

УДК 621.396.946

Пропускная способность сети спутниковой связи с космическим сегментом – геостационарным искусственным спутником Земли

Л.В. Меньшикова, кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем,
Государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования Московской области

«Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза,
летчика-космонавта А.А. Леонова», г. Королев, Московская область,

Д.М. Найденова, студентка 1-го курса
Факультета вычислительной математики и кибернетики,
Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва

Предложена методика расчета пропускной способности спутниковой сети связи по измерениям распределения мощности усилителя ретранслятора, в том числе для частного случая – сети спутниковой связи с архитектурой «центральная звезда». Данная методика может быть масштабирована на телекоммуникационные сети связи и передачи данных, имеющие другую топологию сети, а так же работающие по иным технологиям.

Проекты информатизации, информационно-аналитические системы, проектирование сети спутниковой связи, телекоммуникационные сети с архитектурой «звезда», пропускная способность сетей передачи данных.

Bandwidth of the satellite communication network with the space segment – geostationary artificial satellite of the earth

L.V. Menshikova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor of the Department
of Information Technologies and Control Systems,
State Budgetary Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region
«Technological University named after twice Hero of the Soviet Union,
pilot-cosmonaut A.A. Leonov», Korolev, Moscow region,

D.M. Naydenova, 1st year student of the Department of Applied Mathematics and
Cybernetics of Moscow State University named after M.V. Lomonosov, Moscow

The method of bandwidth calculating of a satellite communication network based on measurements of the power distribution of a transponder amplifier, including for a special case – a satellite communication network with the «central star» architecture. This technique can be scaled to telecommunication networks of communication and data transmission, having a different network topology, as well as working on other technologies.

IT-projects, VI-systems, satellite communication network design, the telecommunications networks with the star-architecture, bandwidth of data communication networks.

Введение

В современную эпоху всеобщей глобализации, природных бедствий и техногенных катастроф необходима новая стратегия [4, С.81] освоения космоса. Её отличие стратегии XX века [3, С.67] заключается в изменении космической деятельности – постепенном переходе от космической гонки «за лидером» в целях достижения превосходства в космосе – к совместной космической деятельности, направленной на удовлетворение реальных потребностей мирового сообщества. Особенно остро этот вопрос встал в период пандемии, когда стали уделять значительное внимание мониторингу природных бедствий и катастроф, равно как и прогнозированию техногенных катаклизмов, которые классифицированы на рисунке 1.

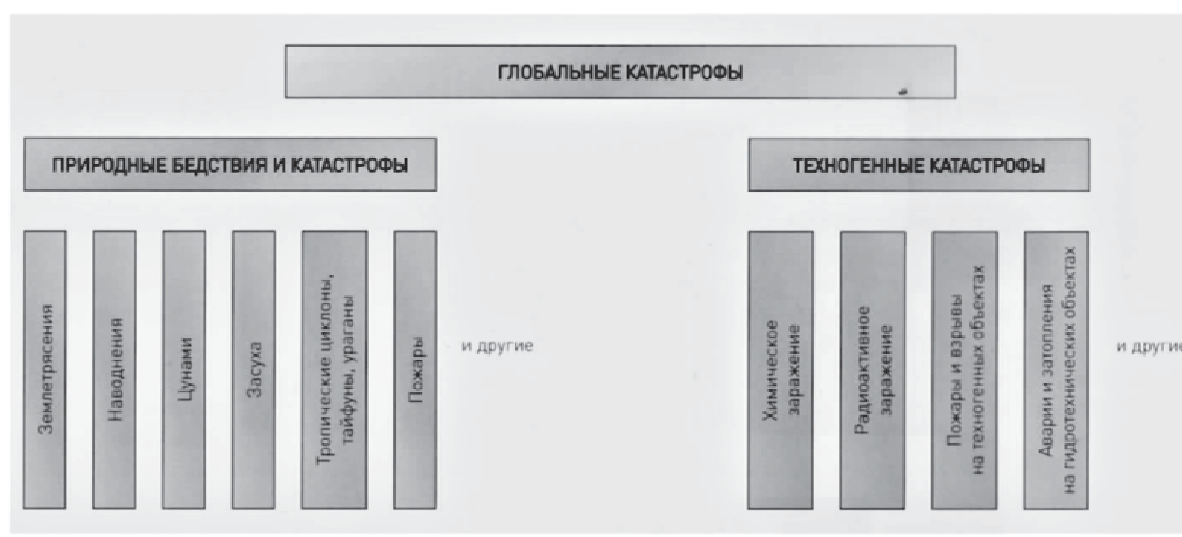


Рисунок 1 – Глобальные природные и техногенные катастрофы

Предупреждать стихийные явления и техногенные катастрофы на основе мониторинга их предвестников и первичных признаков, ослаблять разрушительные последствия и быть к ним готовыми – экономически более выгодно, чем реагировать на их последствия. Мировая практика позволяет с уверенностью утверждать, что затраты на прогнозирование и обеспечение готовности к стихийным бедствиям в 15 раз ниже затрат на ликвидацию ущерба, причинённого катаклизмами природы.

Для нашей страны, так же как и для всего мирового сообщества, в связи отсутствием в большинстве стран хорошо развитой инфраструктуры телекоммуникаций, альтернативы спутниковой связи фактически не существует. Поэтому спутниковая связь, позволяющая предоставлять минимальный набор телекоммуникационных услуг, будет становиться все более востребованной, невзирая на активное развитие других видов связи. В районах стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций

чайных ситуаций только оперативное развертывание наземных станций спутниковой связи может решить проблему обеспечения взаимодействия с внешним миром, так как любые имеющиеся на этой территории иные виды связи и телекоммуникаций могут в любой момент отказать.

XX век характеризовался бурным развитием науки и техники. Два великих русских ученых еще в конце XIX века положили начало двум научно-техническим направлениям, которые и заняли лидирующее место в этом процессе. Это Константин Эдуардович Циолковский, положивший начало космонавтике, и Александр Степанович Попов, с первого радиоприемника которого и началась радиотехника. Именно симбиоз этих двух передовых направлений и привел к появлению в дальнейшем искусственных спутников Земли (ИСЗ), на которые в качестве полезной нагрузки устанавливаются ретрансляторы систем спутниковой связи (ССС).

