

Белоконов И.В., Куприянов В.И.

ПРОБЛЕМА МАРШРУТИЗАЦИИ В СПУТНИКОВЫХ СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ПАКЕТНЫХ ДАННЫХ И СПОСОБЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Развитие современных средств цифровой спутниковой связи привело к появлению множества новых технологий для решения проблемы "последней мили" информационного обслуживания подвижных пользователей, которые могут быть распределены на большом пространстве на поверхности Земли, в атмосфере и ближнем космосе. Системы спутниковой связи обеспечивают глобальное покрытие территории Земли, обладают естественными возможностями ширококвещания, предоставляют пользователям полосу пропускания спутникового ретранслятора по требованию и поддерживают их мобильность. Сочетание всех этих характеристик делает спутниковую связь перспективным кандидатом на роль транспортной сети, обеспечивающей интегрированный доступ к различным ресурсам цифровой связи. Применение цифровых линий связи позволяет использовать преимущества пакетной передачи данных, разбивая сообщения на множество мелких пакетов, передаваемых индивидуально и собираемых вновь воедино только в конечной точке.

Передвижение информации от источника к пункту назначения через сеть называется маршрутизацией (routing). Маршрутизация включает в себя два основных компонента: определение оптимального маршрута следования пакета и непосредственная передача пакетов через сеть (коммутация). Цель маршрутизации - доставка пакетов по назначению с максимальной эффективностью, которая часто характеризуется взвешенной суммой времен доставки сообщений при ограничении снизу на вероятность доставки. Маршрутизация сводится к определению направлений движения пакетов в маршрутизаторах (router). Выбор в маршрутизаторе одного из возможных направлений зависит от текущей топологии сети (она может меняться хотя бы из-за временного выхода некоторых узлов из строя), длин очередей в узлах коммутации, интенсивности входных потоков и т.п.

В настоящей статье проводится обзор направлений и проблем маршрутизации пакетных данных в спутниковой сети связи, представляющей комбинацию магистральной сети и сети доступа.

1. Сравнительные характеристики спутниковых систем связи

Спутники связи можно позиционировать на орбитах различной высоты и формы (круговая или эллиптическая). По высоте орбиты спутниковые группировки разделяются на три категории: низкоорбитальные (*LEO – Low Earth Orbit*), средневысотные (*MEO – Medium Earth Orbit*), геостационарные (*GEO – Geostationary Earth Orbit*). Сравнительные характеристики некоторых спутниковых сетей связи приведены в табл. 1 [1-6].

Таблица 1. Подвижные сети спутниковой связи для передачи данных

| Система | Скорость передачи данных (Кбит/с) | | Высота орбиты, км | Число спутников | Маршрутизация | Задержка, с |
|-------------------|-----------------------------------|--------|-------------------|-----------------|----------------|-------------|
| | вверх | вниз | | | | |
| Iridium Satellite | 2,4 | 2,4 | 780 (LEO) | 66 | межспутниковая | 0,1 |
| Globalstar | 9,6 | 9,6 | 1410 (LEO) | 48 | наземная | 0,1 |
| Orbcomm | 2,4 | 9,6 | 820 (LEO) | 88 | наземные | 400 |
| Leo One | 9,6 | 24 | 950 (LEO) | 48 | наземная | 60 |
| New Ico | 64 | 64 | 10 390 (MEO) | 10 | межспутниковая | 0,2 |
| Skybridge | 2000 | 20 000 | 1469 (LEO) | 80 | наземная | 0,1 |
| Teledesic | 2000 | 64 000 | 1350 (LEO) | 288 | межспутниковая | 0,1 |

К недостаткам сетей связи, построенных на геостационарной орбите, относятся:

- высокий риск возникновения взаимных радиопомех из-за высокой плотности заполнения спутниками геостационарной орбиты;
- большие задержки в передаче данных;
- сильное затухание радиосигнала, что требует использования передатчиков большой мощности;
- ухудшение условий приема сигналов при увеличении географической широты абонента (приполярные области находятся вне зоны уверенного сигнала);
- высокая стоимость вывода спутника на орбиту.

К недостаткам низкоорбитальных сетей связи следует отнести:

- большое число спутников, необходимое для полного покрытия поверхности Земли зонами уверенного приема;

- короткое нахождение абонента в зоне уверенного приема-передачи сигнала с одного спутника, что усложняет маршрутизацию;
- большая нагрузка на наземные центры функционирования спутниковой сети;
- сложность в организации процесса передачи данных от абонента к абоненту.

Функциональные возможности спутниковой системы связи определяет его бортовое оборудование, которое должно быть максимально простым и надежным. По этой причине большинство спутников связи до сих пор представляют собой простые ретрансляторы сигналов без какой-либо обработки (сигналов или информации) на борту. Перспективным является реализация на борту процессов демодуляции/модуляции и декодирования/кодирования сигналов, коммутации лучей, а также коммутации и поиска оптимальных маршрутов передаваемых данных. Широкое применение межспутниковых линий связи (InterSatellite Link — ISL), соединяющих два спутника между собой, и использование бортового оборудования, обеспечивающего межспутниковую маршрутизацию, позволяет построить полностью автономную и полносвязную спутниковую сеть.

