $CR = 1, 2, 3, 4$. Таким образом, скорость передачи информации в канале с использованием СКК LoRa снижается при увеличении SF :

$$R_b = SF W/2^{SF} \text{ FEC}. \quad (6)$$

За счет расширения спектра прием информации при использовании СКК LoRa обеспечивается при уровне сигнала значительно ниже уровня шумов в канале. Для СКК LoRa соотношение $R/W > R_b/W < 1$. Из (5) следуют значения C/N для СКК LoRa при различных величинах SF и заданном коэффициенте FEC при условии $R_b = R$:

$$C/N = E_b/N_0 (R_b/W) = E_b/N_0 (SF/2^{SF}) \text{ FEC}, \quad (7)$$

где $R_b = R_s m \text{ FEC} = SF W/2^{SF} \text{ FEC}$ – битовая скорость в канале с СКК LoRa на физическом уровне.

В литературе часто приводятся значения чувствительности приемника. На этом основании сопоставляются технологии LPWAN. Но конечный результат сравнения зависит от достигнутого значения коэффициента шума приемника и полосы частот канала:

$$C/N = S + 175 - 10 \lg W - NF, \quad (8)$$

где S – чувствительность приемника, дБм;

NF – коэффициент шума приемника, дБ.

Следует отметить, что указанные выше соотношения взаимосвязи C/N и E_b/N_0 предполагают равенство P_b .

Зависимость C/N и E_b/N_0 от вероятности ошибки на бит

Зависимости $E_b/N_0(P_b)$ для типичных СКК с фазовой или частотной манипуляцией хорошо известны и представлены во многих источниках. Для СКК LoRa функция $E_b/N_0(P_b)$ в явном виде неизвестна.

Из (7) следуют предельные значения C/N для СКК LoRa при заданном FEC (табл.2), вытекающие

Таблица 2. Типовые параметры СКК LoRa для канала 125 кГц

LoRa	SF = m	M = 2 ^m	R _b , бит/с с FEC = 4/5	C/N, дБ при FEC = 4/5 P _b = 10 ⁻⁴	E _b /N ₀ , дБ при FEC = 4/5 P _b = 10 ⁻⁴	Предел Шеннона	
						E _b /N ₀ , дБ	C/N, дБ
DR0	12	4096	293	-21,2	5,1	-1,593	-27,9
DR1	11	2048	537	-18,4	5,3	-1,593	-25,3
DR2	10	1024	977	-15,6	5,5	-1,593	-22,7
DR3	9	512	1758	-12,7	5,8	-1,593	-20,1
DR4	8	256	3125	-9,9	6,1	-1,593	-17,6
DR5	7	128	5469	-7,1	6,5	-1,593	-15,2

из предела Шеннона. Их можно трактовать как значения C/N, при которых вероятность приема сигнала 0,5, то есть достоверный и ошибочный прием сигнала равновероятны.

В [39] представлены результаты моделирования канала LoRa при передаче пакетов PHY payload 13 байт с использованием имитационных программ NS-3. На основе этих результатов и предложено эмпирическое соотношение, определяющее зависимость вероятности ошибки приема бита информации (в диапазоне P_b до 10⁻⁶) в зависимости от значения C/N для различных SF и FEC в канале с полосой 125 кГц:

$$\text{Lg } P_b = \alpha \exp(\beta \text{ C/N}), \quad (9)$$

где α и β – коэффициенты аппроксимации при моделировании.

Соответствующие зависимости C/N(P_b) приведены на рис.1. Результаты примерно совпадают с [17] для частных примеров. Но следует учитывать, что полученные зависимости C/N(P_b) справедливы в отсутствие многолучевого распространения. Наличие отражений и переотражений на трассе распространения сигнала могут существенно повлиять (ухудшить C/N в канале до 20 дБ) на конечный результат [17, 18], что в общем случае является случайным процессом.

В отличие от СКК LoRa в иных технологиях LPWAN используются СКК на основе модификаций двух- или четырехпозиционной фазовой или частотной манипуляции. Значение R_b в этом случае определяется как (4), но важно учитывать крутизну амплитудно-частотного параметра фильтра при обработке сигнала, которая

характеризуется коэффициентом roll-off (r), поэтому $R_s = W/(1+r)$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Бесспорное достоинство спутниковых систем связи – их глобальность (или почти глобальность). Но любая спутниковая система связи не будет востребована на массовом рынке, если применяемые абонентские устройства не обеспечивают удобство эксплуатации, а их ценовые параметры в сочетании с ценовыми показателями предоставляемых услуг не отвечают условиям конкурентоспособности с наземными сетями.