ССС с космическими аппаратами (КА) на геостационарной орбите (ГСО) используются, в основном, для организации фиксированной связи и телевидения.

Спутниковая связь существенно отличается от других видов связи – радиорелейной, тропосферной, ионосферной, сотовой и транкинговой, прежде всего, максимальным охватом территории, на которой осуществляется связь, и слабой зависимостью от атмосферных явлений.

И хотя сейчас широкое распространение получили сотовая связь и оптоволоконные линии связи, альтернативы спутниковым сетям связи с учетом необъятных просторов нашей страны – пока не существует.

Системы спутниковой связи делятся на две большие категории – с космическими аппаратами на геостационарной орбите и с космическими аппаратами на негеостационарной орбите. Негеостационарные орбиты, в свою очередь, подразделяются на низкоорбитальные (LEO), средневысотные (MEO) и высокоэллиптические (HEO).

Начиналось все в начале шестидесятых годов, когда были запущены первые спутники связи – высокоэллиптический «Молния-1» (СССР, 1965 г.) и низкоорбитальный Тельстар (США, 1962 г.). Надо отметить, что высокая эллиптическая орбита широко используется до сих пор для обслуживания приполярных районов, в которых неэффективно использовать геостационарные спутники (из-за малых углов места, под которыми видны КА), а порой и невозможно (вблизи полюса).

Основной недостаток эллиптических орбит – необходимость отслеживать антеннами земных станций движение спутника и переход с одного на другой спутник три раза в течение суток, что приводит к усложнению аппаратуры и, иногда, к перерывам в связи.

Впервые использовать для спутников связи геостационарную орбиту предложил в 1945 году английский инженер Артур Кларк, который определил необходимую высоту орбиты и показал, что трех геостационарных спутников достаточно для создания системы спутниковой связи, охватывающей всю территорию Земли.

Таким образом, достаточно трех современных космических аппаратов на геостационарной орбите с достаточным в части частотно-энергетического ресурса количеством ретрансляторов, а к ним в дополнение шесть космических аппаратов на эллиптической орбите, работающих во взаимно перпендикулярных плоскостях, для охвата полюсов Земли и прилегающих к ним районов, чтобы проводить глобальный мониторинг Земли и предоставлять минимальный набор телекоммуникационных услуг, включая услуги связи.

За последние годы достигнут значительный прогресс в понимании процессов, предопределяющих зарождение негативных и потенциально опасных геофизических явлений. Для решения одной из насущных проблем современности – предотвращения и снижения ущерба от происходящих стихийных природных бедствий и техногенных катастроф – создается ряд систем мониторинга техногенных явлений, в частности Международная аэрокосмическая система глобального мониторинга (МАКСМ), структурная схема которой представлена на рисунке 2.

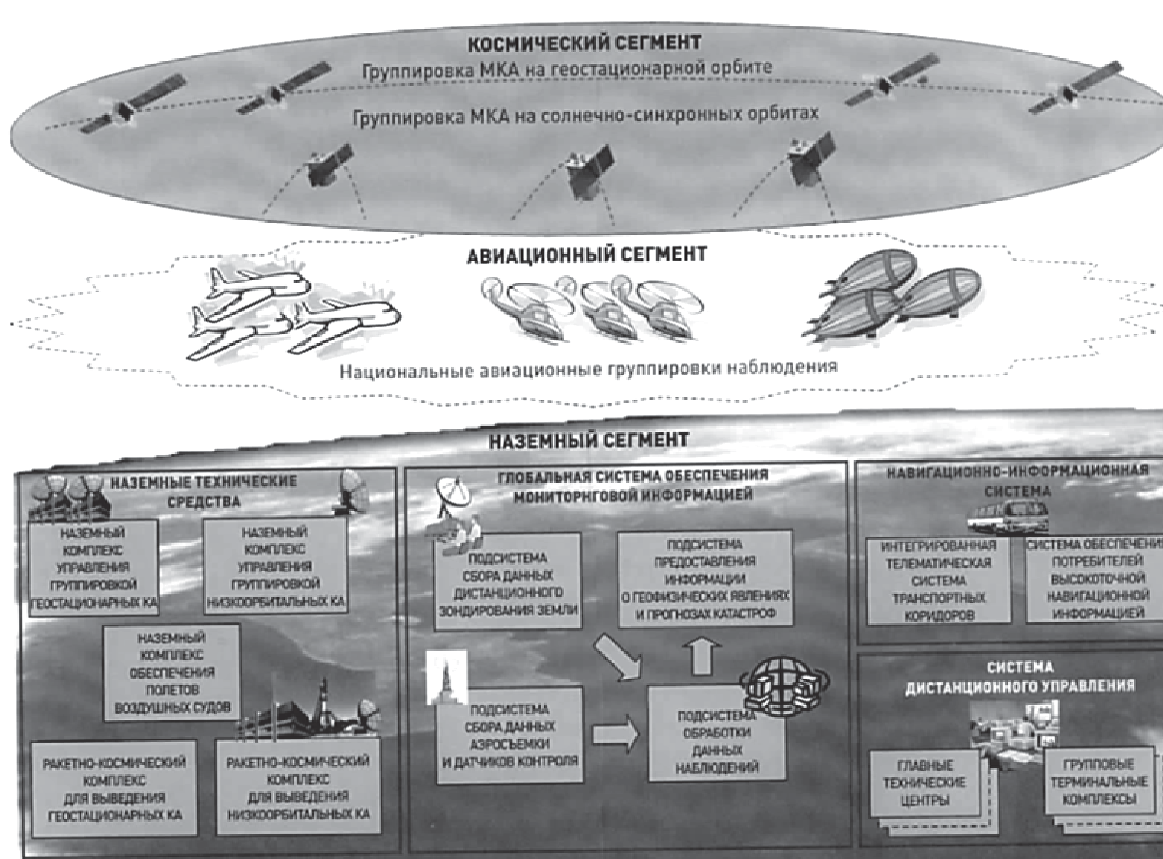


Рисунок 2 – Структурное построение МАКСМ

Концептуально эту схему можно считать общей для всех систем, предоставляющих телекоммуникационные услуги или проводящих любого рода глобальный мониторинг, имеющих в своем составе космический сегмент.