Возможность использования нескольких типов орбит, разных способов обработки на борту и межспутниковых линий связи объективно приводит к разнообразию вариантов организации доступа к сетевым ресурсам. Спутниковая сеть может функционировать как высокоскоростная магистральная сеть и как сеть высокоскоростного доступа или совмещать обе эти функции. В последнем случае полносвязная сеть может обеспечить высокую гибкость в перераспределении передаваемых потоков информации

2. Показатели эффективности маршрутизации и требования, предъявляемые к алгоритмам маршрутизации

Метод маршрутизации одиночных сообщений в корпоративной сети определяется тремя основными составляющими:

- территориальным расположением различных устройств;
- алгоритмом изменения маршрутной матрицы;
- алгоритмом выбора маршрута.

Основными функциями устройств маршрутизации являются: получение маршрутной информации; сбор маршрутной информации; принятие решений о выборе маршрутов; непосредственно маршрутизация сообщений.

Маршрутизация может характеризоваться следующими показателями [7-10]:

длиной маршрута; надежностью передачи данных; задержкой передачи данных; шириной полосы пропускания канала; нагрузкой маршрутизатора; стоимостью связи.

Длина маршрута является наиболее общим показателем маршрутизации. Некоторые протоколы маршрутизации позволяют администраторам сети назначать произвольные цены на каждый канал сети. В этом случае длиной тракта является сумма расходов, связанных с каждым пройденным каналом. Другие протоколы маршрутизации определяют "количество пересылок", т.е. показатель, характеризующий число проходов, которые пакет должен совершить на пути от источника до пункта назначения через узлы объединения сетей.

Надежность канала передачи данных, определяется количеством передаваемой информации в битах до появления ошибки. Оценки надежности обычно назначаются каналам сети администраторами сети.

Задержка передачи данных - это отрезок времени, необходимый для передвижения пакета от отправителя до пункта назначения через объединенную сеть. Задержка зависит от многих факторов, включая полосу пропускания промежуточных каналов сети, очереди в порт каждого маршрутизатора на пути передвижения пакета, перегруженность сети на всех промежуточных каналах сети и физического расстояния, на которое необходимо переместить пакет. Поэтому задержка маршрутизации является важным интегральным показателем.

Полоса пропускания является оценкой максимально достижимой пропускной способности канала. Однако, маршруты, проходящие через каналы с большей полосой пропускания, не обязательно будут лучше маршрутов, проходящих через менее быстродействующие каналы. Например, если более быстродействующий канал почти все время занят, то фактическое время, необходимое для отправки пакета в пункт назначения, для этого быстродействующего канала может оказаться больше.

Нагрузка маршрутизатора характеризует его степень занятости. Нагрузка может быть вычислена разнообразными способами, в том числе по коэффициенту использования главного процессора и числу пакетов, обработанных в секунду. Постоянный контроль этих параметров может привести к интенсивному расходованию ресурсов.

Стоимость связи, характеризующая операционные расходы, является важнейшим показателем при осуществлении экономико-стоимостного анализа маршрутизации.

Требования, предъявляемые к алгоритмам маршрутизации:

оптимальность, которая характеризует способность алгоритма маршрутизации выбирать "наилучший" маршрут, зависящий от принятого критерия оптимальности. Например, алгоритм маршрутизации может использовать несколько пересылок с определенной задерж-

кой, но при расчете "вес" задержки может быть им оценен как очень значительный. Естественно, что протоколы маршрутизации должны строго определять свои алгоритмы расчета показателей;

простота и низкие непроизводительные затраты, то есть алгоритм маршрутизации должен эффективно обеспечивать свои функциональные возможности с минимальными затратами программного обеспечения и коэффициентом использования;

живучесть и стабильность, то есть способность функционировать в случае неординарных или непредвиденных обстоятельств, таких как отказы аппаратуры, условия высокой нагрузки и некорректные реализации;

быстрая сходимость, под которой понимается достижение соглашения между всеми маршрутизаторами по выбору оптимального маршрута. Когда какое-нибудь событие в сети приводит к тому, что маршруты или отвергаются, или становятся доступными, маршрутизаторы рассылают сообщения об обновлении маршрутизации. Сообщения об обновлении маршрутизации стимулируют пересчет оптимальных маршрутов и, в конечном итоге, вынуждают все маршрутизаторы достигнуть соглашения по этим маршрутам. Алгоритмы маршрутизации, которые сходятся медленно, могут привести к образованию петель маршрутизации или выходу из строя сети;

гибкость, то есть возможность быстро адаптироваться к разнообразным обстоятельствам в сети, например, к изменениям полосы пропускания сети, размеров очереди к маршрутизатору, величины задержки сети и других переменных.