Конкурентоспособность спутниковых систем можно значительно повысить, если адаптировать технологии, массово применяемые в наземных сетях, к особенностям спутниковых сетей. В данном случае эта задача рассмотрена применительно к спутниковым сетям IoT.

Результаты анализа технологий LPWAN показывают, что технология LoRa – наилучший вариант для применения в низкоорбитальной спутниковой системе с целевой функцией IoT. В этом случае полезная нагрузка спутника представляет собой ретрансляционную аппаратуру с обработкой и регенерацией сигналов. В результате обеспечивается высокая гибкость выбора параметров для достаточного энергетического потенциала радиолиний при приеме-передаче коротких пакетов с использованием типовых модемов LoRa, применяемых на массовом рынке IoT в абонентских устройствах LPWAN LoRa.

Представленные в статье зависимости C/N(P_b) позволяют выполнить уточненный расчет

Рис.1. Зависимости значения C/N в канале с АБГШ 125 кГц от вероятности ошибки на бит при FEC = 4/5 (синие кривые) и 4/7 (красные кривые) для СКК LoRa

бюджета абонентских радиолиний. При использовании диапазона ISM 868/915 МГц на линии "космос – Земля" необходимо учитывать ограничения на эквивалентную изотропно излучаемую мощность спутниковых каналов для исключения помех наземными системами LPWAN и SDR [40].

Следует отметить, что СКК LoRa обладает повышенной устойчивостью к эффекту Доплера, но пределы этой устойчивости требуют уточнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анпилогов В.Р.** Глобальные спутниковые системы M2M/IoT: новые проекты и новый рынок. V Международная конференция "Инжиниринг & Телекоммуникации – En&T 2018", 15 ноября 2018 года, <http://2019.ent.info/old/round-table.ru.shtml>
2. **Анпилогов В.** Обзор докладов и обсуждений на круглом столе V Международной конференции "Инжиниринг & Телекомму-

- никации – EN&T 2018" // Технологии и средства связи. 2018. № S1. Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание 2019". С. 32–38.
3. **Эйдус А.Г.** Анализ действующих негеостационарных спутниковых систем на рынке M2M/IoT и оценка коммерческой перспективности планируемых многоспутниковых систем // Технологии и средства связи. 2017. № 6. Специальный выпуск "Спутниковая связь и вещание 2018". С. 20–27.
 4. M2M and IoT via Satellite, 10th Edition. September 2019, NSR.
 5. **Liu J., Li Y., Wang X., Chen Sh.** A hybrid global-local load balancing routing scheme for the Internet of Things through satellite networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2017. V. 13(3). P. 1–16.
 6. **Агаджанов М.** Российские операторы связи приступили к тестированию сим-карт NB-IoT для Интернета вещей. 25.10.2018, <https://habr.com/ru/post/427643/>
 7. Maria Rita Palattella, Nicola Accettura. Enabling Internet of Everything Everywhere: LPWAN with satellite backhaul. 2018 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS), October 2018, Thessaloniki, Greece. P. 1–5.
 8. **Mekki K., Bajic E., Chaxel F., Meyer F.** A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, ICT Express 5. 2019. P. 1–7.
 9. Обзор технологии LoRa, <https://itechinfo.ru/node/46>
 10. LoRa Alliance, <https://lora-alliance.org/>
 11. **Petjirvi J., Mikhaylov K., Pettissalo M., Janhunen J., and Iinatti J.** Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage, International Journal of Distributed Sensor Networks. 2017. V. 13. № 3.
 12. **Colavolpe G., Foggi T., Ricciulli M.A., Zanetini Y.J., Alameda M.** Reception of LoRa Signals From LEO Satellites, IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. V. 55. December 2019. P. 3587–3602.
 13. **Doroshkin A., Zadorozhny A., Kus O., Prokopyev V., Prokopyev Y.** Laboratory testing of LoRa modulation for CubeSat radio communications VI International forum for young scientists Space Engineering 2018. P. 1–5.
 14. **Jung Suk Joo.** A study on the interleaving scheme of LoRa PHY layer // International Research Journal of Computer Science (IRJ CS). Issue 01. V. 7. January 2020. P. 6–10.
 15. **Adelantado Ferran, Vilajosana Xavier, Tuset-Peiro Pere, Martinez Borja, Melia-Segui Joan, and Watteyne Thomas.** 2017. Understanding the limits of LoRaWAN. IEEE Commun. Mag. 55, 9 (2017). P. 34–40.
 16. **Doroshkin A.A., Zadorozhny A.M., Kus O.N., Prokopyev V.Y., Prokopyev Y.M.** Experimental Study of LoRa Modulation Immunity to Doppler Effect in CubeSat Radio Communications, IEEE Access, June 24, 2019.
 17. **Elshabrawy T., Robert J.** Analysis of BER and Coverage Performance of LoRa Modulation under Same Spreading Factor Interference Conference: 2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). September 2018.
 18. **Dias C.F., de Lima E.R., Fraidenraich G.** Bit Error Rate Closed-Form Expressions for LoRa Systems under Nakagami and Rice Fading Channels. Sensors 2019. 19, 4412 <https://www.mdpi.com/journal/sensors>
 19. **Zuniga J.C., Ponsard B.** SIGFOX System Description, LPWAN Working Group, SIGFOX Expires: September 14. 2017.
 20. <https://www.sigfox.com/en>
 21. **Gomez C., Veras J.C., Vidal R.l., Casals L., Paradells J.** A Sigfox Energy Consumption Model, Sensors 2019. 19, 681 <https://www.mdpi.com/journal/sensors>
 22. **Rodriguez I., Lauridsen M., Arvidsson K., Kvarnstrand J., Andersson M., Mogensen P.** Testing of Low-Power Wide-Area Technologies in Controlled Propagation Environments, Loughborough Antenna and Propagation Conference 2017.
 23. Abu Hemjal: SigFox based Internet of Things: Technology, Measurements and Development, Master of Science thesis Tampere University Master's Degree Programme in Electrical Engineering, May 2019.
 24. **Lavric A., Petrariu A.I., Popa V.** Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions, IEEE Access. V. 7. 2019. P. 35816–35825.
 25. Протокол беспроводной передачи данных на основе узкополосной модуляции радиосигнала (NB-Fi), Предварительный национальный стандарт Российской Федерации. ПНСТ 354-2019.