За годы, прошедшие момента вывода на орбиту первого геостационарного спутника, системы спутниковой связи с геостационарными КА стали чрезвы-

чайно популярны. Космический сегмент фиксированной спутниковой связи в настоящее время строится исключительно на основе геостационарных спутников связи.

Средняя стоимость создания геостационарного спутника составляет примерно 300 млн. долларов. Геостационарные спутники относятся к классу тяжелых КА. Вывод их на орбиту осуществляется с помощью тяжелых ракет-носителей. Стоимость запуска составляет в среднем 200 млн. долларов. Наиболее дорогим является запуск с помощью ракеты Ariane, а самым дешевым – с помощью Long March. Россия обладает достаточными техническими возможностями для создания и запуска собственными различными геостационарных спутников связи и вещания с помощью своих ракет-носителей, в частности для запуска геостационарных спутников ракетами «Протон» и «Зенит» [4, С.15]. Если процесс создания полноценного спутника-ретранслятора занимает три года, то малые геостационарные спутники создаются в гораздо более короткие сроки. Стоимость их в разы меньше. Поэтому скоординированные точки стояния на ГСО являются стратегическим ресурсом страны, координировать их все сложнее из-за появления разного рода частных компаний в этом промышленном сегменте. Это тоже одна из причин появления малых СР на ГСО, так как в случае запуска в точку стояния пусть даже и малого КА, скоординированная ранее точка не аннулируется.

Итак, преимущества ССС с КА на ГСО очевидны, это, во-первых, максимальная зона обслуживания, а во-вторых, длительный срок существования геостационарного спутника на орбите с минимальными энергетическими затратами (спутник находится на высоте почти 36000 км над экватором Земли и движется по орбите под действием только силы притяжения Земли и центробежных сил). На данный момент срок активного существования современных спутников составляет около 25 лет. В-третьих, отсутствие каких-либо атмосферных явлений на такой высоте, что приводит к высокой эффективности работы солнечных батарей, и, наконец, то, что геостационарный спутник удерживается в заданной рабочей области ГСО и как бы неподвижно зафиксирован относительно Земли, что позволяет организовывать связь без сопровождения спутника антеннами земных станций и без каких-либо перерывов в работе.

Основные диапазоны частот спутников-ретрансляторов на геостационарной орбите – С-диапазон (6/4 ГГц), Ku-диапазон (14/11 ГГц) и Ka-диапазон (30/20 ГГц). К-диапазон, зарезервированный для радиолокации и спутниковой радиосвязи и X-диапазон, используемый для радиолокации, наземной и спутниковой радиосвязи, не используются для передачи информации. Кроме того, для сетей подвижной спутниковой связи используются L-, и S-диапазоны. Эти же диапазоны частот используются на средневысотных и высокоэллиптических негеостационарных орбит.

За последнее 20 лет в связи с введением упрощенной процедуры получения разрешительных документов большую популярность приобрели интерактивные VSAT-сети, использующие технологию многостанционного доступа TDM/MF-TDMA или технологию широкополосного доступа по стандарту циф-

рового видеовещания с обратным спутниковым каналом DVB-RSC [3, С. 67]. Кроме того, в настоящее время регламентируется только геостационарная орбита и зоны видимости ГЛОНАСС/GPS.

Актуальные сведения о спутниках российской космической группировки с указанием точек стояния геостационарных спутников и частотных диапазонов их ретрансляторов, через которые передается информация, есть в открытом доступе в Интернет, например, на сайте Википедии. Помимо этих ресурсов Россия использует некоторые ретрансляторы международных организаций, в состав которых она входит или входила ранее. Так, например, до сих пор используются ССС «ИНТЕЛСАТ», «ИНМАРСАТ» и «ЕВТЕЛСАТ», документация по которым доступна Российской Федерации в полном объеме, в отличие от документации СР и каналов связи частных или локальных, принадлежащих одной стране или группе стран, кампаний.

Спутниковые системы связи делятся по типу предоставляемых услуг на односторонние (широковещательные), предназначенные для передачи теле- и радиопрограмм и другой информации для большого числа абонентов, такой как биржевые сводки, новости и т.п., и интерактивные, предназначенные для организации информационного обмена между абонентами.

По топологии сети спутниковой связи делятся на сети с топологией типа «точка-точка», «звезда» (в том числе и многоуровневая) и полносвязные сети, предоставляющие каналы связи по требованию.

В сетях спутниковой связи с топологией «точка-точка» для организации связи между двумя абонентами используется пара частот, выделенная этим станциям на постоянной основе.

В полносвязных сетях любая земная станция (ЗС) может связаться с любой ЗС, получив по запросу пару частот на время одного сеанса связи.

Одним из основных вопросов при проектировании, развертывании и дальнейшей эксплуатации сетей спутниковой связи с использованием спутника-ретранслятора на геостационарной орбите является организация и обеспечение контроля за использованием частотно-энергетического ресурса в сетях спутниковой связи и определения местоположения наземных станций, создающих помехи этим сетям связи.

Пропускная способность сети спутниковой связи, космическим сегментом которой является геостационарный ИСЗ

Одним из ключевых параметров любых сетей передачи данных, в том числе и спутниковых сетей связи, без которого использование сетей передачи данных неэффективно, является пропускная способность такой сети.

Пропускная способность сетей спутниковой связи определяется либо общим объемом информации, передаваемой через искусственный спутник Земли, либо необходимым числом каналов между каждой парой земных станций.

