

Системы спутникового «Интернета вещей»

для бесшовной сети

В статье представлен обзор спутниковых систем, предоставляющих услуги IoT, рассмотрены действующие системы подвижной спутниковой службы и показано, что ценовые параметры услуг и абонентских устройств неконкурентоспособны на рынке IoT. Представлен анализ новых спутниковых систем с целевой функцией IoT и проанализированы проблемные вопросы их реализации. Анализ проектов спутниковых систем показывает, что наиболее перспективной технологией и протоколом является LoRa/LoRaWAN, поскольку обеспечивается создание бесшовных глобальных сетей IoT.

Валентин Анпилов, к. т. н.

Идея создания спутниковой системы для решения многочисленных задач в области «Интернета вещей» (IoT) известна достаточно давно, но для ее реализации необходимо создать систему, которая обеспечит ценовые показатели абонентских устройств, соизмеримые с аналогами в сотовых сетях и сетях LPWAN, и возможность работы абонентских устройств сети LPWAN в спутниковой сети IoT, то есть бесшовность общей сети IoT.

Действующие системы спутникового IoT

В настоящее время действует несколько низкоорбитальных систем (Iridium, Globalstar, Orbcomm, «Гонец» и др.), которые относятся к подвижной спутниковой службе (диапазоны P, L, S). Операторы этих систем предоставляют услугу IoT [1, 2]. В 2020 году число абонентских устройств составляло не менее 3,4 млн [3]. Но по ценовым и эксплуатационным показателям эти услуги IoT несоизмеримы с аналогами в сотовых сетях и сетях LPWAN (табл. 1). Стоимость абонентских средств потребителей (АСП) минимум на порядок больше, работа от обычной батарейки невозможна, а задержка при передаче информации составляет от нескольких секунд до нескольких часов [4].

В результате действующие спутниковые системы, хотя потенциально и могут предоставить возможности для решения ряда задач IoT, но массовости услуги спутникового IoT на рынке сегодня нет и пока не предвидится. Отсутствие перспективы в первую очередь связано с проприетарностью технологий и протоколов во всех без исключения действующих спутниковых системах связи и передачи данных. Изменить технологии и протоколы в действующих спутниковых системах невозможно, что очевидно.

Новые проекты спутникового IoT на основе LoRa/LoRaWAN

Учитывая, что рынок IoT развивается очень высокими темпами (его потенциал составляет сотни миллиардов долларов [5]), требуются принципиально новые низкоорбитальные спутниковые системы с целевой функцией IoT, в которых услуга конкурентоспособна по сравнению с аналогами в сотовых сетях и сетях LPWAN. Более того, услуга должна быть бесшовной, то есть АСП должны иметь возможность работы как в наземных сетях, так и в спутниковой сети IoT [6].

По некоторым прогнозам, с учетом новых спутниковых систем IoT число подключений в 2025 году увеличится до 15,7 млн [3],

Таблица 1. Примеры абонентских средств потребителей услуги IoT в системе Iridium. Источник: satellitophonestore.com

Терминал	Edge	9522B	Limitless 9523
Цена	\$454	\$1 599	\$1 575
Объем пакета, байт (передача/прием)	340/270	1960/2400	1960/2400
GPS-навигатор	+	-	+
Габарит (без антенны), мм	130×30×80	162×28×81	70,44×14×36,04
Вес (без антенны), г	320	420 (с антенной 1,7 кг)	32
Интерфейсы	RS-232	RS-232 и голосовые приложения	Н/Д
Электропитание, В	9-32	9-32	3,2-6
Потребляемая мощность, Вт	1,6	Н.д. (для автомобиля)	2,3-3,1
Рабочая температура, °С	-40...+85	-30...+70	-30...+70
Применение	Фиксированный или мобильный, \$2 за 1 кбайт	Фиксированный или мобильный, \$2 за 1 кбайт	Фиксированный или мобильный, \$2 за 1 кбайт

при этом общее число подключений в наземных сетях LoRaWAN составит примерно 2 млрд [7]. Соответственно, бесшовность спутниковой сети IoT нужно обеспечить не только на уровне услуги IoT, но и на уровне технологии и протоколов. А это уже более высокий уровень интеграции, чем физическое объединение АСП разных сетей в одном устройстве. Например, с двумя SIM, как это делается в сетях спутниковой персональной связи для одновременной работы в сотовых сетях [8], или с использо-

ванием, например, единой технологии LoRa, но в разных диапазонах частот (для Земли ISM и S для спутниковой сети), как это объявлено в системе Echosar Mobile (табл. 2).

На рис. иллюстрируется структурная схема бесшовной сети IoT на уровне технологий, протоколов и частотных диапазонов. Идея адаптации наземных технологий для спутниковых систем IoT уже стала общепризнанной. В [9–11] обосновано, что среди известных технологий LPWAN для многоспутниковой

системы IoT оптимальной является технология LoRa (физический уровень OSI), поскольку она устойчива к эффекту Доплера (статическому и динамическому), а также обеспечивает возможность приема и передачи информации при уровне сигналов значительно ниже (более чем на 20 дБ) уровня шумов в канале. Причем эти сигналы в абонентских радиоприемниках «КА — Земля» существенно ниже, чем взаимные помехи, которые генерируют РЭС наземных сетей LPWAN и РЭС SDR (ETSI EN 300 220-1 Report 261).

