Лекция 20

Наземный сегмент

Центры управления

Центр запуска КА

Центр управления

Шлюзовая станция

Станции VSAT

Типы сетей VSAT.

Типы многостанционного доступа в сетях VSAT.

Многостанционный доступ

Принципы и особенности многостанционного доступа

Представление эквивалентных нелинейных характеристик ретранслятора.

Многостанционный доступ с частотным разделением

Определение оптимальных параметров системы и оценка эффективности МД с частотным разделением.

Многостанционный доступ с временным разделением

Оценка помехоустойчивости систем с МДВР.

 Наземный сегмент

Центры управления

**Центр управления системой** осуществляет слежение за КА, расчёт их координат, сверку и коррекцию времени, диагностику работоспособности бортовой аппаратуры, передачу служебной (командной) информации и т. д. Указанные функции управления выполняются на основе телеметрической (ТЛМ) информации, поступающей от каждого КА орбитальной группировки. Для управления космической группировкой в различных режимах работы КА используют как штатные каналы связи (с учётом перекрёстной спутниковой связи), так и отдельные, территориально разнесённые командно-измерительные станции.



Рисунок 1. - Центр управления космическим сегментом Сан - Хосе, Калифорния, США

Благодаря этому центр управления системой позволяет обеспечить с достаточно высокой оперативностью:

* Контроль запуска и точность вывода КА на заданную орбиту
* Контроль состояния каждого КА
* Контроль и управление орбитой отдельного КА
* Контроль и управление КА в нештатных режимах работы
* Вывод КА из состава орбитальной группировки

Управление космической группировкой осуществляется специалистами группы управления и анализа. Передачу служебной информации на КА осуществляют через территориально-разнесённые основные и резервные станции командно-измерительной системы.

**Центр запуска КА** определяет программу запуска, осуществляет сборку ракеты-****носителя, её проверку, а также установку полезной нагрузки (КА) и проведение предстартовых проверок и испытаний.

Рис. 2. - Старт ракеты-носителя

После запуска ракеты-носителя производят траекторные измерения на активном участке полёта, которые транслируются в центр управления системой, где для формирования промежуточной орбиты корректируются расчётные траекторные данные. Последующее управление КА осуществляется центром управления системой при помощи командно-измерительных станций по следующей программе:

* -Разворачиваются солнечные батареи КА
* Производится кратковременное включение корректирующих двигателей для перевода КА на основную орбиту
* Снимается телеметрическая информация для контроля состояния бортового оборудования КА.

**Центр управления связью** планирует использование ресурса спутника, координируя эту операцию с центром управления системой. Центр управления связью осуществляет через национальные шлюзовые станции анализ и контроль связи, а также управление.

В штатных условиях работы орбитальной спутниковой группировки связь со шлюзовыми станциями и пользовательскими терминалами осуществляется автономно. В нештатных ситуациях (в случае вывода отдельного КА из группировки или при выходе из строя элементов шлюзовой станции) центр управления связью переходит в режим поддержания связи с повышенной нагрузкой, а в особых случаях предусматривается также возможность реконфигурирования сети.

**Шлюзовая станция** (шлюз) состоит из нескольких приёмопередающих комплексов (обычно не менее трёх), в каждом из которых имеется следящая параболическая антенна.

Применение нескольких приёмопередающих комплексов позволяет практически без нарушения связи переходить последовательно от одного КА к другому. Приёмопередающие комплексы функционируют следующим образом:

* 1-й комплекс вступает в связь с *i-м* КА
* 2-й комплекс вступает в связь с *i* +1 -м КА
* Затем 1-й комплекс, после ухода из зоны видимости 1-го КА, вступает в связь с *i+* 2-м КА
* 2-й комплекс, после ухода из зоны i + 1-го КА, вступает в связь с *i*+ 3-м КА и т. д.
* 3-й комплекс, как правило, находится в резерве и при необходимости может заменить 1-й или 2-й комплекс.

Для управления большим потоком информации в состав шлюзовой станции включены быстродействующие ЭВМ, в которых имеется банк данных персональных терминалов. Шлюзовые станции в своём составе имеют коммутационное оборудование (интерфейсы связи) для соединения с различными наземными системами связи. Основной задачей любой шлюзовой станции является организация дуплексной телефонной связи, передача факсимильных сообщений, а также данных больших объёмов.

**Многостанционный доступ**

Все системы радиосвязи для увеличения пропускной способности используют различные виды многостанционного доступа, которые можно разделить на три группы: с частотным (FDMA), временным (TDMA) и кодовым (CDMA) разделением каналов. Один из примеров организации такого доступа был уже рассмотрен в предыдущем разделе на примере терминалов VSAT.

В системах на базе геостационарных КА наиболее часто используется FDMA, при котором частотный спектр каждого канала разделён на участки определённой ширины. Для защиты от внутрисистемных помех между каналами предназначены интервалы, обеспечивающие разграничение частот соседних каналов с заданной точностью. Для сети с достаточно высокими энергетическими показателями линий связи применение FDMA позволяет создать наиболее простое абонентское оборудование с малым энергопотреблением.

Недостатком данного метода является низкая пропускная способность каналов связи. Кроме того, величина частотной неопределённости вследствие доплеровского сдвига заставляет разработчиков радиоаппаратуры увеличивать защитный интервал, что ведёт к значительным энергетическим потерям, особенно при использовании низкоорбитальных КА.