Пропускная способность сети определяется архитектурой сети, возможностями коммутации, количеством информационных каналов, их качеством, а так же пропускной способностью и механизмами перераспределения ресурсов бортового ретранслятора и земных станций.

Следует отметить, что учитывая время существования сетей спутниковой связи, составляющее не менее 6...7 лет и не более 20...25 (иногда до 50) лет, наблюдается постоянный рост потребностей в дополнительных каналах сетей спутниковой связи, с одной стороны, и ухудшение характеристик спутника-ретранслятора и земных станций с увеличением их периода эксплуатации (до замены их на новые), поэтому при проектировании сетей спутниковой связи всегда следует предусматривать некоторый запас частотно-энергетического ресурса, особенно для спутника-ретранслятора и центральной земной станции (ЦЗС) в случае использования топологии «звезда».

В современных сетях спутниковой связи используются разные технологии доступа к ресурсам спутника-ретранслятора и организации каналов связи. Наибольшее распространение имеют следующие технологии:

- с временным мультиплексированием (Time Division Multiplexing – TDM) и многостанционным доступом с временным разделением абонентских линий в одном частотном канале (Time Division Multiple Access – TDMA) и топологией типа «звезда»;
- с предоставлением каналов по требованию (Demand Assigned Multiple Access – DAMA) и полносвязной топологией;
- с предоставлением частотного канала спутниковой связи паре абонентов по предварительному временному расписанию или на постоянной основе на неопределенное время (Pre-assignment Multiple Access или Permanent Assignment Multiple Access – PAMA) – топология, как правило, «точка-точка», но может иметь разные топологии;
- многочастотный TDMA (Multifrequency TDMA – MF– TDMA) (как правило, полносвязная сеть, может иметь разные топологии);
- широкополосный доступ по стандарту цифрового видеовещания с обратным спутниковым каналом (Digital Video Broadcasting – Return Satellite Channel «Multifrequency TDMA – MF– TDMA» «Multifrequency TDMA – MF– TDMA» DVB «Multifrequency TDMA – MF– TDMA» RSC) с топологией «звезда».

Остановимся подробнее на каждой из вышеупомянутых технологий.

В сетях TDM/TDMA, которые как говорилось выше, имеют топологию «звезда», все потоки данных проходят через ЦЗС, а поэтому при взаимодействии двух ЗС передаваемые между ними данные дважды проходят через спутник-ретранслятор. При этом возникает задержка, которая несущественна при передаче данных, но делает их малоприспособными для телефонии. В сетях TDM/TDMA ЗС совместно используют частотные каналы и постоянно находятся в активном состоянии, что обеспечивает малое время реакции сети. Принцип работы сетей таков: ЦЗС объединяет потоки данных, предназначенных разным терминалам, в один исходящий канал (TDM). При этом в одном частотном канале образуется несколько независимых подканалов. Причем каждый из них получает неизменную во времени часть пропускной способности общего канала независимо от проходящего по нему трафика. Все терминалы сети принимают всю информацию, но каждый обрабатывает адресованные только ему данные. Для передачи данных на ЦЗС терминалы используют один или несколько входящих каналов в

режиме разделения времени (TDMA) и конкурируют за таймслоты в них. При этом возможны коллизии. В этом случае ЗС делают случайную паузу и затем пытаются передать данные снова. Такие сети нередко используют для объединения локальных вычислительных сетей, верификации кредитных карточек, удаленного доступа к централизованным базам данных, передачи факсов и т.п. Как правило, скорость TDM-канала – 128 кбит/с, а TDMA – 64 кбит/с.

В сетях DAMA используется метод многостанционного доступа с предоставлением паре абонентов частотного канала спутниковой связи по запросу и только на время одного сеанса связи, что позволяет эффективно использовать частотный ресурс. Сети DAMA имеют полностью связную топологию, а значит информация, передаваемая между двумя станциями, проходит через спутник только один раз. Благодаря этому задержка сигнала минимальна, и данные сети используют, в основном, для телефонии. Принцип их работы следующий: ЗС, к которой подключен телефон вызывающего абонента, формирует запрос на установление соединения и передает его ЦЗС по общему для всех каналу сигнализации. ЦЗС идентифицирует вызов и устанавливает соединение между вызывающим и вызываемым абонентами. При этом абонентам выделяется пара каналов – один для приема, а другой для передачи. По окончании сеанса ЦЗС освобождает каналы и они становятся вновь доступными всем абонентам сети. Скорости в таких каналах от 16 кбит/с до 64 кбит/с.

В сетях PAMA для взаимодействия двух станций выделяется постоянная пара частот, то есть канал является дуплексным. Передача по ним осуществляется с использованием протоколов терминального оборудования клиентов. Это самый простой и самый надежный способ организации связи. Но при этом частотный ресурс используется неэкономно. Причем, если станции не передают информацию, то канал пустует. Но следует отметить, что в таких сетях, в общем случае, экономится энергетический ресурс. Эта технология используется, в основном, в корпоративных сетях. Типовая скорость – от 64 кбит/с до 2048 кбит/с.

В сетях MF-TDMA абонентским ЗС предоставляется динамический доступ к общим частотным каналам с временным разделением, то есть любая ЗС может использовать все выделенные частоты и любую доступную полосу по запросу. В таких сетях отсутствует выделенная ЦЗС, ее функции может выполнять любая ЗС. ЗС работают в общем широкополосном канале на разных частотах с предоставлением полосы по требованию, что позволяет эффективно интегрировать высокоскоростные потоки разнородного трафика в рамках одной сети. Эта технология используется для точек подключения провайдеров Интернет, локальных (LAN) и глобальных (WAN) корпоративных сетей, сетей дистанционного обучения и телемедицины, сетей передачи телефонного трафика и данных общего пользования, связи служб спасения и оповещения.