Таблица 2. Спутниковые системы и космические аппараты с целевой функцией IoT (август 2022 г.)

Компания (страна)	Орбитальная группировка	Частоты абонентских радиоприемников	Основные сведения
CLS (Keneis) (Франция)	25 КА Размерность 16U (25 кг) Орбита: 500 км, наклонение 97,5° САС до 4–5 лет	169,4–169,475 МГц 401,3–401,69 МГц S-диапазон (фидерная линия)	Реализация планировалась в 2021–2022 гг. как развитие системы Argos на основе новой группировки KA Angels. Стоимость системы \$130 млн. Проект поддержан CNES.
Astrocast (Швейцария, США)	80 КА (16 резервных), Размерность 3U (5 кг) Орбита ССО 525 км САС 3–5 лет	L-диапазон	2 демонстратора в 2018–2019 гг. В 2022 г. действует примерно 20 КА. Реализация полной группировки была намечена в 2022 г. Стоимость КА в начале \$0,5 млн, в серии \$0,25 млн, система коррекции \$55 тыс. Проект \$50 млн. Проект поддержан ESA, Thruaya и Airbus. Объявлено, что проприетарный модем Astronode S для терминала стоит \$49, антенна \$3,9. Законченное устройство Astronode S+ стоит \$79 (с антенной). Тарифный план от \$1,3 в месяц за 1 кбайт до \$11 за 60 кбайт в месяц. В мае 2022 г. Astrocast приобрел компанию Hiber.
Hiber Inc. (Нидерланды)	До 48 КА (8 кг) Высота орбиты 600 км САС 3 года	«Земля — КА» 399,9–400,05 МГц «КА — Земля» 400,15–401 МГц Фидерная линия S-диапазон	Предыдущее название Magnitude Space. С 2022 г. принадлежит Astrocast. Сроки реализации 2022–2023 гг. Инвестиции в 2017 г. 5,5 млн, в 2019 г. 7,5 млн евро. В 2018 г. запущено 2 КА. Проект в 2017 г. поддержан Iridium. Поддержан ESA (общезы инвестициями 278 млн евро). В 2021 г. планировалось иметь 2–3 экспериментальных КА. Абонентские устройства примерно \$199. Пакеты до 175 байт. Но в конце 2021 г. Hiber отказалась от лицензии FCC и не будет создавать собственную спутниковую сеть IoT, а использовать сторонние ресурсы.
Sky and Space Company Limited (Великобритания, Австралия)	200 КА, размерность 8U (12 кг) Орбита: 5 плоскостей по 40 КА, высота 700 км, наклонение 0–13° САС 5–7 лет	«КА — Земля» и «Земля — КА»: UHF и S. Рассматривается L-диапазон. «КА — КА»: S-диапазон. Планируется SDR.	Предыдущее название компании Sky and Space Global Limited, в 2021 г. изменено на Sky and Space Company Limited. Реализация проекта планировалась с 2019–2022 гг. Коммерческая эксплуатация намечена с 2023 г. Начальный этап предусматривает 16 КА. Платформа GomSpace, 150 Вт. 3 демонстратора в 2017 г. Проект оценивается в \$120–160 млн. Запуски PH PSLV, 50 запусков. Стоимость запуска КА \$200–250 тыс. Стоимость спутника менее \$500 тыс. Проект поддерживает UK Space Agency. Всего планируется до 400 КА. Сведений о протоколах на физическом и канальном уровнях нет. Сведений о развитии проекта нет. Предположительно компания испытывает финансовые проблемы, но обещает создать систему в 2023 г.
Helios Wire (Канада)	30 КА Размерность КА 16U (21 кг). Высота орбиты 600 км, 5 абонентских лучей.	S-диапазон (полоса 30 МГц)	Запущено 2 демонстратора в 2018 г. Реализация в 2021–2023 гг. Проект \$100 млн, \$1 за датчик в месяц, стоимость спутника \$3 млн. Инвестиции в 2017 г. — \$4 млн, в 2019 г. — \$6 млн. Запуски PH «Союз». Приобретена компанией Echosar в 2019 г. Сведений о развитии проекта нет.
Blink Astro (США)	Размерность КА 3U (4 кг) Высота орбиты 700 км	Н.д.	Запущен КА-демонстратор. Данных о сроках реализации и финансировании нет.
