

Настоящее и будущее спутников ГСО



Андрей ГРИЦЕНКО,
генеральный директор
АО «ИКЦ «Северная Корона», к. т. н.

Требования пользователей

Мы будем рассматривать только коммерческие системы связи. Первый вопрос, который здесь возникает: что, собственно, нужно обычному пользователю от систем связи, в том числе спутниковых? На мой взгляд, ответ на него может звучать так: чтобы в любой точке, где он находится, даже в процессе движения, можно было получить необходимую услугу на простенькое абонентское устройство, причем с хорошим качеством и за не очень большие деньги.

Техническую формализацию этого требования можно записать следующим образом: нашему абоненту надо обеспечить энергетику (мощность сигнала) и полосу частот, которые будут достаточны для предоставления ему некоторой услуги с требуемым качеством, иными словами,

В предлагаемом материале рассматривается один из подходов к системной проработке технических решений при создании как геостационарных, так и негеостационарных спутниковых систем. Оцениваются перспективы и направления развития спутников связи на ГСО, анализируются достоинства и недостатки проектов негеостационарных спутниковых систем. Автор исходит из того, что в ФЦП «Сфера» предусматриваются поддержка существующих и создание новых геостационарных и негеостационарных систем спутниковой связи, вещания и передачи данных.

с требуемым отношением сигнал/шум (Signal-to-Noise Ratio – SNR). По сути дела, требования пользователей могут быть полностью описаны теоремой Шеннона, связывающей полосу, пропускную способность и SNR.

Энергетика и полоса — основные ограничения

Под термином «энергетика» будем понимать мощность сигнала на входе приемника либо абонентской станции для участка «вниз», либо бортового ретранслятора для участка «вверх». Законы физики таковы, что, увеличивая энергетику радиолинии, а соответственно и SNR, мы можем повышать пропускную способность канала в той же полосе.

Есть ли ограничения на предоставляемую энергетику и полосу? Безусловно, есть. Например, в Регламенте радиосвязи (РР) для исключения взаимных помех с РЭС других служб радиосвязи

вводятся ограничения на значение плотности потока мощности (ППМ) в конкретных полосах частот. В качестве примера в табл. 1 представлены ограничения на ППМ у поверхности Земли от космического аппарата (КА) для отдельных полос частот Ku-, Ka- и V-диапазонов спектра.

Требуемая мощность на спутнике обеспечивается прежде всего панелями солнечных батарей (СБ). В настоящее время отработаны технологии, позволяющие развернуть достаточно большие конструкции СБ для обеспечения требуемой мощности.

Хуже с полосой: радиочастотный спектр — ограниченный природный ресурс, поэтому доступная полоса частот ограничена отдельными полосками.

Многолучевое покрытие

Одним из вариантов, позволяющим хоть в какой-то степени решить проблему ограничения

Таблица 1. Ограничения на ППМ, дБВт/м²

Диапазон	Угол места Q, град			Контрольная полоса, МГц
	Q < 5	5 < Q < 25	Q > 25	
Ku-band	-124	-124+0,5 × (Q-5)	-114	1
Ka-band	-115	-115+0,5 × (Q-5)	-105	1
V (40–40,5 ГГц)	-115	-115+0,5 × (Q-5)	-105	1

полосы частот, является использование на борту многолучевых антенн. Набор узких лучей, который может быть сформирован посредством применения различных технологий (зеркальные антенны, антенные решетки и т. д.), равномерно (например, по гексагональной структуре) покрывает заданную территорию.

При этом решаются две важные задачи. Первая – в пространственно распределенных лучах можно использовать повторное назначение радиочастот (решение проблемы ограниченности радиочастотного спектра). Вторая – повышается энергетика обратного канала абонентской линии.