В сетях DVB-RSC для передачи высокоскоростного потока данных от ЦЗС к абонентским ЗС используется широко распространенная в цифровом телевидении технология DVB, а обратный трафик передается по спутниковому каналу с меньшей скоростью (типовой прямой канал – 512 кбит/с, обратный – от 32 кбит/с). Эта технология позволяет строить спутниковые системы связи с асим-

метричным трафиком и используется для доступа в Интернет, цифрового мультимедийного обмена, организации видеоконференций, многоадресной рассылки и т.д. Применение в обратных каналах метода многочастотного доступа (MF-TDMA) повышает эффективность использования полосы частот.

Для всех вышеперечисленных технологий пропускная способность рассчитывается исходя из видов *передаваемой информации* и требования к *качеству передачи*.

Поэтому данные о необходимой пропускной способности сетей спутниковой связи обычно должны содержать перечень видов передаваемой информации и требования к качеству передачи.

Качество передачи оценивается достаточно большим и разнородным числом показателей, таких как:

- достоверность передачи информации, которая количественно определяется вероятностью ошибочного приема одного бита информации,
- скорость передачи информации по каналам связи,
- вероятность предоставления канала связи,
- среднее время ожидания предоставления канала связи и др.

Обеспечить достижение заданных показателей качества можно различными способами: как выбором параметров технических устройств, так и выбором параметров протоколов и алгоритмов функционирования тех или иных подсистем.

Достоверность передачи информации в спутниковых системах связи определяется отношением сигнал/шум на входе земных станций.

Отношение сигнал/шум в основном определяется:

- мощностью передатчиков наземного и космического сегмента сети,
- диаметрами приемо-передающих антенн,
- методом модуляции (манипуляции) радиосигналов,
- методом помехоустойчивого кодирования и декодирования информации,
- способами проектирования приемных устройств и обработки принятых сигналов,
- методом разделения и уплотнения каналов связи,
- диапазоном используемых частот,
- применяемой поляризацией сигналов и др.

Должны быть указаны так же требования к засекречиванию тех или иных сообщений, поскольку такая обработка может изменить фактический объем передаваемой информации и требования к ее качеству.

Необходимый объем информации должен быть распределен по используемым каналам связи на две группы: дуплексные каналы и каналы циркуляционного характера (телевидение, звуковое вещание, изображение газетных полос).

Мощность излучаемых ретранслятором сигналов определяется, в основном, пиковой мощностью усилителя, выбором рабочей точки на амплитудной характеристике усилителя, видом радиосигналов и др.

Если земные станции сетей спутниковой связи находятся в различных зонах, то вследствие различия суточного времени между зонами, которые обслу-

живают разные лучи, временного колебания трафика, случайного характера запросов на установление соединения, групповой сигнал является случайным процессом. В условиях различной активности и числа абонентов, различных энергетических потенциалов радиолиний (если спектр используемых наземных станций достаточно разнороден) возникает задача перераспределения имеющихся ресурсов космической станции, в частности, мощности передатчиков между различными абонентами так, чтобы достоверность передачи информации была не хуже заданной для любой используемой радиолинии в каждом луче.

Пусть задана эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) одного ствола космической станции [1, С.59–61]:

$$EIRP = (P_{прд\ кс} \eta_{прд\ кс}) G_{прд\ кс},$$

где $(P_{прд\ кс} \eta_{прд\ кс})$ – мощность передатчика ствола ретранслятора искусственного спутника Земли, подводимая к передающей антенне искусственного спутника Земли (т.е. с учетом потерь в фидерном тракте). Эта мощность может быть задана при выдаче исходных данных на проектирование системы связи либо выбрана разработчиком на основе имеющихся прототипов и опыта создания искусственного спутника Земли заданной массы и габаритных размеров, определяемых возможностями средств вывода на геостационарную орбиту.

Из общей массы выведенного на орбиту искусственного спутника Земли на собственно ретранслятор и его антенны выделяется не более 15...30%. Остальное приходится на платформу искусственного спутника Земли, содержащую системы коррекции его положения, управления, терморегулирования и жизнеобеспечения. Разумеется, при некоторых общих возможностях по массе и габаритным размерам, можно создавать ретранслятор с разным числом стволов. Чем меньше стволов, тем большей может быть мощность каждого из них.

Необходимо учитывать взаимосвязь между мощностью и полосой пропускания ствола. Существует некоторое оптимальное соотношение между ними, справедливое при используемых параметрах сигналов и типов земных станций. Увеличение мощности за оптимальные пределы дает некоторый рост пропускной способности, однако более медленный, чем это было бы возможно при согласованном изменении мощности и полосы пропускания ствола. На практике установились следующие соотношения: при полосе ствола $\Delta f_{ств} = 35...40$ МГц, используемого для **системы дуплексной связи**, его мощность $(P_{прд\ кс} \eta_{прд\ кс}) = 5...20$ Вт, $EIRP = 23...31$ дБВт при добротности земной станции $G/T = 25...39$ дБ/К; снижение G/T требует пропорционального увеличения ЭИИМ.

По выбранному значению ЭИИМ легко определить создаваемую у поверхности Земли плотность потока мощности (ППМ) (SFD – saturation flux density, дБВт/м²):

$$W = 10 \lg \left(\frac{EIRP}{4\pi d^2 L_{дон}} \right), \quad (1)$$

где d – наклонная дальность, $L_{дон}$ – дополнительные потери в атмосфере.
Мощность сигнала на входе приемника:

$$P_{вх\ прм} = W S_{эф\ прм}, \quad (2)$$

где $S_{эф.прм} = S_p q$ – эффективная площадь приемной антенны; S_p – геометрическая площадь раскрытия антенны (для зеркально–параболической антенны $S_p = \pi D^2/4$, где D – диаметр антенны; $q = 0.5...0.7$. По (2) выбирается размер антенны земной станции.

Мощность шума на входе приемника ЗС:

$$P_{ш} = k T \Delta f_{ш}, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана; T – суммарная температура шума; $\Delta f_{ш}$ – полоса пропускания ствола.

