

Технологии Direct-to-Device и их перспективы в России



Валентин АНПИЛОВ,
заместитель генерального директора
АО ВИСАТ-ТЕЛ, к.т.н., доцент



Андрей ГРИЦЕНКО,
генеральный директор АО ИКЦ
Северная корона, к.т.н., доцент

Под обозначением D2D (Direct-to-device) в общем случае понимают техническую возможность организации прямого доступа к спутнику со стороны типовых, как правило, немодифицированных абонентских устройств (АУ). Например, смартфонов 4/5G и/или устройств IoT, работающих в существующих наземных радиосетях. Термин Direct-to-Device имеет и альтернативные обозначения, например, Direct-to-Cell, Direct-to-Handset и т. п.

О технологиях Direct-to-Device

Вопросы развития систем D2D приобрели особую актуальность примерно 5 лет назад [1].

В какой-то степени эти технологии уже давно реализованы в спутниковых системах на низких (LEO) и геостационарной (ГСО) орбитах. В частности, система Orbcomm обеспечивает пакетную передачу данных с необслуживаемых устройств, а системы Globalstar и Iridium, а также Thuraya обеспечивают низкоскоростную передачу данных и голосовую связь с абонентскими устройствами типа «трубка в руке». В двухрежимном варианте эти решения подразумевают, по сути, два терминала в одном. Один для спутниковой связи, другой для работы в сотовой сети. Такие решения целесообразно обозначить как интегрированные, поскольку наземная и спутниковая компоненты независимы.

В этих системах в спутниковой компоненте используются проприетарные технологии и протоколы. В результате – высокая себестоимость производства абонентских терминалов и невозможность обеспечить массовость рынка.

Сегодня активно рассматривается и обсуждается создание альтернативных систем, которые называют гибридными спутниковыми системами.

Гибридные системы

Гибридные системы, которые в общем случае будем обозначать как D2D, имеют несколько разновидностей. Они различаются между собой целевой функцией и применяемыми абонентскими терминалами. В таблице 1 представлена краткая характеристика гибридных систем и предлагаемое их обозначение.

Обозначение	Назначение	Примеры проектов
D2D 4/5G	Прямой контакт с немодифицированными типовыми смартфонами сетей 4/5G	AST SpaceMobil Lynk Global Starlink (D2D)
D2D IoT	Прямой контакт с немодифицированными типовыми устройствами Интернета вещей в сетях LPWAN/LoRa и с частично модифицированными типовыми устройствами Интернета вещей NB-IoT в сетях 4/5G	«Марафон IoT» (LoRa) Lacuna Global (LoRa) Starlink (LoRa) Satelliot (NB-IoT) Skylo (NB-IoT)
D2D-M 5/6G	Прямой контакт с модифицированными смартфонами в будущих сетях 5/6G	Iridium Globalstar

Примечание: «М» обозначает, что используется модифицированное абонентское устройство (смартфон)

В общем случае гибридные системы включают в свой состав наземную компоненту, а также одну или несколько других компонент, например, спутниковую и/или воздушную (HAPS) и т. д. В данном случае будем рассматривать сеть, содержащую наземную и спутниковую компоненты.

В интегрированной сети работа каждого из сегментов осуществляется независимо друг от друга, а решение о переходе с одной компоненты на другую принимается на уровне АУ. Пример – двухрежимный терминал Thuraya X5-Touch, у которого есть два слота для SIM-карт. Данный терминал имеет возможность работать как в спутниковой, так и в наземной сотовой сети. При выходе из зоны обслуживания наземной сети терминал может использовать спутниковую сеть. То есть, в данном случае обеспечивается комбинирование разных радиосистем.

В гибридной сети обе компоненты работают в одной полосе частот и имеют единую систему управления. Типовая гибридная сеть включает в свой состав базовые станции (БС) сотовой сети (или сети LPWAN) и орбитальную группировку космических станций (КА). Для АУ все эти станции воспринимаются как единая сеть БС, для доступа к которой нужна одна SIM-карта. Поэтому переход работы абонентской линии с БС на КА и обратно происходит незаметно для пользователя, или «бесшовно». «Бесшовность» – ключевое свойство гибридной сети. Этим достигается не просто комбинирование, а глубокая интеграция разных по своей физической природе радиосетей.

Важно, что в гибридной системе могут использоваться модифицированные, стандартные для наземной сети абонентские устройства и терминалы. Это значит, что они по определению более компактны, менее энергозатратны, чем абонентское оборудование интегрированных сетей, но самое главное, они уже существуют сегодня и их количество исчисляется миллиардами.