MurIoT Pty. LTD (Австралия)	50 КА Масса КА 10 кг Орбита 600 км	156–165 МГц 399–403 МГц 433–435 МГц	Проект поддержан правительством Австралии. Инвестиции к 2021 г. — \$37 млн. Цена собственного абонентского модуля планировалась \$50 (в 2022 г. цены заявлены в несколько раз больше). Разработан свой проприетарный протокол и чип. Объем пакетов 20 байт. В 2022 г. планировалось иметь 25 КА. Стоимость спутника оценивалась в \$1 млн. В 2020 г. компания приобрела 4 КА, которые принадлежали компании exactEarth Ltd. В сентябре 2021 г. заключено соглашение с компанией Spire Global, которое предполагает использовать ее спутниковую группировку.
Swarm Technologies Inc. (США)	150 КА Орбита 325–585 км Масса КА до 0,6 кг САС < 3 лет	«КА — Земля» 137–138 МГц, «Земля — КА» 148–150,05 МГц	В 2021 г. Swarm приобретена компанией SpaceX. С 2019 г. действует 7 демонстрационных спутников Space BEE, на начало 2021 г. — 81 КА, в 2022 г. — 160 КА. Начало предоставления услуг — с 2021 г. Задержка доставки информации до 1 ч. Число земных станций сопряжения 18 в 2022 г. Всего планируется более 40. Общий объем привлеченных инвестиций \$36 млн. Используется технология и протокол LoRa/LoRaWAN (ЭИИМ каналов КА 31,8 дБм). АСП SparkFun M138 (без антенны имеет размер 51×30×5,3 мм, масса 9,3 г). Потребление (типовое) в режиме передачи 2,8 Вт, в режиме приема 0,86 Вт. Подключается отдельно антенна Swarm и антенна GPS. АСП SparkFun M138 стоит \$89, полная стоимость с антеннами примерно \$ 150. Тариф \$5 в месяц за одно АСП. В цену входит 750 пакетов данных на устройство в месяц (до 192 байт на пакет), из них до 60 нисходящих пакетов данных.
Lacuna Space Ltd. (Великобритания, Нидерланды)	32 КА Полярные орбиты 500 км Спутник 6U (10 кг)	Диапазон ISM 868/915 МГц, S-диапазон	В 2020 г. в тестовом режиме работает 2 спутника. Планируется запустить 4 демонстрационных спутника. ПН с запоминанием, протокол LoRaWAN. В 2022 г. заявлено о начале коммерческого тестирования. Стоимость 100 пакетов данных по 50 байт составляет 1 фунт.
EchoStar Mobile (Ирландия)	КА на ГСО 10,25 °E	S-диапазон (1995– 2010/2185–2200 МГц)	Используется КА EchoStar XXI (прежнее название TerreStar 2) с организацией каналов LoRa/LoRaWAN. Абонентские терминалы поставляются HNS (максимальная потребляемая мощность при передаче 15 Вт, при приеме 8 Вт). Работа в движении до 120 км/ч. Сведений о тарифных планах пока не сообщается. Заявлено, что абонентский терминал будет работать в сетях LoRa и в спутниковой сети.
Роскосмос (Россия)	264 КА (примерно) Наклонные орбиты 750 км Масса КА 50 кг САС 5 лет	Диапазон 868/915 МГц, S-диапазон Фидерная линия С	В 2024 г. планируются запуски демонстрационных спутников. ПН спутников с обработкой и регенерацией на борту, многолучевые антенны, технология и протокол формирования каналов LoRa/LoRaWAN. Проект программы «Сфера» (проект заявлен АО «ВИС-ТЕЛ» в 2018 г., в 2021 г. ИСС им. академика М. Ф. Решетнева подписан контракт с ГК «Роскосмос»), первый этап 132 КА.
THAIOT (Тайланд)	Экспериментальный КА Размерность 3U Орбита 550 км	145,888 МГц 435,888 МГц S-диапазон (2250 МГц), фидерная линия	Запуск КА планируется в 2022/2023 г. Технология и протокол LoRa/LoRaWAN. Полезная нагрузка построена на основе чипов GetWay SX1301 и SX1255, используется SF = 12 и 11 (предположительно).