Суммарная температура шума T определяется в основном выбранным типом маломощного усилителя и составляет обычно от 50...100 до 200...3000 К. Значение $P_{ш}$ следует увеличить относительно определенного по (1.2) на 20...30% для учета помех от других систем связи через искусственный спутник Земли, а также от других стволов данной системы связи, работающих на совпадающих (но с другой поляризацией или с пространственным разнесением зон обслуживания) или соседних частотах.

Из соотношений (1), (2), (3) определяется отношение сигнал-шум [2, С.39– 41]: $P_{вх.прм}/P_{ш}$ как функция ($W S_{эф.прм}$):

$$\frac{P_{вх.прм}}{P_{ш}} W = 10 \lg \left(\frac{EIRP}{4\pi d^2 L_{дон}} \right) \frac{S_{эф.прм}}{kT\Delta f_{ш}}. \quad (4)$$

Выбирая диаметр антенны земной станции D можно изменять $P_{вх.прм}/P_{ш}$, добиваясь необходимого значения этого отношения. Теоретически необходимое значение следует определять из известного соотношения для предельной пропускной способности ствола (бит/с):

$$C = \Delta f_{ств} \cdot \log_2 \left(1 + \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right)_{dw} \right). \quad (5)$$

Если необходимая пропускная способность задана не в битах в секунду, а в числе каналов, то легко перевести число каналов в эквивалентную скорость передачи: один телефонный канал принимают эквивалентным по скорости передачи 32...64 кбит/с.

Поскольку пропускная способность задана перед проектированием системы, из (5) можно найти необходимое отношение $(P_c/P_{ш})_{dw}$. Однако следует учитывать, что реальная пропускная способность ствола оказывается существенно ниже потенциальной (в 3...10 и более раз) в зависимости от вида используемых сигналов и совершенства аппаратуры. Особенно трудно реализовать потенциальную пропускную способность при особо низких и особо высоких отношениях сигнал-шум $P_c/P_{ш}$, поскольку это требует сложных сигналов и аппаратуры. Обычно принимают $(P_c/P_{ш})_{dw}=10...20$ дБ. Так, для приема сигналов с частотной модуляцией необходимое $(P_c/P_{ш})_{dw}=10...12$ дБ во избежание известного явления – порога помехоустойчивости. Для приема двучастотных сигналов с фазовой манипуляцией с высокой достоверностью (вероятность ошибки $10^{-5}...10^{-6}$) и некоторым эксплуатационным запасом в зависимости от кратности модуляции требуется отношение сигнал-шум от 10...13 дБ (при двухфазной фазо-

вой модуляции), 13...16 дБ (при четырехфазной фазовой модуляции) до 24...25 дБ (при восьмифазной модуляции). При этом скорость передачи информации (бит/с) может приближаться к значениям $R = \Delta f_{cm\phi}$ (Гц) при двухфазной модуляции, $R = 2\Delta f_{cm\phi}$ (Гц) – при четырехфазной, $R = 4\Delta f_{cm\phi}$ (Гц) – при восьмифазной. Эти значения справедливы при отсутствии многостанционного доступа в системе, т.е. в односигнальном режиме, либо при временном многостанционном доступе, когда потери относительно односигнального режима невелики (1...2 дБ).

Величина $(P_c/P_{uw})_{dw}$ ограничена также реально осуществимым значением эффективного диаметра антенны $D = \sqrt{4S_{\phi} / (q\pi)}$; из практических и экономических соображений D не бывает более 32 метров, а во вновь создаваемых системах – не более 9...14 м. Минимальное значение D ограничено необходимой пространственной избирательностью антенны для исключения помех от соседних искусственных спутников Земли и обычно для систем фиксированной спутниковой службы должно быть не менее 1,5...7 м в С-диапазоне и 0,9...9 м в Ku-диапазоне. Таким образом, разработчик системы выбирает D в указанных пределах, после чего определяет по (2), (3) $(P_c/P_{uw})_{dw}$ и, исходя из указанных выше необходимых значений этой величины, выбирает кратность модуляции и скорость передачи информации в стволе.

Выбранное значение D должно также удовлетворять энергетическим требованиям для линии Земля-Космос. Отношение $(P_c/P_{uw})_{up}$ на входе приемника космической станции должно быть выше определенного нами ранее отношения $(P_c/P_{uw})_{up}$ на входе приемника земной станции. Если же это условие при приемлемой мощности передатчика не выполняется, то необходимо рассчитать результирующее отношение (P_c/P_{uw}) на входе приемника земной станции с учетом вклада линии вверх и после этого скорректировать оценку скорости R передачи информации в стволе либо увеличить D .

Если для уменьшения мощности передатчика земной станции, упрощения оборудования земной станции и исключения взаимной синхронизации сигналов земной станции принимается решение о применении частотного многостанционного доступа, то оценка емкости ствола $R_{cm\phi}$ должна быть еще снижена на 2...5 дБ. Оценив $R_{cm\phi}$ и сопоставив ее с необходимой (заданной) суммарной емкостью системы связи на всех направлениях связи R_{Σ} , найдем необходимое число стволов на спутниках проектируемой сети:

$$n_{ств} = R_{\Sigma} / R_{ств}. \quad (6)$$

Расчет пропускной способности спутниковой сети связи

1. *Распределение мощности усилителя ретранслятора между лучами*

Рассмотрим сеть спутниковой связи, состоящую из спутника-ретранслятора и N_{zc} земных станций, осуществляющих связь через четыре луча спутника-ретранслятора.

Обозначим число частотных каналов в j -м луче как N_{zcj} .

Обозначим часть мощности, излучаемой спутником-ретранслятором, от-

водимую j -му лучу β_j . Из правила нормировки следует, что $\sum_{j=1}^4 \beta_j = 1$.

Как уже было показано, отношение сигнал-шум на входе приемника космической станции для i -го канала равно:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{up\ i} = P_{npd\ зс\ i} \cdot \frac{\lambda_1^2 G_{npd\ зс} G_{nрм\ кс} \eta_{npd\ зс} \eta_{nрм\ кс}}{16\pi^2 d_1^2 L_{дон\ up} kT\Delta f}, \quad (7)$$

где Δf – ширина полосы частот канала.