Адаптивные системы

Очевидно, что чем больше нагрузка бортового ретранслятора, тем выше целевая эффективность спутника и системы в целом. Загрузка – это трафик, который не является стационарным ни по времени, ни по пространству (территории положения пользователей). Следовательно, крайне важно, чтобы в процессе эксплуатации система могла подстраиваться (адаптироваться) под изменения карты трафика (условная карта, где обозначен прогнозный текущий трафик для случая, если бы услуги системы здесь были доступны). Для этого необходимо, чтобы система имела возможность перераспределять по территории Земли свою пропускную способность.

Как это сделать? Нужно разместить спутник в пространстве так, чтобы в зоне обслуживания оказались источники, генерирующие максимальный трафик, и передать им потребную пропускную способность. Это значит, что пропускная способность лучей в идеале должна быть управляемой, а сами лучи должны иметь возможность изменения пространственного положения – вплоть до перекрытия (обслуживание одной и той же территории).

Свернуть все лучи в одну зону можно, если коэффициент повторного использования частот равен

нулю (все лучи имеют свои частоты). Чем выше будет коэффициент повторного использования, тем меньше лучей можно свести в одну зону. Ограниченность доступных полосок в L-, S- и Ku-диапазонах определяет стремление реализовать максимально возможное значение указанного коэффициента.

Управление пропускной способностью луча – это прежде всего управление его формой (угловыми размерами). В идеале хорошо

связь; организация магистральных линий (в основном как резервирование наземных); системы широкополосного доступа.

Для организации магистральных линий, как правило, используют С-диапазон частот, поскольку для фиксированных абонентских станций уровень сигнала С-диапазона отличается высокой стабильностью и по большому счету вообще не зависит от состояния атмосферы и дождей. Следовательно, можно гарантировать

Чем больше нагрузка бортового ретранслятора, тем выше целевая эффективность спутника и системы в целом.

бы перераспределять и всю доступную мощность между лучами, регулируя энергетiku линии на участке «вниз».

И наконец, необходима возможность управления трафиком на борту, в частности перенаправление трафика между лучами, что предполагает обработку сигналов на борту.

Особенности ГСО

Геостационарная орбита (ГСО) – это тоненькая ниточка, расположенная на высоте 36 тыс. км над экватором. Основное ее достоинство – неподвижность спутника, размещенного на ГСО, относительно наземного абонента. Основные недостатки такой орбиты: малые углы места для обслуживания средне- и североширотных стран, в том числе России; значительные наклонные дальности (более 40 тыс. км) и задержки в прохождении сигнала.

Указанная специфика ГСО определила, по сути, три основных направления сервисных услуг, предоставляемых геостационарными аппаратами: подвижная (в том числе персональная) спутниковая

высокую надежность канала по радиоклиматическим факторам. Услуга эта, понятно, не является массовой, потому в рамках настоящего материала не представляет большого интереса.

Системы подвижной персональной связи на ГСО

Одними из первых, использующих принципы гибкой полезной нагрузки, стали системы персональной связи, в частности спутники Thuraya (позиции 44° и 98,6° в. д. на ГСО).

Многолучевая антенная система с диаметром зеркала около 16 м формирует множество узких (около 1°) лучей с повторным использованием частот и обслуживанием огромной территории. Подобная система способна адаптироваться к изменению карты трафика путем изменения формы и пространственного положения лучей (на борту используется антенная решетка). Обработка и маршрутизация сигналов на борту позволяют реализовать режим «каждый с каждым».

Указанные технические решения дают возможность использовать абонентскую станцию в виде «трубка в руке». Но именно это, увы, и является основным сдерживающим фактором в дальнейшем развитии таких систем. Ненаправленная антенна как излучает, так и принимает в широком конусе пространства. В результате из-за проблемы помех в узенькой полосе L- и S-диапазона развернуть на ГСО множество таких спутников не представляется возможным. Поэтому лучшее, чего можно ожидать, – это плановая замена действующих спутников и реализация дополнительных функций как адаптивной системы для повышения эффективности эксплуатации.