Многостанционный доступ с временным разделением каналов, применяется в системах Iridium, Orbcomm, ICO, «Гонец» и др. Высокая пропускная способность линии связи обеспечивается при сочетании метода TDMA с пространственным разделением каналов при разнесённом приёме, а современная техника позволяет одному КА формировать одновременно 100 и более узких лучей. Следует отметить, что в бортовых радиотехнических комплексах проверенные временем гораздо проще реализовать технологии FDMA и TDMA, чем CDMA, поэтому соответствующие ретрансляторы намного дешевле.

Такие преимущества технологии CDMA, как невысокая пиковая мощность абонентского оборудования и сравнительно низкие требования к динамике регулирования мощности передачи, делают её особенно привлекательной для организации персональной подвижной радиосвязи с использованием терминалов типа «телефонная трубка», реализованного, в частности, в системе спутниковой связи Thuraya. Одно из основных достоинств CDMA - возможность «мягкого» переключения при «передаче» абонента с одного спутника на другой. Метод CDMA пригоден и для обеспечения так называемого разнесённого приёма (приём информации осуществляется через разные КА, с последующим когерентным сложением, или автоматическим выбором лучшего по качеству принимаемого сигнала), поддерживаемого, например, системой Globalstar.

Первой из коммерческих спутниковых систем, в которой была успешно опробована технология CDMA, является система Omnitracs, обеспечивающая контроль за грузоперевозками. Дальнейшее развитие эта технология получила в американских системах Globalstar, Starsys, Ellipso, а также в проектах систем 3-го поколения SAT-CDMA (Южная Корея), SW-CDMA и SW-CTDMA (ESA).

Известно, что техническая реализация разделения каналов на наземной станции обходится дешевле, чем на борту спутника, поэтому в системах, основанных на технологии CDMA, как правило, предполагается использование прозрачных ретрансляторов.

**Принципы и особенности многостанционного доступа**

*Многостанционный доступ* (МД) представляет собой специфическую особенность спутниковой связи, выгодно отличающую её от других видов связи и позволяющую существенно повысить эффективность использования стволов спутникового ретранслятора.

Под многостанционным доступом понимают возможность обращения (доступа) нескольких земных станций к одному спутниковому ретранслятору, при котором все станции могут одновременно передавать через этот ствол свои сигналы. Характерное для многостанционного доступа условие одновременной ретрансляции через общий ствол спутника нескольких сигналов предъявляет серьёзные требования к методам передачи и разделения этих сигналов. Из-за неидеальности характеристик реальных трактов (ограничения полосы частот, нелинейности амплитудных и фазовых характеристик и т. п.) неизбежно возникают взаимные помехи между сигналами, ухудшающие качество их разде­ления и приёма земными станциями.

В общем смысле, задача выбора наилучшего метода МД состоит в том, чтобы найти ансамбль ортогональных или близких к ортогональным сигналов, при которых энергетические показатели ретранслятора (мощность и полоса частот) использовались бы наиболее полно. При этом уровень взаимных помех между сигналами должен быть наименьшим и оказывать минимальное влияние на разделимость и помехоустойчивость сигналов.

Известны три основных способа формирования ансамбля ортогональных сигналов, основанные на разделении сигналов по частоте, времени и форме. Каждый из них имеет специфические особенности и порождает специфические эффекты при многостанционной работе. Ниже даётся количественная оценка возникающих помех и искажений. В конечном счете, все эти эффекты приводят к уменьшению пропускной способности ствола ретранслятора при МД по сравнению с односигнальным режимом работы.

*Эффективность методов МД* принято оценивать по степени использования пропускной способности (или ёмкости) ретранслятора в зависимостиот числа сигналов *п:*

*η*(*n*)*=*Σ*n C*i /*C*0 или *η*(*n*)*=* Σ*n N*i / *N*0, (1)

где *С*0 и *N*0,соответственно, - пропускная способность ствола ретранслятора в односигнальном режиме и количество телефонных сигналов, которое может быть передано через этот ствол на одной несущей частоте при отсутствии МД;

*Сi* и *Ni* - пропускная способность и количество телефонных сигналов, которые могут быть переданы в части общего ствола ретранслятора, отведённой для 1-й земной станции при МД.

Показатель *η*(*n*) - монотонно убывающая функция числа передаваемых сигналов, причём наиболее эффективен метод, при котором эта зависимость выражена наименьшим образом.

**Представление эквивалентных нелинейных характеристик ретранслятора.** Исходным этапом исследования специфических эффектов при многостанционном доступе является определение эквивалентных нелинейных характеристик спутникового ретранслятора.

Путём практических измерений может быть получена амплитудная характеристика, точнее, квадрат её, т. е. зависи­мость

*P*вых =*f*(*P*вх) или *U*2вых=*f*(*U*2вх) (2)

и фазовая характеристика

*θ*вых = *f*(*P*вх) (3)

Семейство характеристик на рис. 4 соответствует различным значениям напряжения спирали *Uсп* ЛБВ. Однако обе они не могут быть не­посредственно использованы для практических расчётов. Так, амплитудная характеристика - это зависимость амплитуды первой гармоники выходного напряжения от амплитуды гармонического сигнала, тогда как для расчётов необходимо пользоваться передаточной характеристикой нелинейного элемента, отражающей зависимость мгновенного значения напряжения на входе.



Рисунок 4 - Передаточные характеристики ретранслятора при разных режимах работы ЛБВ.