Пусть $P_{cp} = P_{пик}/H^2$ – средняя мощность сигнала, излучаемого ретранслятором; $P_{пик}$ – пиковая мощность сигнала ретранслятора; H – пикфактор; α_i – доля мощности ретранслятора, отводимая i -му каналу:

$$\alpha_i = \frac{P_i^*}{\sum_{i=1}^{N_{зс}} P_i^*}, \quad (8)$$

где P_i^* – мощность i -го сигнала на входе усилителя ретранслятора после аттенюатора; $\sum_{i=1}^{N_{зс}} P_i^* = P_{вх}$ – мощность сигнала на входе усилителя ретранслятора.

Тогда отношение сигнал-шум на входе приемника земной станции для i -го канала равно:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{dw\ i} = \alpha_i P_{cp} \cdot \frac{\lambda_2^2 G_{npd\ кс} G_{nрм\ зс} \eta_{npd\ кс} \eta_{nрм\ зс}}{16\pi^2 d_2^2 L_{дон\ dw} kT\Delta f} \quad (9)$$

Обозначим $K_{npd} = P_{cp}/P_{вх}$ – коэффициент передачи усилителя ретранслятора по мощности. Полное отношение сигнал/шум для всей линии будет равно:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{total\ i} = \frac{1}{\frac{1}{(P_c/P_{ш})_{up\ i}} + \frac{J}{K_{npd} P_i^*} + \frac{1}{(P_c/P_{ш})_{dw\ i}}}, \quad (10)$$

где $J = N_{\ominus} \Delta f$ – мощность перекрестных помех.

Поскольку $K_{npd} P_i^* = \alpha_i P_{cp}$, то последнее выражение примет вид:

$$\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{total\ i} = \frac{1}{\frac{1}{(P_c/P_{ш})_{up\ i}} + \frac{N_{\ominus} \Delta f}{\alpha_i P_{cp}} + \frac{1}{(P_c/P_{ш})_{dw\ i}}}, \quad (11)$$

где спектральная плотность N_{\ominus} перекрестных помех задается формулой:

$$N_{\text{э}} = \left(\frac{P_{\text{ex}}}{N_{\text{зс}} \Delta f} + N_{\text{up}} \right) \cdot \left(2e^{\frac{H^2}{2}} (1 - F(H))^2 (H^2 + 1) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} (H(1 - F(H))) \right), \quad (12)$$

где $N_{\text{up}} = 4K \cdot T_{\text{Б}} \cdot \Delta f$ – односторонняя спектральная плотность мощности аддитивного белого гауссовского шума на линии вверх;

$$F(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^H e^{-t^2/2} dt \quad (13)$$

– гауссов интеграл.

Обозначим в формуле (9) для i -го канала:

$$A_i = \left(\frac{\lambda_2^2 G_{\text{нрпд кс}} G_{\text{нрм зс}} \eta_{\text{нрпд кс}} \eta_{\text{нрм зс}}}{16\pi^2 d_2^2 L_{\text{дон}} dw kT \Delta f} \right)_i.$$

Тогда (9) запишется в виде:

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{и}}} \right)_{dw \ i} = A_i \alpha_i P_{\text{ср}}, \quad (14)$$

Соотношение (11) примет вид:

$$\left(\frac{P_c}{P_{\text{и}}} \right)_{\text{total } i} = \frac{1}{\frac{1}{(P_c / P_{\text{и}})_{\text{up } i}} + \frac{J}{\alpha_i P_{\text{ср}}} + \frac{1}{A_i \alpha_i P_{\text{ср}}}}. \quad (15)$$

Отсюда:

$$\alpha_i = \frac{J + \frac{1}{A_i}}{P_{\text{ср}} \left(\frac{1}{(P_c / P_{\text{и}})_{\text{total } i}} + \frac{1}{(P_c / P_{\text{и}})_{\text{up } i}} \right)}. \quad (16)$$

При заданной приемной и передающей наземной антенне и антенно-фидерном тракте спутника-ретранслятора ($(P_c / P_{\text{и}})_{\text{total } i}$, $(P_c / P_{\text{и}})_{\text{up } i}$, A_i) и задаваясь пикфактором H в диапазоне от ∞ до 1 ($P_{\text{ср}}$ и J) можно рассчитать необходимую долю α_i мощности ретранслятора для i -го канала при заданном пикфакторе H для обеспечения необходимой достоверности передачи информации. При этом необходимо следить за выполнением условия: $S = \sum_{i=1}^{N_{\text{зс}}} \alpha_i \leq 1$.

Если это условие не выполняется, то необходимо уменьшить значение H . Если условие не выполняется ни при каких значениях H из диапазона от ∞ до 1, значит, данная система не может обеспечить заданный уровень функционирования.

Если $S < 1$, то ресурсы СР используются не полностью. Так как спутник – ретранслятор не может при заданном H излучать мощность меньшую P_{cp} , то для i -го канала отводится рабочая доля мощности $\gamma_i = \alpha_i/S$. При этом возникает запас по отношению сигнал/шум $\Delta(P_c/P_{ш})_i$, определяемый по формуле, аналогичной (15):

$$\Delta\left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_i = \frac{1}{\frac{1}{(P_c/P_{ш})_{ур\ i}} + \frac{J}{\gamma_i P_{cp}} + \frac{1}{A_i \gamma_i P_{cp}}} - \left(\frac{P_c}{P_{ш}}\right)_{total\ i}. \quad (17)$$

Доля мощности спутника-ретранслятора, отводимая j -му лучу:

$$\beta_j = \sum_{i \in j} \gamma_i. \quad (18)$$

2. Расчет пропускной способности сети спутниковой связи с архитектурой «центральная звезда»

Рассмотрим расчет пропускной способности следующей сети спутниковой связи:

- связь между абонентами сети осуществляется только через центральную земную станцию;
- ретрансляция сигналов земных станций осуществляется через линейный бортовой ретранслятор космической станции с автоматической регулировкой усиления;
- через коммутируемые стволы космической станции одновременно ретранслируются сигналы от центральной земной станции и абонентских земных станций.

