Лекция 18

Космический сегмент

## Спутниковые ретрансляторы

Типы ретрансляторов.

Передающие устройства

Приёмные устройства.

Антенные системы.

Космические платформы.

Космический сегмент

Кроме общепринятых компонент ИСЗ в состав космического сегмента входит несколько спутников-ретрансляторов, которые образуют космическую группировку. По аналогии с радиорелейными системами спутниковые ретрансляторы играют роль промежуточных радиорелейных станций. Спутники-ретрансляторы размещаются равномерно вдоль космической орбиты.

В задачу ретрансляторов входит приём информации с земли и других спутников и передача полученной информации по назначению.

Несколько слов о необходимом числе спутников в орбитальной группировке. Низкоорбитальный спутник находится на высоте около 1000 км и движется по орбите со скоростью примерно 7 км/с. Время, в течение которого его можно наблюдать из некоторой точки поверхности Земли (время видимости), не превышает 14 мин. После этого спутник «уходит» за линию горизонта. Для поддержания непрерывной связи (например, при телефонном разговоре) необходимо, чтобы в тот момент, когда первый спутник покидает зону обслуживания, на смену ему приходил второй, за ним - третий и т. д. Глобальные спутниковые системы должны постоянно держать в поле зрения своих антенн всю поверхность планеты. Это напоминает принцип сотовой телефонной связи, только роль базовых станций здесь играют спутники.

Чтобы обеспечить связью абонентов не только в зоне видимости одного КА, но и на всей территории Земли, соседние спутники должны связываться между собой и передавать информацию по цепочке, пока она не дойдёт до адресата. Эту задачу в некоторых системах выполняют наземные шлюзовые станции, которые транслируют информацию с одного КА на другой.

Для надёжного охвата всей территории Земли необходимо иметь большое количество спутников (обычно несколько десятков, хотя известен проект Teledesic, в котором их число приближается к тысяче). С увеличением высоты орбиты уменьшается необходимое количество спутников, т.к. увеличивается время и зона видимости, что обусловливает снижение стоимости орбитальной группировки и, соответственно, услуг. Но при этом неизбежно усложняются и становятся более дорогими персональные спутниковые терминалы (из-за увеличения дальности связи Земля - Космос - Земля). Таким образом, число спутников в орбитальной группировке является результатом компромисса между стоимостью и желаемым объёмом услуг связи, с одной стороны, и простотой и ценой персонального спутникового терминала - с другой. Эти сведения надо учитывать при ориентации на ту или другую систему связи.

При проектировании бортового оборудования учитываются два основных требования, которые и отличают «борт» от «земли»: обеспечение как можно более низкого энергопотребления и радиационной стойкости элементной базы. Следует особо отметить, что (в основном «благодаря» второму требованию) стоимость аппаратуры, предназначенной для работы на КА, в десятки раз выше цены аналогичных устройств наземных комплексов, а необходимость использования для защиты от радиационных повреждений специальных экранов увеличивает вес оборудования.

## Спутниковые ретрансляторы

## Даже не посвящённому в тонкости телекоммуникационных технологий читателю ясно, что именно ретранслятор «отвечает» за энергетические характеристики каналов связи. Первый вопрос, который возникает на начальной стадии проектирования спутниковой системы связи (ССС), связан с оптимальным распределением её ресурсов между ретранслятором и наземными станциями. В данном контексте ресурсы системы - это энергетический запас радиолиний (или их пропускная способность) и "интеллектуальные" возможности ретранслятора.

Существует множество вариантов перераспределения функций между ретрансляционными и наземными комплексами в зависимости от вида предоставляемых услуг, типов орбит и т.п. Однако, несомненно: чем большую энерговооружённость имеет "борт" (как специалисты чаще всего называют спутник), т.е. чем выше эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) спутниковых приёмопередатчиков, тем более простое абонентское оборудование необходимо применять на Земле для приёма сигнала.

Под "интеллектуальностью" обычно подразумевают вычислительные возможности бортового комплекса, оцениваемые по той доле функций наземных станций, которые способен выполнить ретранслятор. Например, можно возложить на последний коммутацию каналов, маршрутизацию, тарификацию, защиту от несанкционированного доступа и др. Очевидно, что с повышением «интеллектуальности» борта увеличиваются гибкость и возможности системы. Но стратегию проектирования ССС нельзя свести к упрощённой схеме: раз ретрансляторов в системе намного меньше, чем наземных станций, то, создав один или несколько сверхсложных ретрансляционных комплексов, можно существенно упростить наземные средства. Прямой путь не всегда оптимален.