Поэтому необходимо вначале произвести эквивалентный переход от амплитудной характеристики к передаточной характеристике мгновенных значений, и лишь затем проводить обработку (аппроксимацию) последней. Решение этой задачи зависит от формы представления исходной амплитудной характеристики ретранслятора. Предположим, что она задаётся в виде первого слагаемого нечётного гармонического многочлена

** (*n*=1, 3, 5,…),

описывающего выходной сигнал при гармоническом воздействии

*uвх =U*0cos*ωt.*

Аналогичным образом выходной сигнал (его мгновенное значение)может быть определён через *передаточную характеристику мгновенных значений Е*(*и*)*:*

*uвых =E*(*U*0cos*ωt*)*.*

Сопоставляя эти выражения, получаем

**.

При условии, что можно представить*Е*(*и*) в виде нечётного степенного полинома с тем же числом членов, т.е.

*Е*(*и*) =*a*1 *u*вх +*a*3 *u*3вх+…+*а*m*u*mвх; (4)

предыдущее равенство принимает вид

 (5)

Связь между коэффициентами тригонометрического полинома, описывающего передаточную характеристику мгновенных значений, и коэффициентами гармонического полинома, описывающими амплитудную характеристику, может быть получена методами гармонического синтеза. Формулы их вычисления для полиномов седьмой степени при *U*0*=*l имеют вид

*a*1 *=*2o(*A*1-3*A*3*+*5*A*5- 7*A*7)*,*

*a*3*=*22(*A*3*-*5*A*5*+*14*A*7)*,*

*a*5*=*24(*A*5- 7*A*7)*,*

*a*7*=*26(*A*7)*.*

Таким образом, если задана измеренная характеристика ретранслятора *Paws=f*(*Psa*)*,* то нужно предварительно вычислить амплитудную характеристику *A*(*U*), представить её в аналитической форме, например в виде гармонического многочлена, а затем пересчитать в характеристику мгновенных значений *Е*(*и*). В качестве примера на рис. 5 штриховой линией показана вычисленная характеристика мгновенных значений; она оказывается отличной от первообразной амплитудной характеристики (для *Ucn=Us*)*;* их различие может достигать нескольких децибел.



Рисунок 5. - Зависимость коэффициента AM - ФМ преобразования ретранслятора от мощности входного сигнала при разных режимах работы ЛБВ.

# Иногда удобно представить передаточную характеристику нелинейного тракта в другой аналитической форме, нежели приведённая выше форма тригонометрического многочлена, а именно в форме интеграла вероятности («мягкое ограничение»):

 (6)

где *b*0 - параметр нормирования; или в степенной форме

*E*(*u*)*=uvвх.* (7)

Последняя запись является наиболее общей: при *и* =1 выражение (7) описывает линейный усилитель: при *v =* 0 *—* идеальный ограничитель с нулевым порогом; при 0<ν<1 - промежуточные формы ограничения.

Подлежит предварительному преобразованию и фазовая характеристика ретранслятора; её следует представить в виде зависимости (в град/дБ) *коэффициента АМ—ФМ преобразования* от входной мощности:

*kθ =*Δ*θ/*Δ*Pвх=f*(*Pвх*). (8)

Результаты соответствующего пересчёта фазовых характеристик типичной ЛБВ в форму (8) приведены на рис. 5, из которого следует, что, вообще говоря, *kθ* - сложная функция *Pвх*, но в первом приближении можно считать эту зависимость линейной от области малых входных сигналов вплоть до области насыщения.

Полученные таким образом эквивалентные характеристики ретранслятора служат основой для количественной оценки эффектов при МД.

**Многостанционный доступ с частотным разделением.** Наиболее простым и распространенным является метод МД с частотным разделением каналов (МДЧР), при котором каждая земная станция передает свои сигналы в отведённом ей участке частотного спектра с полосой частот Δf (рис. 6). Между сигналами предусматриваются защитные частотные интервалы Δfз, позволяющие в месте приёма разделить их с требуемой точностью. Таким образом, в общем стволе ретранслятора с полосой частот W передается п радиосигналов, каждый из которых несет N' телефонных (или других) сообщений. Полное число каналов N= n⋅N′.

Большой опыт разработки и эксплуатации систем с частотным разделением, накопленный ранее при реализации других систем связи, а также сравнительная простота оборудования послужили причиной того, чти почти во всех действующих системах спутниковой связи, включая системы «Интелсат» и «Интерспутник», используется МД с частотным разделением.

***W***

Δ*f*

Δ*fз*

*n* несущих частот N*′* каналов

Рисунок 6. - Структура сигналов при частотном разделении.

При МДЧР сигнал, поступающий на вход ретранслятора, представляет собой сумму квазигармонических парциальных сигналов земных станций, каждый из которых в общем случае может быть модулированным по амплитуде и (или) фазе:

 (9)

Соответственно энергетический спектр суммарного сигнала, т.е. сигнала, представляющего сумму сигналов на входе ретранслятора (при одинаковых пар­циальных сигналах):

при *фазовой* модуляции с малым индексом (*σϕ<<*1):

 где (10)

*рМ* (*ω*) - энергетический спектр модулирующего сигнала;

*δ*(*ω*) - дельта-функция;

при *частотной* модуляции с большим индексом (*σf >>*1):

 (11)

Важным параметром суммарного сигнала является функция распределения мгновенных значений, позволяющая оценить степень и вероятность превышения пиковым уровнем сигнала его среднеквадратичного значения.