Таблица 2. Спутниковые системы и космические аппараты с целевой функцией IoT (август 2022 г.)

Компания (страна)	Орбитальная группировка	Частоты абонентских радиочастот	Основные сведения
Sateliot (Испания)	100 КА Размерность 3U САС до 6 лет	400,57 МГц	22.03.2021 запущен демонстрационный КА (3B5GSA). Планируется технология NB-IoT. Первые 16 спутников оцениваются в \$35 млн. По плану начало запуска к концу 2022 г. (сведений о достаточном финансировании нет). Проект оценивается в \$100 млн. Полное развертывание системы – 2025 г.
Totum (США)	Первый этап 28 КА Размерность 6U	2,4 ГГц (ISM)	Запущен демонстрационный спутник (разработан компанией Loft Orbital). Свой чип (себестоимость \$4) и своя запатентованная технология с использованием сигнально-кодированной конструкции с расширением спектра (разработан компанией Orgsa). Запас в абонентской радиочастоте 20 дБ. Внутреннее геопозиционирование с точностью 20 м.
DEWA Space-D (ОАЭ)	Демонстрационный КА Орбита 525 км Размерность 3U	Н.д.	Космическая программа DEWA Space-D (Дубай). Запущен первый демонстрационный спутник DEWA-SAT 1. Второй размерностью 6U планируется в 2022 г. Сеть основана на LoRa/LoRaWAN.
AmbaSat-1 (Великобритания)	Учебный КА Размерность 3U Орбита 250 км САС 3 месяца	ISM (868/915 МГц)	Учебный набор для КА. Используется модуль LoRa/LoRaWAN с SF = 6-12. Стоимость набора учебного плана \$200-\$300. Запуски предлагаются на ракете «Нантун» (Interorbital Systems). Используется наземная сеть LoRa Things Network.
Норби (Россия)	Экспериментальный КА Размерность 6U САС 3 года	436,7 МГц	КА «Норби 1» запущен в сентябре 2020 г. Проект ориентирован на экспериментальные задачи. Контроль и управление КА организованы на основе LoRa/LoRaWAN. В 2022/2023 г. планируется запуск КА «Норби 2», который предполагает наличие полезной нагрузки для отработки технологий LoRa.
FossaSat (Испания)	Экспериментальные КА Масса 250 г Орбита ССО Высота 530 км	ISM	Первый КА FossaSat-1 запущен в конце 2019 г. Полезная нагрузка LoRa/LoRaWAN на основе чипа SX1278 (137-525 МГц). Стоимость спутника с учетом запуска 30 тыс. евро. В начале 2022 г. запущена серия из 13 КА FossaSat-2. Полезная нагрузка на основе чипа SX1268T (434/490/780 МГц). Мощность 9 Вт. Точность ориентации 5°.
Challenger One (Тунис)	30 КА Размерность 3U Орбита 500 км	ISM (868 МГц)	Первый КА в 2021 г. Планируется создать сеть из 20 КА примерно в 2024 г. Технология и протокол LoRa/LoRaWAN.
OQ Technology (Люксембург)	Taiger 2 (AYAN-21) Размерность 6U Taiger 3 Орбита 530 км	S-диапазон	Экспериментальные спутники для отработки возможности адаптации технологии NB-IoT для низкоорбитальной системы. Запущены два демонстрационных спутника. Второй КА – класс «микрo». Результаты экспериментальных исследований не публикуются.
Skylo (США)	КА на ГСО	S-диапазон (предположительно)	В 2020 г. заявлено о разработке своей собственной технологии IoT. В последующем заявлено, что с SIM сотовой сети будет обеспечено предоставление услуги IoT на основе NB-IoT. В 2021 г. заявлено, что заключено соглашение с Inmarsat. Технические параметры не публикуются.
Geely (Китай)	240 КА САС 5 лет Масса КА 130 кг	Н.д.	В 2021 г. запущены два первых демонстрационных КА (запуск неудачный), в 2022 г. запущены 9 КА GeeSAT-1. Основная цель системы – создать сеть IoT с возможностью геопозиционирования беспилотных автомобилей. Первый этап предусматривает 70 КА в 2025 г. В 2021 г. создан завод по производству спутников с режимом до 500 КА в год.
Tianqi (Китай)	38 КА Масса 50 кг	Н.д.	Несколько первых демонстрационных спутников имеют размерность 6U. В 2021 г. запущено 14 КА как первый этап. В 2022 г. планируется завершить развертывание спутниковой группировки.
Xingyun (Китай)	80 КА Масса 45 кг Орбита 570 км	L-диапазон (экспериментальный КА)	Два экспериментальных КА запущены в 2020 г. (масса КА 93 кг, орбита ССО). В 2022 г. планируется создать группировку из 18 КА (масса КА 45 кг). Полная группировка планируется в 2023 г.
Skywalker Constellation (Китай)	48 КА Масса КА 45 кг	Н.д.	36 КА на шести орбитах с наклоном 50°, высота 700 км. 12 КА на ССО, орбита 500 км. Запущено несколько экспериментальных КА. В 2020 г. запущен спутник HEAD-5, полезная нагрузка которого поддерживает технологию LoRa (предусмотрен коллективный и индивидуальный доступ). Задержка в сборе данных до 1 ч. Абонентские терминалы LoRa имеют сопряжение с сетью GSM. Дополнительная полезная нагрузка АИС и АЗН-В. Завершение проекта намечено на 2023 г. Разработку ведет совместно с компаниями Франции и Нидерландов.
OmniSpace LLC (США)	200 КА размерность 12U (примерно 16 кг)	1980-2010/2170-2200 МГц	Совместно с TAS созданы спутники Spark-1 и 2, запущены в 2022 г. Цель – обеспечить тестирование бесшовного предоставления услуги с сетями 5G на частотном канале n256 (5G NR frequency band) на основе открытых протоколов 3GPP (но непонятно, каких конкретно). Используется технология LoRa и ее новый вариант LR-HFSS.
Eutelsat ELO (ЕС)	25 КА	ISM (868 МГц)	Планировалось создать группировку КА, поддерживающую технологию SigFox. Полезные нагрузки ELO1 и ELO2 в качестве дополнительной размещены на спутнике YAM-3 (запущен в 2021 г.). Но что-то пошло не так. В новых демонстрационных спутниках ELO 3 и 4 (размерность 6U) запланирована технология LoRa. Запуски в 2023-2024 гг. Компании TrakAssure и Wyld Networks будут разрабатывать абонентские устройства LoRa, а компания Senef (оператор сети LoRaWAN) создаст наземную инфраструктуру для бесшовной работы со спутниковой сетью ELO.
Aistech (Испания)	98 КА Размерность 2U	Н.д.	Спутники DANU имеют несколько полезных нагрузок, в том числе и для IoT. Протокол неизвестен.
Fleet Space (Австралия)	140 КА Размерность 6 U (12 кг) Орбита 520 км	ISM (S-диапазон)	Запущено 6 экспериментальных КА. Орбита ССО. Технология и протокол LoRa/LoRaWAN. Используется многолучевая антенная решетка для минимизации помех. В мае 2022 г. запущен спутник Centauri 5. Общая емкость эквивалентна 500 кбит/с. Наземная сеть интегрирована с сетью LPWAN LoRa.