26. Протокол передачи данных для высокочастотных сетей на основе сверхузкополосной модуляции радиосигнала, <https://iot.skoltech.ru/2019/07/29/tsk-nti-pri-skoltehe-vylozhil-v-otkrytyj-dostup-novyj-standart-openunb-dlya-interneta-veshhej/OpenUNB>
27. Обсуждение стандарта openUNB, <https://habr.com/ru/post/464103/>
28. CPT: Технология узкополосной связи LPWAN XNB, <https://www.tadviser.ru/index.php/>
29. DASH7 Alliance Wireless Sensor and Actuator Network Protocol, <https://dash7-alliance.org/>
30. Towards IP over LPWANs technologies: LoRaWAN, DASH7, NB-IoT, EEE, 2018. Sixth International Conference on Digital Information, Networking, and Wireless Communications (DINWC 2018). P. 43–47.
31. Considerations for low-power communication in industrial IoT Applications. DASH7 Alliance. October 2019. V. 1.0.
32. Mioty Alliance, <https://mioty-alliance.com/>
33. Mioty Alliance, <https://behrtech.com/mioty/>
34. Fraunhofer Institute for Integrated Circuits IIS, <https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/lv/net/telemetrie.html>
35. Short Range Devices; Low Throughput Networks (LTN); Protocols for radio interface A, ETSI TS 103 357 V1.1.1 (2018-06).
36. **Зверев Б., Сартаков А.** SNB – новая LPWAN-технология Интернета вещей с высокой пропускной способностью, Control Engineering Россия IIoT, июнь 2019, <https://controlengrussia.com/internet-veshhej/snb/>
37. **Зверев Б., Сартаков А.** SNB – новая LPWAN-технология Интернета вещей с непревзойденной пропускной способностью // Беспроводные технологии. 2018. № 4, <https://wireless-e.ru/>
38. Weightless-P System Specification, V. 1.03 7 November 2017, <http://www.weightless.org/about/weightless-specification>
39. Van den Abeele F., Haxhibeqiri J., Moerman I., Hoebeke J. Scalability analysis of large-scale LoRaWAN networks in ns-3 // Journal of latex class files, V. 14, № 8, August 2015. P. 1–12.
40. **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.

21–22 октября 2020
 отель «Холидей Инн Лесная»,
 Москва, Лесная ул., д. 15

XI Международная конференция
Transport Networks
Russia & CIS

Развитие
 телекоммуникационных транспортных сетей
 в эпоху цифровой экономики,
 распределенных дата-центров
 и облачных услуг накануне запуска 5G

Организатор:

COMNEWS
 CONFERENCES

- Более **400 участников**
- Более **50 докладчиков** – операторов, регуляторов и поставщиков оборудования и сервисов
- Более **20 экспонентов**
- Более **40 инфопартнеров**
- Поддержка ведущих отраслевых ассоциаций и объединений деятелей рынка

Для регистрации:
 +7 495 933 5483,
www.comnews-conferences.ru/tn2020