Далее будут рассматриваться особенности построения гибридных систем D2D 4/5G и D2D IoT.

Диапазон и полосы частот гибридных сетей

Требование использования единой полосы частот предопределяет сегодня два возможных сценария:

1. Спутниковая компонента использует полосу частот, выделенную для наземных радиосистем.
2. Наземная компонента использует полосу частот, выделенную для спутниковых радиосистем.

Наибольший интерес на современном этапе, безусловно, представляет первый сценарий, когда группировка КА просто дополняет сеть БС. Здесь нужно отметить, что понятие «гибридная радиосеть» в Регламенте радиосвязи (PP) МСЭ никак не определено. Поэтому этот вариант достаточно революционный, поскольку предусматривает возможность использования спутниковой системой части полосы частот, выделенной для сотовой сети, в диапазоне, не распределённом таблицей частот для космической службы. Такие системы сегодня заявляются по п.4.4 Реглаamenta радиосвязи, а в перспективе планируется международная легализация такого решения на ВКР-27 (п.1.13), которое получило название «дополнительное обслуживание из космоса» (является корректным переводом «supplemental coverage from space» (SCS)) [2]. Диапазон частот простирается от 694 МГц до 2700 МГц. Многие администрации связи находятся на стадии подготовки для разработки нормативных положений (в том числе и Россия) или разработали проекты своих национальных нормативных решений, но реально внедрила такое решение в свою нормативно-правовую базу пока только FCC (США) [3].

Второй сценарий планируется для реализации на основе действующих низкоорбитальных систем, например, Iridium и Globalstar. Этот сценарий также планируется для

исследований и возможного международного признания на ВКР-27 (п.1.11, 1.12, 1.14). Но в этом случае нужно создавать специальный чип и, по сути, новые смартфоны. В таблице 1 этот сценарий обозначен D2D-M 5/6G

Наибольший интерес и перспективу имеет первый сценарий, поскольку это действительно революционное решение для развития спутниковой связи. Но он подразумевает создание специальной орбитальной группировки, которая является основой спутниковой компоненты гибридной системы.

Облик спутниковой компоненты D2D 4/5G

Орбитальная группировка спутниковой компоненты во многом определяется тремя факторами: высотой орбиты, минимально допустимым значением угла места (УМ) и требуемой зоной охвата (зоной обслуживания).

Предположим, что требуемая зона охвата – территория РФ, включая Арктику. Высота орбиты должна быть по возможности минимальной, чтобы снизить энергетические затраты на прохождение сигнала от АУ к КА и его задержку. Выберем ее равной 500 км. Нужно отметить, что сегодня рассматривается возможность использования и сверхнизких орбит (VLEO) с целью увеличения скорости каналов, особенно на линии «вверх» [4]. Но пока это далекие перспективы.

Определиться с минимальным допустимым углом места – более сложная задача. Очевидно, что если спутниковая компонента «подхватывает» АУ за пределами городских каньонов, то значение минимального УМ может быть небольшим, например, 8 град. И в этом случае число спутников в составе орбитальной группировки тоже может быть относительно небольшим [5]. Причем даже при небольших затенениях местными предметами (различные сооружения, лес и др.) из-за постоянного изменения углового положения спутников перерывы будут относительно небольшими.

Ограничения на плотность потока мощности (ППМ или PFD), создаваемую абонентскими каналами КА на поверхности Земли, имеют разнообразные значения в зависимости от диапазона частот. Следует отметить, что если дальность в подспутниковой точке составляет 500 км и ППМ достигает максимума, то на границе многолучевой зоны обслуживания при малых УМ наклонная дельность вырастет более чем в 3,7 раза – до 1835 км, т. е. ППМ снизится примерно на 11 дБ в центре луча, соответственно, на границе зоны – на 14 дБ.

В [6] показано, что при значении УМ=8 град орбитальная группировка может быть одноэшелонной для непрерывного обслуживания абонентов на территории России на широтах выше 40N, включая Арктику. Один из результатов синтеза показан на рис.1. «Мощность» (число спутников Nка) орбитальной группировки составила 75 спутников. Таким образом, орбитальная группировка системы D2D 4/5G может быть небольшой «мощности». Значение Nка = 75, это минимально необходимое число спутников для организации непрерывного обслуживания абонентов в регионах на широтах выше 40N и ниже 40S.