В общем случае, сигналы земных станций приходят на вход ретранслятора асинхронно и со случайной фазой. Значения фаз можно считать равномерно распределёнными на интервале 0...2*π.* Функция распределения суммарного сигнала для *n* одинаковых парциальных сигналов с постоянными огибающими (что соответствует частотной или фазовой модуляции):

 при |*x*|<*nUi* , (12)

где *J*0 - функция Бесселя нулевого порядка.

*Пик-фактор суммарного сигнала,* определяемый как отношение пиковой мощности этого сигнала, не превышаемой с вероятностью *р*(*λ*),к средней мощ­ности суммы *п* гармонических колебаний:

, (13)

где *λ -* пиковый уровень суммарного сигнала, не превышаемый с вероятностью *р*(*λ*).

Кривые, характеризующие зависимость пик-фактора, определяемого по формуле (14), от числа сигналов, показаны на рисунке 7, из которого следует, что для *n>>*10 с вероятностью *р*=0,99 пик-фактор суммарного сигнала не превы­шает 8 дБ, а при *р*=0,999 приближается к 11 дБ.



Рисунок 7. - Зависимость пик-фактора суммарного сигнала от числа ретранслируемых сигналов

Важной характеристикой многостанционного сигнала является его *скважность;* при МДЧР этот параметр характеризует использование полосы частот ретранслятора и может быть определён по формуле

  (14)

Для количественного анализа эффектов при МДЧР необходима модель суммарного сигнала. Параметры модели должны хорошо отображать его амплитудные особенности и спектральные характеристики. Однако эти свойства существенно зависят от числа сигналов земных станции, вследствие чего выбрать одну модель, достаточно полно отображающую особенности любого многостанционного сигнала, не удаётся. Поэтому практически используют две модели, одна из которых соответствует боль­шому, а вторая - малому числу сигналов.

При большом числе сигналов (*n*≥10) наиболее простой и естественной моделью является гауссовский шум со спектральной плотностью, равномерной в полосе частот ретранслятора *W:*

*σэ.ш.=nUi*2/2*W* при *f*0*-W*/2≤ *f*≤ *f*0*+W*/2;

*σэ.ш=*0при *f*0*< f*0*-W*/2, *f* > *f*0*+W*/2(15)

При этом следует иметь в виду, что относительный уровень перекрестных помех, определяемый с помощью данной модели, оказывается заниженным на 10lg(*qf*) дБ, поскольку при моделировании не учитываются частотные промежутки между сигналами земных станций. Учёт их требует (при той же средней мощности бортового ретранслятора) увеличения спектральной плотности мощности в соответствии с (15), что приводит к увеличению спектральной плотности нелинейных продуктов.

В качестве модели суммарного сигнала при малом *п* целесообразно принять аддитивную сумму некоторого числа независимых немодулированных синусоидальных колебаний, частоты которых находятся в таком соотношении, что продукты перекрестной модуляции различных порядков не совпадают по частоте и могут быть разделены фильтровым способом; этому требованию отвечают, например, частоты *f*о, *f*о+Δ, *f*о+2Δ, *fo+4*Δ*.* Минимальное число синусоидальных колебаний, при котором в ретрансляторе образуются все характерные взаимные помехи, равно 3, а общее их число с учётом калибровочной синусоиды должно быть равно 4. При этом средняя мощность суммы четырёх синусоидальных колебаний должна быть равна средней мощности суммарного сигнала, а амплитуда каждого из них

  (16)

Дальнейшее рассмотрение будем вести применительно к этим двум моделям.

**Определение оптимальных параметров системы и оценка эффективности МД с частотным разделением.**

Для оценки эффективности рассматриваемого метода многостанционного доступа в соответствии с принятым ранее критерием (16) необходимо сделать расчёт основных параметров системы, состоящейиз *n* земных станций общей ёмкостью *N* телефонных каналов и исследовать зависимость *N=j*(*n*)*.* При этом принято, что ёмкость *N'* всех станций одинакова, телефонные каналы в пределах одной станции передаются методом ЧМ с нормируемым качеством и разделяются по частоте с помощью стандартной каналообразующей аппаратуры, применяемой на наземных линиях.

Первый этап решения поставленной задачи - определение числа телефонных каналов *N,* которые могут быть переданы через ствол ретранслятора при заданных параметров ВЧ тракта (*D,* *Ps,* и т. д.), или, наоборот, синтез параметров ВЧ тракта, обеспечивающих передачу на одной несущей заданного числа телефонных сигналов.

Второй этап - определение числа телефонных каналов *N=N'n,* которые могут быть переданы через ВЧ тракт с принятыми выше параметрами при двух, трёх и более несущих. Результаты такого исследования представлены на рисунке 8, из которого следует, что при постоянных параметрах ретранслятора (*Рб* и *W*) ёмкость системы при многостанционном доступе с частотным разделением существенно падает с увеличением числа сигналов. Так, ретранслятор, рассчитанный на передачу 600 ТЛФ каналов в односигнальном режиме, при двух несущих способен пропустить лишь 360 каналов (по 180 каналов на каждой несущей), при трёх несущих - 270 каналов и т. д. При *n*>50 ёмкость ретранслятора составляет лишь 10...12% первоначальной. Если для каждой из несущих осуществляется оптимизация параметров сигналов и выбор оптимальной рабочей точки на характеристике ретранслятора с целью получения максимальной ёмкости передачи, то можно повысить ёмкость ретранслятора. На рисунке 8 соответствующая зависимость показана штриховой линией.