Все многочисленные попытки создать мощные мультидиапазонные ретрансляционные комплексы со сверхбольшими антенными решётками, разворачиваемыми в космосе, окончились неудачей. К тому есть ряд причин. Главная из них состоит в том, что стоимость сверхбольших ретрансляционных комплексов чрезвычайно высока, а ущерб при неудачном запуске или их отказе на орбите невосполним. Вдобавок при страховании запуска уникальных сложных комплексов неизбежны серьёзные проблемы с определением страховой суммы, даже если удаётся найти страховую компанию, готовую на столь высокий риск.

Кроме того, возникают и технические сложности. Размещение на борту большого числа приёмопередатчиков, работающих в разных диапазонах, приводит к усложнению электромагнитной обстановки как непосредственно в самом бортовом комплексе, так и на расположенных рядом спутниках. Несомненно, что и наземная отработка такого комплекса займёт достаточно много времени, а это, в конечном итоге, увеличит срок создания КА и окупаемости системы в целом.

Комплекс ретрансляционного оборудования, который КА выводит на орбиту, называется полезной нагрузкой. Оборудование, поддерживающее нормальное функционирование основных подсистем КА для пространственной ориентации, терморегулирования, телеметрического контроля, навигации (приёмники GPS/ГЛОНАСС и др.) - конструктивно не входит в состав полезной нагрузки, а является принадлежностью космической платформы.

Структура бортового ретрансляционного комплекса (БРТК) определяется:

- его назначением, или масштабностью охвата территорий (глобальная, либо региональная связь);

- методом обработки информации на борту КА;

- количеством ретрансляционных каналов (приёмных, передающих или приёмопередающих);

- скоростью информационного обмена;

- выбранными техническими решениями и используемыми технологиями.

В состав БРТК могут входить не только так называемые абонентские ретрансляторы (предназначенные для формирования «потребительских» лучей), но и ретрансляторы фидерных и/или межспутниковых линий (служебная связь).

## Типы ретрансляторов. По своему назначению и выполняемым функциям все ретрансляционные комплексы подразделяются на три типа: прозрачные, регенеративные и комбинированные.

***Прозрачные ретрансляторы*** (*bent pipe*) обеспечивают приём и преобразование входных сигналов без их обработки на борту. Таково «строгое» определение. Тем не менее, существуют ретрансляторы, тоже называемые прозрачными, которые имеют в своём составе один или несколько канальных процессоров или высокочастотную полнодоступную матрицу для коммутации каналов. Поэтому в настоящее время уже трудно провести резкую границу между прозрачным и регенеративным типами ретрансляторов.

Принцип действия ***регенеративных ретрансляторов***, которые определяются как ретрансляторы с обработкой сигналов на борту (OBP, On Board Processing), основан на ремодуляции, т.е. приёме сигналов на одной частоте, их демодуляции и повторной модуляции на новой несущей частоте. Использование таких ретрансляторов позволяет одновременно обслуживать большое количество терминалов, обеспечивая большую гибкость формирования каналов и оперативное соединение терминалов с применением разнообразных протоколов. В ***комбинированных ретрансляторах*** может выполняться обработка только определённых сигналов (какой-то части всех каналов), например соответствующих заданной несущей частоте.

### Прозрачные. Большинство коммерческих ретрансляторов, используемых для передачи широкополосных и узкополосных сигналов (Intelsat, Eutelsat, Inmarsat и др.), строятся по традиционной, наиболее простой и распространённой, схеме организации связи без обработки (*bent pipe* – «прямая труба»). В каждом ретрансляторе может быть установлено несколько комплектов приёмо-передающей аппаратуры, подключённой к одной или разным антеннам. Отдельный приёмо-передающий канал спутниковой связи называется стволом, или транспондером (*transponder*).

В современных геостационарных связных космических комплексах число стволов может достигать 50 и более, что позволяет реализовать высокую пропускную способность ретранслятора.

Главным достоинством прозрачных ретрансляторов является простота аппаратной реализации, поскольку в них осуществляется только групповое преобразование сигнала на промежуточной частоте без демодуляции и фильтрации каналов. Однако им присущ и ряд недостатков. Дело в том, что при работе нескольких наземных станций в широкой полосе частот неизбежно возникают нелинейные эффекты, приводящие к подавлению более слабого сигнала сильным, а также интермодуляционные помехи из-за преобразования паразитной амплитудной модуляции в фазовую и др.

Чтобы в какой-то мере избежать этих эффектов, в прозрачных ретрансляторах используются передатчики, работающие в квазилинейном режиме. Иногда и этих мер оказывается недостаточно, поскольку при появлении в рабочей полосе даже одного сильного «мешающего» сигнала возможен отказ ретрансляционного ствола в целом.

Но выход из положения есть, и он заключается в разделении всей полосы ствола на ряд парциальных каналов. Этот метод, получивший название «один канал на несущую» (SCPC, Single Cannal Per Carrier), в настоящее время широко применяется в сетях VSAT, поскольку он позволяет оперативно перераспределять трафик между наземными станциями.