Однако, как видно из рис. 1, такая ОГ способна обеспечить и глобальное обслуживание. Правда, в этом случае будут наблюдаться перерывы в связи. Математическое моделирование показало, что в большей части широтной полосы от 40S до 40N вероятность контакта составит около 75%. При этом среднесуточное число перерывов равно 73. Это означает, что суммарное за сутки время перерывов в связи может достигать 6 часов, но среднее время перерыва составит около 5 минут в экваториальном поясе

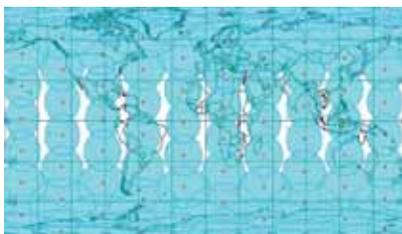


Рис. 1. Мгновенные зоны радиовидимости ($h=500$ км, УМ=8 град, Nка=75)

и постепенно уменьшается до нуля для широт 40N и 40S.

Формирование зоны обслуживания спутниковой компоненты обеспечивается сетью наземных региональных станций сопряжения (РСС). На рис. 2 показана зона обслуживания при использовании сети из 9-ти РСС, размещенных на территории России. Отметим, что эти РСС потенциально охватывают территории и соседних государств.

Использование межспутниковых линий в гибридной системе D2D 4/5G, предусмотренной для международного коммерческого применения, не допускается, поскольку практически в каждой стране существуют правила, не допускающие обработку национального трафика вне своей территории. Для развертывания сети D2D 4/5G вне России достаточно разместить в этих странах типовые РСС, сопряженные с национальной сетью общего доступа этой страны и ядром сети национального сотового оператора.

Особенности облика спутника системы D2D 4/5G

С высоты 500 км диаметр зоны обслуживания при минимальном УМ=8 град составит 3410 км, т. е. более 9 млн км² (площадь России немногим более 17,1 млн км², а общая площадь с учетом обслуживания Арктики составит не менее 40 млн км²). Если такую зону обслуживания формировать на основе многолучевой антенной системы КА, то потребуется несколько тысяч лучей. В данном случае обслуживание абонентов осуществляется точно несколькими относительно узкими «прыгающими» лучами. Если диаметр зоны обслуживания одного

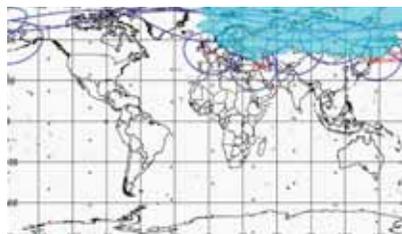


Рис. 2. Зона обслуживания при использовании сети из 9-ти РСС

луча в подспутниковой точке принять равным 100 км, то ширина его диаграммы направленности (ШДН) составит 11,4 град (усиление составит 24 дБи). Это максимальное значение ШДН, при которой скорость канала будет гарантированно достигнута сотни кбит в секунду, что является нижней границей для предоставления универсальной услуги связи. Для повышения скорости каналов необходимо создавать более узкие лучи, а, значит, более крупные бортовые АФАР, которые являются ключевым элементом полезной нагрузки спутника. Учитывая, что угол конуса обслуживания от спутника составляет 133,3 град, необходимо использовать несколько передающих бортовых АФАР: одна для центральной зоны, другие – для бокового обслуживания. Это условие приводит к тому, что архитектура КА должна быть плоской, обеспечивающей максимальную площадь для размещения АФАР.

Нужно отметить, что одной из проблем при создании спутников для систем D2D с «прыгающими» лучами для прямой связи со смартфонами является большое энергопотребление передающих АФАР, формирующих абонентские лучи [7]. В результате масса такого спутника становится значительной.

На рис. 3 показан пример формирования локальных зон обслуживания «прыгающими» лучами (ширина 11,4 град) с фиксированной точкой прицеливания для разного положения КА на орбите. Как видно из рисунка, размеры и геометрия локальных зон обслуживания в процессе движения спутника существенно изменяются. В итоге могут создаваться помехи иным системам и не выполняться заданное значение отношения помехи к уровню шума (I/N в заданном % времени) за ее пределами. Решение этой задачи возлагается на бортовые передающие АФАР со специальным управлением распределением амплитуд и фаз излучателей для компенсации формы диаграммы направленности главного лепестка и огибающей боковых лепестков диаграммы направленности каждого луча. Решение этой задачи хорошо изучено в антенной технике.