Спутники системы Thuraya являются одними из первых спутников с высокой пропускной способностью, если учитывать коэффициент использования полосы (отношение суммарной пропускной способности к выделенной полосе частот).

Спутники на ГСО с высокой пропускной способностью

Основной тренд последнего десятилетия – развертывание спутников с высокой HTS (High Throughput Satellite) способностью. На таких спутниках используют сотни и даже тысячи узких лучей. Однако стремление обеспечить высокий коэффициент использования полосы снижает, как уже было отмечено, возможности спутника по перераспределению пропускной способности путем переориентации лучей. Современные HTS-спутники достигли своего потенциального предела. Дальнейшее развитие – только

увеличение количества лучей (спутники гипервысокой пропускной способности), соответственно это означает уменьшение ширины луча, увеличение массы спутника и небольшое снижение приведенной стоимости единицы пропускной способности.

Предельное значение ширины луча в настоящее время составляет около $0,2^\circ$ (примерно 59 дБи). Дальнейшее его уменьшение приведет лишь к росту межлучевых помех, снижению отношения сигнал/помеха (С/И) в канале и падению пропускной способности. В табл. 2 представлены значения диаметров антенн, которые обеспечат предельное значение ширины луча $0,2^\circ$ в разных диапазонах частот.

Чтобы реализовать предельно малый луч в Ku-диапазоне, необходимо использовать на борту антенну диаметром 12 м. Точнее, две – одну на прием и одну на передачу. Также не очень простая задача – поставить на борту две антенны диаметром 5,5 м для работы в Ka-диапазоне. А вот в V-диапазоне частот спутник с антеннами 2,7 м выглядит уже вполне реальной задачей. Поэтому в классе HTS-спутников на ГСО развитие в долгосрочной перспективе будет связано с переходом на V-диапазон спектра.

Прорывных решений на рубеже ближайших пяти лет, по всей видимости, ожидать не приходится.

Системы на НЕО

Под высокоэллиптической орбитой (НЕО, ВЭО) как правило понимают орбиту типа «Молния» или ее модификацию – «Кентавр». Условия эксплуатации – как на ГСО, но дополнительно:

- дрейф спутника относительно абонента в «угловом окне» $12^\circ \times 2^\circ$;
- проявление эффекта Доплера, что также нужно учитывать;
- изменение дальности и соответственно изменение размеров зон обслуживания лучей;
- поворот спутника относительно абонентской станции на угол около 90° .

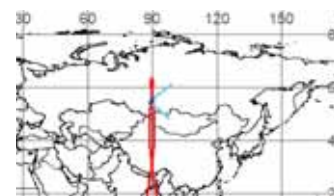


Рис. 1. Поворот вектора скорости на апогейном участке ВЭО

На рис. 1 представлен сценарий, когда один из спутников группировки «Экспресс-РВ» входит в рабочую зону апогейного участка, а другой – выходит. Отрезки синих линий показывают направление вектора скорости «входящего» (верхняя линия) и «выходящего» (нижняя линия) спутника. За время обслуживания абонентов спутник как бы развернется относительно наземного наблюдателя на угол около 90° .

Для случая, когда лучи имеют возможность менять свое угловое положение, это не представляется проблемой. Но если угловое положение лучей зафиксировано, то необходимо в процессе движения разворачивать по каналу рыскания либо весь спутник, либо платформу с многолучевой антенной. И при этом обеспечивать наведение СБ по направлению к Солнцу.

В проекте «Экспресс-РВ» четыре «тяжелых» спутника обеспечивают эффект дрейфа для абонентов практически на всей территории России на углах места выше 50° . Это упрощает требования к абонентским станциям, однако создать доступные по цене терминалы, насколько известно, пока не удалось, что является одной из основных проблем проекта «Экспресс-РВ».