Но существуют формальные ограничения радиочастотных нормативных правил. Эти ограничения могут быть решены использованием п. 4.4 Регламента радиосвязи (PP). Данный пункт устанавливает, что система не должна требовать защиты от помех и не должна создавать «мешающих помех» для иных систем, работающих в соответствии с Таблицей распределения полос радиочастот PP. Но отметим, что ни одна новая система на НГСО нормативно не может быть

защищена от помех, даже если рабочие частоты выбраны в соответствии с Таблицей PP.

Проекты спутникового IoT на основе NB-IoT

Активные исследования ведутся не только применительно к адаптации технологии LoRa. Например, исследуется возможность адаптации технологий NB-IoT, однако достоверных результатов о практическом решении этой задачи пока

нет. Экспериментальные результаты с использованием демонстрационных наноспутников (проекты Skylo Technologies и OQ Technology) в литературе не приводятся, а в публикациях теоретического характера анализируются проблемы, а не решения самой задачи [10].

Общие сведения об адаптации NB-IoT (3GPP 5G NB-IoT NTN) планируется разработать в 3GPP Rel.17 и последующих релизах, которые предполагают применение S-диапазона

для совместной работы наземных сотовых и спутниковых сетей, то есть поставлена задача бесшовности сети IoT. Основная техническая проблема — компенсация эффекта Доплера. Ее решение возможно, но стоимость абонентских устройств IoT и эксплуатационные параметры такой системы будут неконкурентоспособны, поскольку у абонента должен быть приемник НГСС (с дополнительной антенной) и непрерывное знание эфемерид каждого КА орбитальной группировки. При этом полезная нагрузка КА должна иметь обработку информации на борту, поскольку «прозрачная» ретрансляция приведет к проблемам энергетики абонентских радиолиний и увеличению стоимости земного сегмента. В 3GPP решение этих проблем запланировано, но в относительно отдаленной перспективе, после 2024 года [12].

Проекты спутникового IoT на основе технологий сети Sigfox

Есть сведения и о попытках адаптации сверхузкополосной технологии LPWAN, применяемой в сети Sigfox, для низкоорбитальной спутниковой системы ELO компании Eutelsat. Но, судя по отсутствию публикаций и переориентации проекта ELO на технологию LoRa, практическое применение технологии Sigfox не состоялось. Проблемы почти аналогичны проблемам при адаптации NB-IoT. Добавляется проблема температурной стабильности частоты, поскольку используются каналы «вверх» 100 Гц. Кроме того, имеется ограничение по объему пакета «вверх» (12 байт) и «вниз» (8 байт), что принципиально ограничивает перечень доступных приложений IoT. Соответственно, невозможно предоставить сервисы, которые требуют реакции в режиме, близком к реальному времени, поскольку только подача сигнала (абонент — сервер IoT-абонент) в узкополосном канале 100 Гц в идеале составит 2 с.

Проекты спутникового IoT на основе проприетарных технологий IoT

Как уже отмечалось, проприетарность технологий в современных спутниковых системах связи и передачи данных — основная проблема, которая не позволяет спутниковым сервисам прописаться на массовом рынке телекоммуникаций. Но в ряде новых проектов спутникового IoT продолжается ориентация на применение собственных проприетарных технологий и протоколов. Можно предположить, что при удачном техническом решении можно физически встроить новый (проприетарный) спутниковый чип в специальное двухмодовое АСП. Хотя такое решение существенно ограничивает потребительский рынок и приводит к увеличению себестоимости абонентских устройств по отношению к аналогам в сотовых сетях и сетях LPWAN, спутниковый оператор получает приоритетное право. Анализ планируемых решений показывает, что таких проектов достаточно много (табл. 1). В ряде проектов отмечается, что в перспективе проприетарные решения ориентированы на создание открытых стандартов. Но пока ни один стандарт, предложенный для спутниковой системы, не стал универсальным.