Рисунок 8. - Зависимость пропускной способности ретранслятора при частотном разделении от числа сигналов

Если на каждой из несущих частот передаётся только одно телефонное сообщение, то эффективным является применение статистического подавления несущих в паузах сигнала. Показано, что при реальной величине коэффициента активности телефонного канала *р*а=0,3 средняя загрузка ствола ретранслятора при подавлении несущих уменьшается на 5 дБ; это позволяет увеличить число передаваемых несущих в 3 раза (предельная оценка) (см. штрих-пунктирные линии на рис. 8).

Частотное разделение каналов занимает важное место (по объёму организуемых телефонных каналов) в мировых спутниковых системах. Причина этого состоит в простоте аппаратурных решений при ЧРК и их преемственности по отношению к традиционной технике РРЛ. При этом в спутниковых системах осуществляется передача с ЧРК как групповых сигналов (группами по 600, 60, 24 и 12 каналов), так и одноканальных телефонных сообщений, передаваемых на отдельных несущих. Последний метод - ОКН (один канал на несущую) - представляет особый интерес, так как обеспечивает максимально возможную гибкость и оперативность в перераспределении трафика между земными станциями. Примерами реализации принципа ОКН является аппаратура «Градиент-Н», используемая в системе «Интерспутник», и аппаратура SPADE, используемая в системе «Интелсат».

**Многостанционный доступ с временным разделением** (МДЧР), обладая рядом несомненных преимуществ, тем не менее, наделён и существенным недостатком, заключающимся в необходимости обеспечения квазилинейного режима выходного мощного каскада ретранслятора. При этом рабочая точка каскада оказывается обычно на 4... 6 дБ ниже точки, соответствующей режиму максимальной мощности. Столь заметное недоиспользование энергетического потенциала радиолинии существенно снижает пропускную способность системы связи и соответствующим образом ухудшает её экономические показатели. Этого недостатка практически лишён метод многостанционного доступа с временным разделением каналов (МДВР). Требуемая при многостанционном доступе ортогональность сигналов различных станций достигается тем, что каждой станции сети для излучения сигналов выделяется определённый, периодически повторяемый временной интервал, длительность которого в общем случае определяется трафиком станции. Интервалы излуче­ния всех станций взаимно синхронизированы, в силу чего перекрытие их не происходит. Интервал времени, в течение которого все станции сети по одному разу излучают свой сигнал, называется кадром, а длительность пакета, излучаемого одной станцией, называется субкадром. Такая система позволяет использовать ретранслятор в режиме, близком к режиму максимальной мощности, так как в каждый момент через ретранслятор проходит сигнал только одной станции и отсутствует проблема интермодуляционных помех, являющаяся одной из основных причин снижения пропускной способности системы при частотном многостанционном доступе. Аналогично тому как при МДЧР эффективность использования полосы пропускания ствола определяется необходимостью введения определённых частотных зазоров между отдельными модулированными несущими, так при МДВР эффективность использования времени работы ретранслятора *η* определяется необходимостью введения защитных временных зазоров между субкадрами, гарантирующими отсутствие их перекрытия при неидеальной работе системы межстанционной синхронизации, и необходимостью введения ряда дополнительных сигналов*η=Σ1nτ*инф*/Т*, где *τ*инф - временной интервал, используемый для передачи собственно информационного сигнала в *i*-м субкадре; *п* - число субкадров; *Т -* длительность кадра.

Как правило, в известных реализованных, либо проектируемых системах с МДВР *n*>0,9.

## Оценка помехоустойчивости систем с МДВР. Один из определяющих показателей при оценке возможностей той или иной системы многостанционного доступа - реализуемая пропускная способность. Основными факторами, влияющими на этот показатель, являются уровень флуктуационных шумов на входе демодулятора приёмного устройства, степень искажения сигнала при его прохождении по реальному радиотракту, и неидеальность работы отдельных элементов аппаратуры. Рассмотрим подробнее все эти факторы.

Следует предварительно отметить, что во всех известных системах МДВР применяется фазовая манипуляция в сочетании с передачей сигналов в дискретной форме.

Анализ помехоустойчивости систем связи с фазовой манипуляцией (в том числе и относительной фазовой манипуляцией) выполнен в предположении, что помехой является белый шум со статическими свойствами, определяемыми гауссовским распределением, и отсутствуют межсимвольные искажения, определяемые ограниченной полосой пропускания радиотракта, а также рядом дополнительных искажений радиосигнала, возникающих из-за неидеальности характеристик радиотракта.

Вероятность неправильного приёма сигнала с ФМ при когерентном детектировании

*р*ош ≈ (2*F*/*M*)(√‾2⋅*h*2sin(*π/*2*M*)), (17)

где  *р*ош - вероятность неправильного приёма бита в системе с *М*-кратнойФМ**;**

*h*2 - отношение энергии одной посылки к спектральной плотности мощности шума;

*F*(*x*)— интеграл вероятности.