Облик спутниковой компоненты D2D IoT

Облик спутниковой компоненты D2D IoT отличается от облика D2D 4/5G тем, что вместо технологии «прыгающего» луча применяются скользящие лучи. Причем таких лучей может быть уже не тысячи, а менее нескольких десятков. В итоге резко упрощается архитектура КА. Спутник становится существенно меньше по массе и потреблению. Конечно, это не наноспутник, но его масса уже может быть в пределах 30–70 кг, при максимальном потреблении до 200 Вт. Все это достигается благодаря узкополосности каналов IoT и специфике используемых технологий и протоколов [8,9]. Характерным примером является проект системы «Марафон IoT». Это первая российская гибридная система класса D2D IoT, обеспечивающая бесшовный прямой контакт с типовыми устройства IoT наземных сетей LPWAN LoRa. Система предусматривает организацию глобально-распределенной сетевой инфраструктуры для предоставления услуг по передаче данных для формирования сервисов «Интернет вещей» (диапазон 863–870 МГц и 915–928 МГц вне России). Абонентские устройства представлены многообразием датчиков физических величин и модемами LoRa, которые доступны в любой стране мира. В системе также предусмотрен режим реального времени для контроля беспилотных систем и передачи управляющих команд (S-диапазон) [9], в том числе для высококомбинированных беспилотных систем, включая беспилотные надводные и воздушные суда.

Еще одним существенным отличием является то, что минимальный рабочий угол места работы абонентов принят равным примерно 30 град, поскольку необходимо обеспечить условия ЭМС с наземными РЭС. В итоге спутников нужно больше, чем в системах D2D 4/5G. Мгновенные зоны радиовидимости спутников системы представлены на рис. 4. Макет спутника «Марафон IoT» представлен на рис. 5.

Орбитальная группировка системы предусматривает применение

круговых полярных орбит высотой 750 км с наклоном 87,5 град, в 12 плоскостях. «Мощность» группировки для глобального непрерывного обслуживания составляет 252 спутника (и еще 12 резервных). Масса спутников по ТТЗ составляет 50 кг. Число потенциальных пользователей ожидается более 10 млн и в режиме реального времени до 1 млн.

Концепция системы прорабатывалась нами в 2017–2018 гг. Согласно текущим планам ГК «Роскосмос» ожидается, что экспериментальные спутники будут запущены в первой половине 2025 г., а первый этап развертывания орбитальной группировки в составе 132 КА будет реализован в период 2027–2028 гг. Завершение развертывания группировки можно ожидать в 2029–2030 гг.

Принципиальной системной проблемой в рамках данного проекта остался вопрос, где обрабатывать трафик. Варианта два: либо в одном центре на территории России, на чем настаивает головной исполнитель АО «РЕШЕТНЕВ» (ГК «Роскосмос»), либо каждая страна-участник (а проект является потенциально глобальным) может размещать средства обработки трафика на своей территории в составе своих РСС.

По мнению авторов, второй вариант обеспечивает системе «Марафон IoT» максимально высокий экспортный потенциал, так как соответствует национальным требованиям любой страны, принявшей решение разворачивать гибридную сеть D2D IoT на своей территории. При этом обеспечивается гибкость создания выделенных сетей IoT и на одной национальной территории. Например, в России в интересах крупных корпораций (таких как ПАО «Газпром» или ОАО «РЖД» и других), сотовых операторов и операторов сетей LPWAN, которые могут позволить себе иметь в собственности РСС для обеспечения информационной защищенности. Отметим, что создание такой системы может быть обеспечено без выхода в сети общего пользования, т. е. система получается физически недоступной



а) КА на широте 55 град



б) КА на широте 60 град



в) КА на широте 65 град

Рис. 3. Пример формирования гарантированных зон обслуживания лучами (ширина 11,4 град) с фиксированной точкой прицеливания в разных точках положения КА

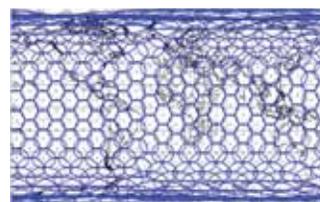


Рис. 4. Мгновенная зона обслуживания спутников системы «Марафон IoT»



Рис. 5. Макет спутника «Марафон IoT» (экспериментальный КА)

для влияния на нее со стороны внешних информационных воздействий.