Бесшовность спутниковой сети IoT

В таблице 2 приведены краткие сведения о ряде планируемых систем спутникового IoT, в том числе ориентированных на решение задачи бесшовности на основе технологии LPWAN LoRa и технологии NB-IoT, которая продвигается в 3GPP. Относительно технологии NB-IoT нет достоверных сведений об экспериментальных результатах, подтверждающих перспективность этого решения. В таблице 2 даны краткие сведения о системах и КА, которые уже действуют и имеют полезную нагрузку, в том числе поддерживающую сигналы LoRa. Из этих данных следует, что применение технологии LoRa — это экспериментально апробированное решение для низкоорбитальных систем IoT.

Но для реальной бесшовности с наземными сетями LPWAN необходимо использовать диапазон радиочастот ISM (не выше 1 ГГц). Это позволит и в спутниковой сети обеспечить работу АСП без прямой видимости КА при достаточном (например, 12 дБ) энергетическом запасе в абонентских радиолиниях, что показано в [10, 11], то есть эксплуатационные условия АСП в спутниковой сети становятся соизмеримыми с их работой в наземной сети.

Соответственно, если услуга спутникового IoT будет конкурентоспособна на рынке, то приобретет массовый характер за счет потенциальной глобальности спутниковой системы IoT и наличия множества АСП еще до того, как орбитальная группировка спутниковой системы будет развернута [13]. Но для решения этой общей принципиальной проблемы требуется решение ряда частных задач.

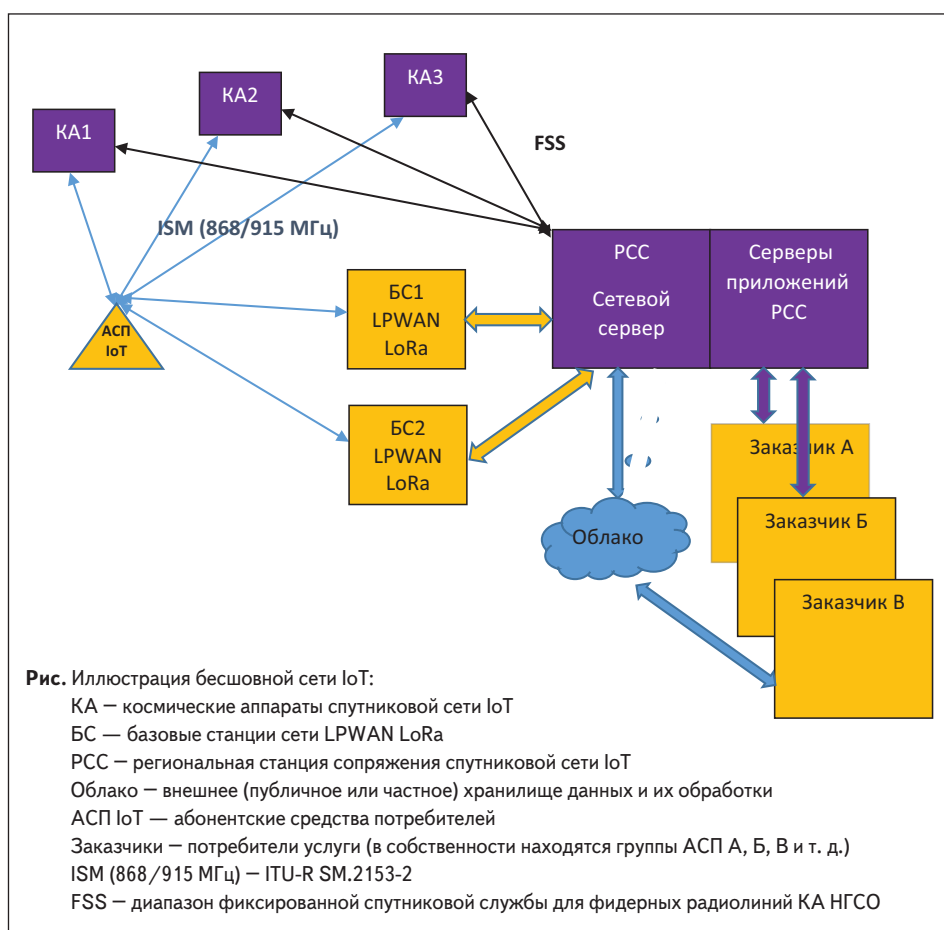
Одна из таких задач — радиочастотное обеспечение (РЧО) низкоорбитальной спутниковой системы IoT. В данном случае задача сводится к доказательству, что на линии «вниз» спутниковая система не создает «мешающих помех», если на линии «вверх» используются уже существующие АСП сетей LPWAN.