Системы на МЕО

Средневысотные орбиты (МЕО) имеют высоту около 8 тыс. км. Единственный успешный проект – ОЗВ. Удалось практически полностью загрузить все спутники системы (на первом этапе – 10 шт.). Используется экваториальная орбита – спутники размещаются на ней равномерно. На каждом спутнике установлена группа

Диапазон частот	Частота, ГГц	Диаметр антенны, м
Ku-band	12	9,2
Ka-band	20	5,5
V-band	40	2,7



а – Iridium NEXT



б – OneWeb



в – Starlink

Рис. 2. Действующие и развертываемые системы на LEO (по данным каталога NORAD по состоянию на декабрь 2020 г.)

зеркальных антенн с автономным наведением. По мере дрейфа группировки по экватору происходит перенацеливание лучей в направлении крупных потребителей ресурсов пропускной способности, при этом обеспечивается практически непрерывное их обслуживание. Но такой принцип можно реализовать лишь на экваториальной орбите.

В российском проекте «Скиф», который входит в ФЦП «Сфера», предпринимается попытка реализовать схожую систему – только на наклонных орбитах. Анализ показывает, что при ограничении на минимальный угол места в 15° система из десяти спутников способна обеспечивать глобальное обслуживание.

Системы на LEO

Безусловно, основные войны технических и коммерческих решений в ближайшие несколько лет будут вестись по проектам систем на низких орбитах (высота до 1500 км).

Основной потенциал новых LEO-систем заключается в том, что небольшое изменение в баллистической структуре орбитальной группировки или в параметрах отдельного спутника может привести к масштабным изменениям и в потребительских, и в стоимостных свойствах самой системы. Причем как в положительную сторону, так и в отрицательную. Потенциал таких изменений до сих пор до конца не изучен.

По большому счету, при проектировании подобных систем решаются те же задачи, которые были рассмотрены в разделе «Адаптивные системы». Однако в этом случае вместо одного «тяжелого» спутника выступает пространственно распределенная спутниковая система, включающая отдельные аппараты гораздо меньшей массы. И нужно сделать так, чтобы пропускная способность каждого спутника была загружена максимально, т. е. она должна быть адаптирована к карте трафика.

Безусловно, пальма первенства на этом поле принадлежит Илону Маску и его проекту Starlink.

В системах, построенных по классическому принципу, к которым сегодня можно отнести действующую систему Iridium (рис. 2а) и разворачиваемую систему OneWeb (рис. 2б), задача адаптации к карте трафика и не ставится. Значительную часть спутников группировки Iridium необходимо выключать в северных широтах во избежание самой проблемы внутрисистемных помех.

В проекте OneWeb помимо отключения на полюсах еще одна часть спутников не будет использоваться над морями и океанами, так как поставит станцию сопряжения, например, в Тихом океане, а затем подключить ее к «оптике» практически невозможно. Следовательно, несмотря на разворачивание этой системы, вероятность долгосрочного, подчеркнем, коммерческого,

функционирования без принципиальных изменений технических и архитектурных решений крайне мала.

Судя по публикациям, в проекте Starlink (рис. 2в) в полной мере решается задача адаптации к карте трафика. Эшелонирование орбитальной группировки Starlink по наклонению, а также применение известных, но в данном случае оригинальных решений по организации связи и построению ретрансляционного комплекса позволяют не закрывать пропускную способность, а реализовывать ее максимально полно.

Выводы

1. Геостационарные спутники связи достигли определенного технологического предела. Дальнейшее их развитие связано с уже состоявшимся трендом: уменьшение размера лучей, увеличение их количества и переход из статуса HTS к статусу VHTS (Very HTS). Прорывные технические решения в части принципиального изменения прикладных характеристик в ближайшие пять лет маловероятны.
2. Основная борьба проектов развернется в классе систем на LEO. Главная причина тут кроется в потенциальных возможностях существенного изменения их прикладных и стоимостных характеристик, возможная глубина которых пока до конца не изучена. ■