Несмотря на перечисленные недостатки ретрансляторов типа *bent pipe*, они не потеряли своей значимости и по-прежнему используются в современных системах связи с КА не только на геостационарной, но и на других орбитах. Причина очевидна - простота их реализации.

Новым техническим решением при создании прозрачных ретрансляторов с SCPC является применение в них высокочастотной коммутируемой матрицы, выполненной на базе СВЧ интегральных схем и переключателей на PIN-диодах, обеспечивающих малую потерю мощности. Управление работой такого коммутатора осуществляется с помощью бортового процессора, а резервирование - за счёт введения дополнительных рядов и столбцов матрицы.

### Комбинированные. В ретрансляторе с одним канальным процессором принятый сигнал разделяется на выходе приёмника на N каналов, в каждом из которых осуществляется прозрачное преобразование сигналов. Отличие такого БРТК от «абсолютно» прозрачного ретранслятора заключается в том, что в нескольких или одном канале устанавливается канальный процессор. Одно из преимуществ данного решения - простота модернизации существующего прозрачного ретранслятора до комбинированного, поскольку каналы с обработкой сигналов «вставляются» в обычный ретрансляционный ствол. Кроме того, возможно применение каналов с различными скоростями передачи, разными алгоритмами кодирования и т.п. Указанный тип ретрансляторов будет реализован, например, в системах ACeS и ICO.

### Регенеративные.

**Ретрансляторы с пакетной коммутацией.** Высокая эффективность передачи сигналов в системах спутниковой мобильной связи достигается при использовании в БРТК коммутаторов, которые чаще всего реализуются на базе технологии ATM или IP. Выбор конкретного протокола зависит от архитектуры системы и типа орбитальной группировки. Так, ATM-коммутатор больше всего подходит для сетей с топологией «звезда», использующих КА на геостационарной или низких орбитах (система SkyBridge).

Важное преимущество пакетной обработки - возможность использования асимметричных каналов на линиях «вверх» и «вниз», т.е. поддержка интерактивного режима.

Наиболее сложным является ретранслятор с пакетной обработкой информации на борту и с маршрутизацией. Такие типы ретрансляторов применяются в системах с межспутниковыми линиями связи и узловой топологией, построенных на основе КА типа bigLEO (Iridium) или megaLEO (Teledesic). В них динамическое перераспределение каналов (маршрутизация) осуществляется непосредственно в ретрансляторе и базируется на протоколе IP (Iridium).

**Ретрансляторы с обработкой информации в нереальном времени.** В спутниковых системах с КА типа littleLEO для удалённых пользователей, оказавшихся вне зон обслуживания региональных станций (например, на борту морского судна), предусматривается возможность связи с другими абонентами системы через космический «почтовый ящик».

Связь в режиме электронного "почтового ящика" организуется следующим образом. Абонент может передать свое сообщение, когда в зоне радиовидимости появляется хотя бы один КА. Спутник примет это сообщение и запишет его в бортовое ЗУ («почтовый ящик»). Информация будет отправлена получателю, как только данный КА достигнет его региона. Транспортные протоколы обеспечивают сборку пакетов, принадлежащих одному сообщению, в абонентском терминале независимо от маршрута их доставки и числа, задействованных при транспортировке этих пакетов КА и наземных станций сопряжения.

Такие типы ретрансляторов обычно используются в спутниковых системах передачи данных: «Гонец», Orbcomm, Сospas-Sarsat и др. От систем, осуществляющих перенос информации на борту КА, требуется не непрерывность связи, а надёжность доставки сообщения, поэтому их орбитальная группировка может состоять из небольшого числа КА. Временные характеристики обслуживания в такой системе определяются параметрами абонентских линий.

## Основные характеристики ретрансляторов. Эффективность работы бортового ретранслятора определяется диапазоном рабочих частот, ЭИИМ, добротностью (G/T) и плотностью потока мощности на поверхности Земли. Кроме того, важной характеристикой является обеспечиваемая БРТК пропускная способность линии связи.

**Пропускная способность** - основной интегральный показатель БРТК, определяющий эффективность функционирования КА. В зависимости от вида передаваемой информации обычно используют два критерия оценки пропускной способности. В системах речевой связи это число каналов, эквивалентных телефонным, которые приходятся на один КА. При этом эквивалентными считаются каналы, по которым информация передаётся с одинаковой скоростью. Каналы, эквивалентные телефонным - это каналы, имеющие скорость 4,8 кбит/c. В низкоорбитальных системах пакетной передачи данных критерием пропускной способности служит суммарный поток информации, передаваемый через один КА в течение заданного промежутка времени (в один час, в сутки).

Пропускная способность КА зависит от его энергетических параметров (ЭИИМ и *G*/*T*), характеристик антенных систем и методов доступа и обработки информации на борту спутника.