За последние десятилетия, применительно к любой спутниковой системе, проблема РЧО стала задачей, которую можно назвать некорректной, поскольку ее решение основано на условиях неопределенности или противоречивости исходных данных.

Следует отметить, что частотный ресурс давно исчерпан вплоть до 50–60 ГГц. Если следовать Таблице распределения полос радиочастот между радиослужбами, то невозможно заявить ни одну систему НГСС ни в каком диапазоне частот на условиях ее защиты от помех со стороны реальных и «бумажных» систем. Это относится к любым негеостационарным системам связи, а потому задача создания бесшовных сетей (спутниковых и наземных), которые совместно используют диапазон радиочастот, практически не усложняет задачу РЧО. Но следует особо отметить, что ни одна новая система на НГСС нормативно не может быть защищена от помех, даже если ее рабочие частоты выбраны в соответствии с Таблицей РР.

РЧО на линии «вниз» в диапазоне ISM

В данном случае рассматривается диапазон частот ISM (868/915 МГц), в котором на безлицензионной основе работают наземные сети LPWAN и разнообразные РЭС SRD ближнего радиуса



действия (без получения каких-либо разрешений, конечно, если соблюдаются нормативно-технические условия). В [8, 15] показано, что эта задача имеет решение на линии «Космос — АСП» применительно к низкоорбитальной системе спутникового IoT, если спектральная плотность ЭИИМ для типового канала 125 кГц в диапазоне ISM не превышает 36 дБм. В этом случае помехи, создаваемые сигналами КА на линии «Космос — АСП», будут заведомо ниже допустимых уровней помех, установленных нормативно-техническими документами [16], предусматривающими выполнение условия отсутствия «мешающих помех» работе устройств SRD и сетей LPWAN в полосах радиочастот ISM (868/915 МГц), даже при непрерывном излучении сигнала (коэффициент цикличности $D_c = 1$). При циклической передаче пакетов время воздействия помехи в общем случае является случайной величиной. При ограничении на цикличность $D_c < 10\%$ запас по уровню воздействия помехи относительно канала с непрерывным излучением составляет не менее $10 \lg(D_c)$ дБ (минимум 10 дБ при $D_c = 0,1$). То есть физических ограничений нет на совместное использование диапазона частот ISM (868/915 МГц) для реализации бесшовного взаимодействия спутниковой и наземной сети LoRa (рисунок).

Формальные ограничения для линии «КА — АСП» радиочастотных нормативных правил могут быть решены путем использования п. 4.4 Регламента радиосвязи (PP). Этот пункт устанавливает, что система не должна требовать защиты от помех и не должна создавать «мешающих помех» для иных систем, работающих в соответствии с Таблицей распределения полос радиочастот PP.

Помехи на линии «АСП — КА» в диапазоне ISM

В современном мире ни одна новая система на НГСО не имеет нормативно-правовых основ для защиты от помех со стороны действующих и заявленных в ИТУ систем. Помехи в приемных каналах КА — это проблема оператора негеостационарной спутниковой сети.

В данном случае для обеспечения бесшовности используется диапазон ISM. Помехи создают наземные РЭС SRD и сети LPWAN. Применительно к технологии LoRa необходимо оценить допустимую величину (C/I) , то есть отношение полезного сигнала (C) к суммарной помехе (I) на входе приемного устройства КА в полосе частот канала. В качестве исходного критерия допустимого уровня помехи (защитного отношения) можно принять значение $(C/I)_{\min} = -14$ дБ, которое нормативно установлено для наземных сетей LPWAN LoRa. В [15] значение $C/I = -14$ дБ приводится, но без его обоснования. Можно предполагать, что это усредненное значение C/I при условии, что коэффициент расширения спектра SF для помехи (I) отличается от SF полезного сигнала (C). За счет особенности формирования изменения частоты в пределах полосы частот канала LoRa достигается квази-ортогональность сигналов с разными SF [17–19]. Другими словами, обеспечивается развязка сигналов с разным значением SF при приеме пакетов. По статистике, для наземных сетей LoRa преимущественно применяется SF = 7 [18], потому значение $(C/I)_{\min}$, видимо, дано

относительно SF = 7. Результаты исследования вопроса оценки уровня помех в приемных каналах КА в диапазоне ISM требуют отдельной статьи. В данном случае отметим, что частотный план работы спутниковой системы в диапазоне 868/915 МГц должен учитывать, что нельзя назначать частоты каналов на частотах, предусмотренных для РЭС RFID. Задача минимизации помех и защиты от них решается путем корректного выбора частотного плана распрямления каналов, обеспечением его реформатирования в зависимости от обслуживаемого региона Земли и применения многолучевых бортовых антенн для минимизации источников помех с учетом уникальных свойств технологии LoRa, обладающей свойством защищенности от помех.

Выводы

Из обзора спутниковых систем IoT (табл. 2), которые ориентированы на услуги IoT, следует, что перспектива массового распространения услуги связана с созданием целевых систем спутникового IoT, обладающих свойством бесшовности.