Из приведённого выражения следует, что помехоустойчивость рассматриваемых систем быстро ухудшается с ростом кратности сигнала. Вместе с тем увеличение кратности позволяет уменьшить требуемую полосу пропускания канала связи. Таким образом, варьирование кратностью манипуляции позволяет иногда согласовать энергетический потенциал радиолинии с ее полосой про­пускания. Так, избыток энергетики при недостатке полосы позволяет увеличить пропускную способность с увеличением кратности, и, наоборот, недостаток энергетики при запасе по полосе может быть скомпенсирован уменьшением кратности.

Необходимо обратить внимание на то, что в приведённое выше выражение (17) входит величина *h*2, обозначающая отношение энергии одной посылки к спектральной плотности мощности шума. В то же время при практических измерениях на радиолиниях, а также при их расчёте часто используется отношение сигнал-шум, или *Рs/Рn.* Указанные величины связаны между собой соотношением *Рs1Рn=h*2*/*Δ*fТ,* где *Δf -* полоса пропускания тракта на входе демодулятора, в которой измеряется отношение *Рs/Рn,* а *Т* - длительность одной посылки. В том случае, когда Δ*f=*1/*Τ* (так называемая «согласованная» полоса), эти величины совпадают.

В таблице 1 для примера приведены требуемые отношения сигнал-шум при различных кратностях манипуляции, скоростях передачи информации и ширине полосы пропускания линейной части приёмного устройства.

Таблица 1.

Соотношения сигнал/шум

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *R,* Мбит/с | **20** | **40** | **60** |
| *М,* кратность | **1** | **2** | **3** | **1** | **2** | **3** | **1** | **2** | **3** |
| *R*кан*,*Мбит/с | 20 | 10 | 6,7 | 40 | 20 | 13,3 | 60 | 30 | 20 |
| *Т,* нс | 50 | 100 | 150 | 23 | 50 | 75 | 16,67 | 33,3 | 50 |
| Δ*f*=0,8/*T*, МГц | 16 | 8 | 5,4 | 32 | 16 | 10,6 | 48 | 24 | 16 |
| *Рs/Рn* при  *р*ош, равном |
| 10-4 | 9,8 | 1 2,8 | 17,8 | 9,8 | 12,8 | 17,8 | 9.8 | 12,8 | 17.8 |
| 10-5 | 10,8 | 13,8 | 18,8 | 10,8 | 13,8 | 18,8 | 10,8 | 13,8 | 18,8 |
| 10-6 | 11,8 | 14,8 | 19,5 | 11,8 | 14,8 | 19,5 | 11 .8 | 14,8 | 19,5 |
| Δ*f*=1/*T*, МГц | 20 | 10 | 6,7 | 40 | 20 | 13,3 | 60 | 30 | 20 |
| *Рs/Рn* при  *р*ош, равном |
| 10-4 | 8,8 | 11 ,8 | 16,8 | 8,8 | 11,8 | 16,7 | 8,8 | 11,8 | 16,8 |
| 10-5 | 9,8 | 12,8 | 17,8 | 9,8 | 12,8 | 17,8 | 9,8 | 12,8 | 17,8 |
| 10-6 | 10,8 | 1 3,8 | 18,5 | 10,8 | 1 3,8 | 18,5 | 10,8 | 13,8 | 18.5 |
| Δ*f*=1,2/*T*, МГц | 24 | 12 | 8 | 48 | 24 | 16 | 72 | 36 | 24 |
| *Рs/Рn* при  *р*ош, равном |
| 10-4 | 8,0 | 11 .0 | 16,0 | 8.0 | 11,0 | 16,0 | 8,0 | 11 ,0 | 16,0 |
| 10-5 | 9,0 | 12,0 | 17,0 | 9,0 | 1 2.0 | 17,0 | 9,0 | 12,0 | 17,0 |
| 10-6 | 10,0 | 13,0 | 17,7 | 10,0 | 13.0 | 17,7 | 10,0 | 13,0 | 17,7 |
| Δ*f*=1,35/*T*, МГц | 27 | 13,5 | 9,2 | 54 | 27 | 18 | 81 | 40,5 | 27 |
| *Рs/Рn* при  *р*ош, равном |
| 10-4 | 7,5 | 10,5 | 15,5 | 7,5 | 10,5 | 15,5 | 7,5 | 10,5 | 15,5 |
| 10-5 | 8,5 | 11 ,5 | 16,5 | 8,5 | 11 ,5 | 1 6,5 | 8,5 | 11,5 | 16,5 |
| 10-6 | 9,5 | 12,5 | 17,2 | 9,5 | 12,5 | 17.2 | 9,5 | 12,5 | 17,2 |

По охватываемой территории, размещению и принадлежности ЗС, структуре управления системы спутниковой связи (ССС) можно подразделить на международные, национальные и ведомственные. Значительная часть существующих и вновь создаваемых ССС предназначена для обеспечения телефонного трафика и передачи данных на международных и национальных линиях.

В зависимости от потребностей общества, технических и экономических возможностей разные страны проявляют различную степень активности в области спутниковой связи - от эпизодической аренды каналов в международных и региональных системах до создания собственных национальных ССС, проведения разработок и крупномасштабных экспериментов.