Расчет производится по следующим основным расчетным формулам:

$$(P_c/P_{ш})_1 = P_{c\ вх.азс} / (P_{ш\ азс} + P_{ш\ кс} + P_{помех}); \quad (19)$$

$$(P_c/P_{ш})_2 = P_{c\ вх.цзс} / (P_{ш\ цзс} + P_{ш\ кс} + P_{помех}), \quad (20)$$

где $(P_c/P_{ш})_1$ – отношение сигнал/шум по входу демодулятора абонентских земных станций, $(P_c/P_{ш})_2$ – отношение сигнал/шум по входу демодулятора центральной земной станции, $P_{ш\ кс}$ – шум космической станции на входе абонентских земных станций и центральной земной станции, $P_{помех}$ – помеха на входе абонентских земных станций и центральной земной станции от других систем.

Величины $P_{c\ вх.азс}$ и $P_{c\ вх.цзс}$ определяются для участка радиолинии Космос-Земля следующими соотношениями:

$$P_{c\ вх\ азс} = PG_1 \frac{S_{эф\ азс}}{4\pi d^2 L_{дон\ dw}}, \quad (21)$$

$$P_{c\ вх\ цзс} = PG_2 \frac{S_{эф\ цзс}}{4\pi d^2 L_{дон\ dw}}, \quad (22)$$

где PG_1 и PG_2 – парциальные ЭИИМ космической станции в направлении

абонентских земных станций и центральной земной станции соответственно; $S_{эф.цзс}$ и $S_{эф.азс}$ – эффективные площади антенн абонентских земных станций и центральной земной станции соответственно; $L_{дон\ dw}$ – потери сигнала в атмосфере, потери сигнала за счет наведения антенн, поляризационные потери, потери из-за технической реализации и др.; d – дальность.

Величины PG_1 и PG_2 зависят от мощности сигналов на входе космической станции от абонентских земных станций и центральной земной станции, количества каналов, а также от собственных шумов космической станции и помех на входе:

$$PG_1 = PG_{кc} \frac{P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс}}{N_1 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс} + N_2 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс} + P_{ш\ кс} + P_n}; \quad (23)$$

$$PG_2 = PG_{кc} \frac{P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс}}{N_1 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс} + N_2 \cdot P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс} + P_{ш\ кс} + P_n}, \quad (24)$$

где $G_{кc}$ – ЭИИМ ствола космической станции; N_2, N_1 – количество частотных каналов центральной земной станции или количество работающих абонентских земных станций соответственно; $P_{ш\ кс}$ – собственные шумы космической станции; P_n – мощность помехи на входе космической станции.

Величины $P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс}$ и $P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс}$ определяются для участка радиолинии Земля-Космос:

$$P_{с\ вх.\ кс\ от\ цзс} = PG_{цзс} \cdot S_{эф.кc} / (4\pi d^2 L_{дон\ up}), \quad (25)$$

$$P_{с\ вх.\ кс\ от\ азс} = PG_{мст} \cdot S_{эф.кc} / (4\pi d^2 L_{дон\ up}), \quad (26)$$

где $PG_{цзс}$ и $PG_{азс}$ – ЭИИМ абонентских земных станций и центральной земной станции соответственно; $S_{эф.кc}$ – эффективная площадь антенны КС по лучу; $L_{дон\ dw}$ – потери сигнала в атмосфере, потери наведения, поляризационные и др. потери.

Отметим, что суммарные энергетические потери на линии «вверх» в Ku – диапазоне составят приблизительно $L_{дон\ up} = 6$ дБ, на линии вниз $L_{дон\ dw} = 6.5$ дБ.

Суммарное приращение шумовой температуры на линии «вверх» в Ku – диапазоне составит 350К, на линии «вниз» 80К.

В статье рассмотрен простейший случай. На самом деле, сеть спутниковой связи, состоящая из большого числа земных станций, имеет в своем составе земные станции, связанные и по технологии DAMA (для телефонии), и по технологии РАМА (например, для связи центральной земной станции и узловой земной станции), и по технологии TDM/TDMA (региональные сети передачи данных), не говоря уже о доступе в Интернет по технологии DVB-RSC и т.п. Поэтому, в общем случае, расчет пропускной способности сети спутниковой связи представляет собой довольно сложную задачу, которая решается статистическими методами.

Выводы

Пропускная способность сети определяется не только ее архитектурой и количеством каналов связи в ней и типами этих каналов, но и качеством информационных каналов, а также возможностями коммутации, пропускной способностью и механиз-

мами перераспределения ресурсов космической станции и земной станции.

В решении основной проблемы современности – предотвращении и снижении ущерба от происходящих стихийных природных бедствий и техногенных катастроф – система глобального мониторинга с КА на ГСО может сыграть важную роль в случае минимизации ресурсных затрат и доступа к информации всех заинтересованных организаций в рамках международной программы.

Литература

1. Кантор Л.Я., Тимофеев В.В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. М.: Радио и связь, 1988. 168 с.
2. Меньшикова Л.В. Особенности контроля радиочастотного спектра территориально распределенной системы // Полет. 2005. № 9. с. 3-41.
3. Меньшикова Л.В. Спутниковая связь-2006: итоги и перспективы // Технологии и средства связи. 2006. № 6. с. 67.
4. Найденова Д.М., Меньшиков В.А. Роль космодрома Байконур в освоении космического пространства // Научно-технический журнал «Вестник «НПО «ТЕХНОМАШ»». 2020. № 3. с. 3-16.
5. Найденова Д.М. Тезисы к докладу «Космос и безопасность человечества» / XVI молодежные Циолковские чтения. Секция «Географические информационные технологии и дистанционное зондирование Земли» / Правительство Кировской области, Кировское областное государственное бюджетное учреждение культуры «Музей К.Э. Циолковского, авиации и космонавтики». Кировская область, г. Киров, 2021. с. 81.