Переход к практической реализации и коммерческой эксплуатации бесшовных спутниковых сетей IoT — вопрос времени. Окно возможностей постепенно сокращается, поскольку идут интенсивные разработки новых систем спутникового IoT. Создаются демонстрационные КА, в основном на базе низкоорбитальных КА класса «нано» и «микро». В ряде спутниковых проектов IoT уже заявлено о предоставлении коммерческой услуги (даже публикуются тарифные планы), и эта тенденция будет активно развиваться.

Ключевым условием коммерциализации спутниковой системы IoT является достижение ценовых показателей услуги, соизмеримых с аналогами в сотовых сетях. Единственным перспективным решением для обеспечения коммерциализации и бесшовности глобальной сети IoT является интеграция спутниковой сети IoT и наземных сетей LPWAN/LoRa.

Тенденция создания бесшовных сетей, в которых используются совместно частоты наземных сетей и спутниковых сетей, имеет место не только в области IoT, но и в материалах 3GPP в S-диапазоне применительно к 5G. ■

Литература

1. Годовой отчет Iridium за 2021 г. [www.file:///C:/Users/Валик/Downloads/2021%20Annual%20Report%20-%20EZ%20Blue%20\(Final%20Web%20Page%20version\).pdf](http://www.file:///C:/Users/Валик/Downloads/2021%20Annual%20Report%20-%20EZ%20Blue%20(Final%20Web%20Page%20version).pdf)
2. Эйдус А. Анализ действующих негеостационарных спутниковых систем на рынке M2M/IOT и оценка коммерческой перспективности планируемых многоспутниковых систем // Технологии и средства связи. 2017. № 6.
3. Satellite IoT market to hit 15.7m connections in 2025, growing 35.8% per year. <https://enterpriseiotinsights.com/2021/10/11/channels/news/satellite-iot-market-to-hit-15-7m-connections-in-2025-growing-35-8-per-year>
4. Анпилогов В. Р. Глобальные спутниковые системы M2M/IoT: новые проекты и новый рынок. <http://2019.en-t.info/old/report2018/rt-4-anpilogov.pdf>

5. Нгуен Д. А., Ершов А. В. Система «Марафон IoT» и новый спутниковый рынок IoT // Технологии и средства связи. Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание — 2022». 2021. № S1.
6. ECC Report 305, M2M/IoT Operation via Satellite, approved 14 February 2020.
7. Spoke will use T IoT to protect vulnerable road users. www.iotechnews.com/news/2022/jul/15/spoke-use-t-iot-protect-vulnerable-road-users/
8. THURAYA X5-TOUCH. www.thuraya.com/en/products-list/land-voice/thuraya-x5-touch
9. Анпилогов В. Р. Уровни сигналов и помех при совместной работе сетей LPWAN и низкоорбитальной спутниковой системы M2M/IoT // Технологии и средства связи. Спецвыпуск «Спутниковая связь и вещание». 2018. № 6.
10. Анпилогов В. Р., Нгуен Д. А. Анализ совместности спутниковых сетей IoT с устройствами SRD и LPWAN в диапазонах частот 868/915 МГц // Электросвязь. 2020. № 1.
11. Нгуен Д. А. Исследование технологий в наземных сетях LPWAN и их адаптация для использования в спутниковых низкоорбитальных системах с целевой функцией «Интернета вещей», www.mipt.ru/education/post-graduate/nguen-dyk-an.php?clear_cache=Y
12. Game-changing satellite-based 5G technology: Stay connected worldwide. <https://gatehouse.com/satcom/satellite-iot-and-m2m-connectivity/5g-satellite-nb-iot/>
13. www.thethingsnetwork.org/#workbench
14. Kodheli O., Maturro N., Chatzinotas S., Andrenacci S., Zimmer F. NB-IoT via LEO satellites: An efficient resource allocation strategy for uplink data transmission. www.arxiv.org/pdf/2107.01067.pdf
15. Нгуен Д. А. Оценка энергетики абонентских радиолиний и информационной емкости спутниковой низкоорбитальной системы «Интернета вещей» // T-Comm. 2021. Т. 15. № 11.
16. ECC Report 261, Short Range Devices in the frequency range 862-870 MHz, Approved 27 January 201. www.docdb.cept.org/download/1291
17. Croce D., Gucciardo M., Mangione S., Santaromita G., Tinnirello I. Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-level Performance. www.researchgate.net/publication/319486965_Impact_of_Spreading_Factor_Imperfect_Orthogonality_in_LoRa_Communications
18. Mohammadi S., Farahani G. Scalability Analysis of a LoRa Network Under Inter-SF and Co-SF Interference with Poisson Point Process Model // Journal of Computing and Security. 2021. Vol. 8. Iss. 2.
19. Blenn N., Kuipers F. LoRaWAN in the Wild: Measurements from The Things Network. www.arxiv.org/pdf/1706.03086.pdf

Дополнительную информацию по спутниковым системам и космическим аппаратам из таблицы 2 можно найти на сайте журнала по ссылке