Кроме системы «Марафон IoT» рассматриваются сегодня и иные проекты спутникового IoT. В том числе ПАО «МТС» рассматривает применение технологии NB-IoT в спутниковой низкоорбитальной системе. Особый интерес к теме NB-IoT обусловлен тем, что эта технология и сеть по факту уже имеется у любого сотового оператора 4G и существует в сетях 5G. Огромные усилия в этом направлении прикладывает консорциум 3GPP. Решение этой задачи уже намечилось, но проблема в том, что применение типовых устройств NB-IoT невозможно. Требуется их частичная модификация, которая связана с необходимостью компенсации эффекта Доплера и повышением энергетики канала «вверх». Компенсация эффекта Доплера требует знания эфемерид КА и вычисления частотных поправок с учетом прогноза их изменения. Повышение энергетики достигается за счет использования в канале «вверх» не всей полосы NB-IoT, как в канале «вниз», равной 180 кГц, а только одной или двух поднесущих (15 кГц) и повторных передач пакетов для снижения порогового значения «сигнал/шум». Это резко нарушает требуемое соотношение для трафика IoT «вверх»/«вниз», которое становится существенно меньше единицы.

По мнению авторов, построение гибридной системы D2D IoT на основе NB-IoT возможно, но не оптимально. Технология (и протокол) NB-IoT изначально создавалась для работы с фиксированными устройствами. Подобные проблемы существуют и при применении в спутниковой системе любых иных технологий IoT типа Sigfox (NB-Fi, XNB, Open UNB).

Выводы

1. Динамичное развитие сетей D2D классов 4/5G и IoT – характерная черта современного времени. Эти системы являются революционными в сфере спутниковой связи [10].

2. Российский проект системы D2D IoT – «Марафон IoT» – существенно превосходит подобные зарубежные проекты, имеет высокую степень проработки, но требует уточнения системных решений для обеспечения его экспортного потенциала. Его реализация позволит сделать существенный скачок развития сервисов IoT и устранения цифрового неравенства информационной инфраструктуры регионов России для развития их экономического потенциала и решения задач государственного управления.

3. Целесообразна системная проработка проекта D2D 4/5G и оперативная его реализация, поскольку не низкоорбитальная система спутникового ШПД, а именно такая гибридная система обеспечит реальную ликвидацию цифрового неравенства населения в России, в том числе и для обеспечения 100% граждан России доступа к государственным информационным услугам, над чем уже десятилетиями работает ПАО «Ростелеком» и достигнуты существенные успехи в создании информационной среды. Теперь нужно создать условия для 100% доступа к этой среде независимо от того, где в России находится абонент – в Москве, Санкт-Петербурге или на Чукотке. Наши предварительные оценки показывают, что создание D2D 4/5G требует на порядок меньше средств, чем создание системы широкополосного доступа типа Starlink. Напомним, что мобильных абонентских устройств в сотовых сетях больше, чем население в России [10]. ■

Литература

1. Анпилогов В., Обзор развития идеи прямого спутникового доступа к абонентам сотовых сетей, *Технологии и средства связи*, 2022, № S2, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание 2023», С. 66;
2. <https://docs.fcc.gov/public/attachments/DOC-400678A1.pdf> (дата обращения 24.11.2024).
3. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/04/12/2023-07214/single-network-future-supplemental-coverage-from-space-space-innovation> (дата обращения 24.11.2024).
4. Анпилогов В., К вопросу о сверхнизкоорбитальных системах, *Технологии и средства связи*, 2023, № S1, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание 2024», С. 61
5. Анпилогов В., Гриценко А., Орбитальная группировка гибридной системы Direct-to-Device для обслуживания территории России, *Технологии и средства связи*. 2024, № S1, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание 2025», С. 50
6. Анпилогов В., Гриценко А. О построении орбитальных группировок большой мощности на LEO для телекоммуникационных систем // Специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание 2023». С. 48–52
7. Anpilogov V.R., Denisenko V.V., Levitan B.A., Kozlov V.N., Shitikov A.M., Shishlov A.V., *Reducing the Energy Consumption of the Transmitting Active Phased Antenna Array of Low-Orbit Communications Satellite with a Jumping Beam*, *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2023. Т. 68. № 8. С. 819–827
8. Сафронов А. Основные положения стандарта спутникового интернета вещей, *Технологии и средства связи*. 2023, № S1, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание 2024», С. 92–98
9. Посадский А., Сафронов А., Особенности построения систем Интернета вещей реальное времени с использованием низкоскоростных спутниковых каналов, *Технологии и средства связи*. 2024, № S1, специальный выпуск «Спутниковая связь и вещание 2025», С. 76–83
10. <https://json.tv/analytic/?tag=sputnikovaya-svyaz%27-i-uslugi> (дата обращения 25.12.2024)