Станции VSAT

К классу земных станций VSAT (Very Small Aperture Terminal) относятся станции спутниковой связи, технические характеристики которых удовлетворяют следующим требованиям Рекомендаций МСЭ-Р S.725 «Технические характеристики VSAT»:

1. Станции VSAT устанавливаются непосредственно у пользователей, причём плотность размещения их на ограниченной территории может быть весьма высокой;

2. Станции VSAT обычно не имеют постоянного квалифицированного обслуживающего персонала;

3. Контроль и управление работой станций VSAT в сети осуществляются централизованно, но могут дополнительно использоваться и местные станционные системы контроля и управления;

4. Станции VSAT относятся к Фиксированной спутниковой службе (ФСС) и должны удовлетворять требованиям Регламента радиосвязи (РР) и Рекомендациям МСЭ-Р, как и все земные станции ФСС:

* Станции VSAT обычно применяются в так называемых выделенных сетях (частных, деловых) для передачи данных и телефонии в цифровом виде в режимах работы только на приём (симплекс) или на приём/передачу (дуплекс);
* Антенны VSAT обычно имеют диаметр 1,8...3,5 м, но в отдельных системах могут использоваться и большие антенны (диаметром до 6 М);
* Скорость передачи информации в цифровом виде со станций VSAT обычно не превышает 2 Мбит/с;
* В станциях VSAT используется маломощный радиопередатчик (обычно от 1 до 20 Вт) с обязательным ограничением излучаемой мощности в целях безопасности.

В настоящее время сети станций VSAT чаще всего работают в. диапазонах частот ФСС 6/4 ГГц и 14/11…12 ГГц.

**Типы сетей VSAT.** Сети VSAT принято классифицировать по двум основным признакам: по конфигурации трафика и по структуре системы управления сетью (централизованная и децентрализованная). Конфигурация сетей VSAT может быть любой.

В наиболее распространённых для станций класса VSAT сетях типа «звезда» обеспечивается многонаправленный радиальный трафик между центральной земной станцией сети (ЦЗС) и удалёнными периферийными станциями (терминалами) VSAT по энергетически выгодной схеме: малая *ЗС*  VSAT - большая ЦЗС, обладающая антенной большого диаметра и мощным передатчиком.

Сети VSAT подобного рода широко используются для организации информационного обмена между большим числом удалённых терминалов, не имеющих взаимного трафика, и центральным офисом фирмы, транспортными или финансовыми учреждениями.

Аналогичным образом построены телефонные сети для обслуживания так называемых удалённых абонентов, которым обеспечивается выход на телефонную коммутируемую сеть общего пользования через центральную станцию, подключённую к одному из наземных центров коммутации каналов (GATEWAY - шлюз).

Функции контроля и управления в сети типа «звезда» обычно централизованы и сосредоточены на центральной управляющей станции (ЦУС) сети (в англоязычной литературе – HUB station). ЦУС выполняет служебные функции установления соединений между абонентами сети связи и поддержания рабочего состояния всех периферийных терминалов VSAT данной сети. Подобная централизованная система управления сетью VSAT с помощью ЦУС экономически целесообразна для сетей с достаточно большим числом упрощённых и потому дешёвых периферийных терминалов VSAT. Однако известны примеры реализации сетей VSAT без ЦУС с децентрализованной распределённой системой управления, элементы которой входят в состав каждой станции VSAT.

В некоторых действующих телефонных сетях VSAT типа «звезда» функции ЦЗС и ЦУС разделены между разными земными станциями, но чаще функции ЦУС совмещают с функциями ЦЗС. Такая совмещённая схема ЦУС/ЦЗС используется преимущественно в сетях передачи данных с коммутацией пакетов, где ЦУС/ЦЗС выполняет роль диспетчера-маршрутизатора сетевого трафика и одновременно обеспечивает интерфейс спутниковой сети с наземной сетью передачи данных на основе протокола МСЭ-Т Х.25.

В сетях VSAT с централизованным управлением, создаваемых крупными спутниковыми операторами, программно-технические ресурсы одной ЦУС могут предоставляться нескольким автономно действующим и вновь создаваемым подсетям VSAT за счёт выделения части этих ресурсов каждой из подсетей.

 Так реализуется возможность постепенного расширения сети и реализации дополнительных услуг потребителям. Примером совокупности интегрированных сетей VSAT, обслуживаемых общей ЦУС, может служить спутниковая сеть фирмы Hughes Network Systems, США с общим числом управляемых терминалов VSAT в различных подсетях свыше 12000в сети «каждый с каждым» обеспечиваются прямые соединения между любыми станциями VSAT, расположенными во всех пунктах связи. Связь двух любых станций в такой сети устанавливается через спутник за один «скачок». Схема оптимальна для телефонных сетей, создаваемых в труднодоступных и удалённых районах, и для сетей передачи данных с относительно небольшим числом удалённых терминалов VSAT.

При централизованной схеме управления такой сетью ЦУС выполняет только служебные функции контроля и управления, необходимые для установления соединения между абонентами сети VSAT, но не участвует в передаче трафика.

В децентрализованном варианте управления сетью ЦУС отсутствует, а элементы системы управления входят в состав каждой VSAT станции. Подобные сети с распределённой системой упра­вления отличаются повышенной «живучестью» и гибкостью за счёт усложнения оборудования, расширения его функциональных возможностей и удорожания по этим причинам VSAT терминалов.

Известными примерами реализации полнодоступных сетей «каждый с каждым» являются следующие сети VSAT:

- телефонная спутниковая сеть с централизованным управлением на основе терминалов TES (Telephony Earth Station) фирмы Hughes Network Systems. США, предназначенная для высококачественной передачи речи и данных там, где экономически нецелесообразна реализация сети на основе наземных каналов;

- спутниковая сеть VSAT Plus фирмы SPAR (Канада) с децентрализованным управлением для передачи данных, речевой, видео- и факсимильной информации в цифровой форме.