**ЭИИМ и добротность.** Как правило, значения ЭИИМ (эффективная изотропно излучаемая мощность) современных систем персональной спутниковой связи, работающих в *L*/*S*-диапазоне, не превышают 30…45 дБВт для систем с КА на геостационарной орбите, 20…35 дБВт - для КА на средних орбитах и 5…25 дБВт для КА низких орбитах.

Величина добротности, определяемая отношением усиления антенны к суммарной шумовой температуре бортового приемника (*G*/*T*), обычно не должна выходить за границы диапазона, определяемого значениями: от -12 до +3 дБ/К. Их разброс внутри этого диапазона зависит от размеров используемых антенн и, в меньшей степени, от параметров электронного оборудования.

**Плотность потока мощности** бортового ретранслятора влияет на условия его электромагнитной совместимости с другим электронным оборудованием, поэтому жёстко регламентируется. Характеристики бортовых антенн в каждом луче обычно выбираются таким образом, чтобы плотность потока мощности, создаваемая на поверхности Земли, была постоянной и не зависела от направления излучения.

Существуют международные рекомендации, регламентирующие плотность потока мощности *S* (дБВт/м2) на поверхности Земли. Например, зависимость *S* от рабочего угла места *u* наземной станции определяется соотношением

*S* = *S*о + 0,5 (*u* - 5) для 50 ≤ *u* < 250,

где *S*о - минимально допустимый уровень плотности потока мощности на поверхности Земли в определённом диапазоне частот (в дБВт/м2), который указан в тех же рекомендациях. В них также оговаривается, что в диапазонах частот L, S, C, X и Ku измерение плотности потока мощности производится в полосе частот 4 кГц, а в более высоких диапазонах частот (Ka и КВЧ) - в полосе 1 МГц.

**Передающие устройства.** Основой функциональной части тракта связи является усилитель мощности передатчика. В бортовых комплексах используются различные типы таких устройств.

В системах связи на геостационарных КА одним из основных типов усилителей для передатчиков традиционно остаются усилители на основе лампы бегущей волны (ЛБВ). И хотя сегодня их КПД уже превышает 40% (КПД самих ЛБВ составляет около 60%), при эксплуатации этот показатель не отличается стабильностью и быстро падает, особенно при снижении выходной мощности передатчика на линейном участке динамической характеристики. При работе в режиме нескольких несущих для достижения хороших энергетических показателей линии требуется обеспечить отношение сигнал/шум от 20 до 30 дБ, что в свою очередь приводит к потерям, снижающим КПД усилителя на основе ЛБВ до 10…20% .

В системах с КА на средневысотных и низких орбитах обычно используются полупроводниковые усилители мощностью до 60 Вт для L-диапазона частот, до 20 Вт - для С-диапазона и 5…10 Вт для Ku-диапазона. В отличие от усилителей с ЛБВ, эта аппаратура работает при более низком напряжении питания, более компактна и надёжна.

**Приёмные устройства.** Во входных каскадах бортовых приёмников в настоящее время чаще всего применяются малошумящие усилители (МШУ) на полевых транзисторах. Коэффициент шума такого приёмника составляет менее 3 дБ в диапазоне частот 1,5…4 ГГц и не более 4,5 дБ для диапазона 11…14 ГГц. Снижение шумовых характеристик бортовых приёмников возможно при переходе на новую элементную базу. Создание МШУ на базе транзисторов с высокой подвижностью электронов, позволяет достигнуть коэффициента шума в диапазоне 1,5…4 ГГц почти 2 дБ, а в диапазоне 11…14 ГГц - 3,5 дБ. При этом усилитель становится намного надёжнее и ещё компактнее (вследствие более высокой степени интеграции элементов).

**Антенные системы.** До недавнего времени считалось, что основным сдерживающим фактором развития персональной спутниковой связи является отсутствие высокоэнергичных ретрансляторов со значительной излучаемой мощностью и высокой чувствительностью приёмника. Однако накопленный опыт разработки спутниковых систем показал, что повысить энергетический запас радиолинии можно не только «прямой накачкой» мощности в луч. Огромные резервы раскрываются при пересмотре технологических решений антенных комплексов.

Современные многолучёвые антенные системы позволяют реализовать многократное использование полосы частот в глобальной зоне обслуживания. Их узкие парциальные лучи обеспечивают ту же плотность потока мощности, что и один широкий луч, при значительно меньших энергетических затратах.

При конструировании антенн для КА систем персональной радиотелефонной связи основной упор делается на возможность формирования множества сканирующих лучей с изменяемой формой диаграммы направленности. Обычно такая антенна интегрирована с другими элементами бортового комплекса; при этом высокие технические характеристики сложных антенных систем достигаются не только за счёт увеличения их поверхности и мощности, но и благодаря использованию современных схемных технологий и новых материалов.