**Типы многостанционного доступа в сетях VSAT.** Многостанционный доступ в сетях VSAT обычно организуется на основе метода частотного разделения (МДЧР) в режиме закреплённых каналов между станциями с интенсивным трафиком или в режиме МДЧР с предоставлением каналов по требованию (МДЧР-ПКТ) для интерактивного трафика.

Исходящий канал с ВР

Входящие каналы с МДВР

**f**

**От ЦЗС**

**От VSAT**

**1 2** •••  ***n***

Полоса частот

Несущие частоты каналов

Рисунок 3. Многостанционный доступ в сетях VSAT типа «звезда»

В интерактивном режиме передачи информации станции сети VSAT осуществляют доступ к выделенным в стволе ретранслятора несущим частотам на основе метода временного разделения (МДВР), в том числе по протоколу МДВР со случайным доступом типа ALOHA или более эффективным разновидностям этого протокола: тактированная ALOHA (S-ALOHA) и ALOHA с резервированием (R-ALOHA).

Как показано на рисунке 3, в сетях типа «звезда» различают исходящие (ЦЗС-VSAT) и входящие (VSAT-ЦЗС) спутниковые каналы, которые образуются на основе МДЧР в выделенной для данной сети VSAT полосе частот ствола спутникового ретранслятора.

В сетях VSAT с большим числом периферийных терминалов каждому исходящему каналу ЦЗС обычно соответствует несколько (1, 2,..., *n*) входящих каналов (*n* < 32), используемых различными группами терминалов VSAT. Структура входящих и исходящих каналов в каждом конкретном случае определяется на основе требований к сети связи, составу сети, видам и скорости передаваемой информации. В одной сети может быть организовано несколько исходящих и соответствующих им входящих каналов.

Исходящий канал ЦЗС-VSAT организуется обычно как канал на отдельной несущей с временным разделением (ВР) и пакетированием передаваемой информации. Скорость передачи информации в исходящем канале определяется общим объёмом радиального трафика от ЦЗС сети к группе обслуживаемых периферийных терминалов VSAT. Типовые скорости передачи информации в исходящих каналах действующих сетей VSAT 256...2048 кбит/с, метод модуляции - квадратичная фазовая манипуляция (КФМ/QPSK).

ЦЗС передаёт информацию в исходящем канале в виде непрерывного сигнала с регулярной кадровой структурой, состоящего из временной последовательности информационных пакетов, повторяющих классическую структуру пакетов систем с МДВР:

1. флаг начала пакета (преамбула);
2. заголовок пакета;
3. блок данных (полезная информация);
4. проверочная последовательность (исправление ошибок);
5. флаг окончания пакета (постамбула).

Границы кадра обозначаются уникальным словом (UW) и блоком служебной информации, которые используются для сетевой кадровой синхронизации пакетов, передаваемых терминалами VSAT во входящих каналах VSAT-ЦЗС и для управления терминалами VSAT по протоколам S, R-ALOHA.

Совокупность передаваемых в исходящем канале ЦЗС пакетов предназначена (адресуется) группе периферийных терминалов VSAT. Каждый терминал VSAT по коду адресного поля в заголовке пакетов принимает только адресованные этому терминалу пакеты из переданной последовательности. Другие пакеты пропускаются (игнорируются).

В каждом из ответных каналов VSAT-ЦЗС, передаваемых на отдельных несущих (рис. 3), организуется временной доступ группы терминалов VSAT. Информация передаётся пакетами со следующей структурой:

1. преамбула;
2. заголовок;
3. информационный блок;
4. проверочная последовательность;
5. постамбула.

Пакеты разных станций VSAT располагаются на временных интервалах в пределах общего временного кадра. Для доступа наиболее часто используются разновидности одного из протоколов МДВР со случайным доступом типа S-ALOHA, R-ALOHA или более эффективных протоколов, адаптивных к значению загрузки канала. Типовые скорости передачи пакетированной информации во входящих каналах 64/128 кбит/с, модуляция — ФМ-2/ФМ-4 (BPSK/QPSK).

Иногда в сетях для передачи телефонии входящие каналы VSAT-ЦЗС организуются, как обычные каналы с частотным разделением типа «один канал на несущую» (МДЧР-ОКН). Им по требованию предоставляются экономичные ско­рости передачи 16/24/32 кбит/с на всё время соединения.

В ряде случаев применяется многостанционный доступ с кодовым разделением сигналов (МДКР), позволяющий наиболее эффективно решать проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) сетейVSAT с наземными и другими спутниковыми сетями, но уступающийМДВР и МДЧР по эффективности использования пропускной способности спутникового ретранслятора.

В настоящее время применяются как сети VSAT для передачи отдельных видов информации (телефонные сети, сети передачи данных), так и интегрированные сети «деловой» спутниковой связи обеспечивающие пользователям комплекс услуг по передаче с каждого терминала VSAT различных видов информации в цифровой форме (данных, речевых сообщений, сигналов факса и телекса). В этом случае для передачи каждого вида информации могут быть использованы наиболее эффективные из вышеперечисленных методов доступа терминала VSAT к спутниковому сегменту, которые обеспечивают оптимальные задержки передачи информации между абонен­тами сети для интерактивных режимов работы, передачи больших файлов данных или комбинированных вариантов трафика. Далее рассмотрим основные характеристики таких сетей.