3. Классификация и краткая характеристика алгоритмов маршрутизации

Все алгоритмы маршрутизации включают процедуры измерения и оценивания параметров сети; принятия решения о рассылке служебной информации; расчета таблиц маршрутизации (ТМ); реализации принятых маршрутных решений. На работу результирующего протокола маршрутизации влияют конкретные задачи, которые решает разработчик алгоритма. Каждый алгоритм маршрутизации по-разному влияет на сеть и ресурсы маршрутизации и использует разнообразные показатели, которые влияют на расчет оптимальных маршрутов.

Алгоритмы маршрутизации могут быть классифицированы по следующим типам:

- *простые, статические и адаптивные*;
- *одномаршрутные или многомаршрутные*;
- *одноуровневые и иерархические*;

- с "интеллектом" в главной вычислительной машине (централизованные) или в маршрутизаторе (децентрализованные);
- одношаговые и многошаговые;
- внутридоменные и междоменные;
- разовые, групповые синхронные и групповые асинхронные;
- алгоритмы состояния канала и дистанционно-векторного типа.

К простым алгоритмам маршрутизации относятся случайная маршрутизация, когда прибывший пакет посылается в первом попавшемся направлении, кроме исходного, и лавинная маршрутизация, когда пакет посылается по всем возможным направлениям, кроме исходного.

Статические алгоритмы осуществляют маршрутизацию в соответствии со статическими таблицами маршрутизации, которые формируются администратором сети до начала маршрутизации. Алгоритмы, использующие статические маршруты, просты для разработки и хорошо работают в условиях, когда трафик сети относительно предсказуем, а схема сети относительно проста. Так как статические системы маршрутизации не могут реагировать на изменения в сети, то они, как правило, считаются непригодными для современных крупных, постоянно изменяющихся сетей.

Адаптивные алгоритмы маршрутизации подстраиваются к изменяющимся обстоятельствам сети в масштабе реального времени в соответствии с поступающими сообщениями об обновлении маршрутизации. Если в сообщении указывается, что имело место изменение сети, то программы маршрутизации пересчитывают маршруты и рассылают по сети новые сообщения о корректировке маршрутизации, стимулируя маршрутизаторы заново прогонять свои алгоритмы и соответствующим образом изменять таблицы маршрутизации. Динамические алгоритмы маршрутизации могут дополнять статические маршруты там, где это уместно. Например, можно разработать "маршрутизатор последнего обращения" (т.е. маршрутизатор, в который отсылаются все неотправленные по определенному маршруту пакеты). Такой маршрутизатор выполняет роль хранилища неотправленных пакетов, гарантируя, что все сообщения будут хотя бы определенным образом обработаны.

Многомаршрутные алгоритмы формируют множество маршрутов к одному и тому же пункту назначения, что делает возможным мультиплексную передачу трафика. Преимущества многомаршрутных алгоритмов по сравнению одномаршрутными заключаются в том, что они могут обеспечить значительно большую пропускную способность и надежность.

Одноуровневые алгоритмы оперируют в плоском пространстве, тогда как иерархические используют иерархическую структуру построения сети. В одноуровневой системе маршрутизации все маршрутизаторы равны по отношению друг к другу. В иерархической системе маршрутизации некоторые маршрутизаторы формируют то, что составляет базу (backbone) маршрутизации. Пакеты из внебазовых маршрутизаторов перемещаются к базовым маршрутизаторам и пропускаются через них до тех пор, пока не достигнут общей области пункта назначения. Начиная с этого момента, они перемещаются от последнего базового маршрутизатора через один или несколько внебазовых маршрутизаторов до конечного пункта назначения. Системы маршрутизации часто устанавливаются логические группы узлов, называемых доменами или автономными системами *AS (Autonomous System)* (рис. 1) или областями. В иерархических системах одни маршрутизаторы какого-либо домена могут общаться с маршрутизаторами других доменов, в то время как другие маршрутизаторы этого домена могут поддерживать связь с маршрутизаторами только в пределах своего домена. В очень крупных сетях могут существовать дополнительные иерархические уровни. Маршрутизаторы наивысшего иерархического уровня образуют базу маршрутизации. Основное преимущество иерархической маршрутизации проявляется, если большая часть сетевой связи имеет место в пределах групп небольших доменов. Внутридоменным маршрутизаторам необходимо знать только о других маршрутизаторах в пределах своего домена, поэтому их алгоритмы маршрутизации могут быть упрощенными. Соответственно может быть уменьшен и трафик обновления маршрутизации, зависящий от используемого алгоритма маршрутизации.

В таблицах маршрутизации для каждого адреса назначения указывается только следующий маршрутизатор, а не вся их цепочка от начального до конечного узла. В соответствии с этим подходом маршрутизация выполняется по распределенной схеме — каждый маршрутизатор отвечает за выбор только одного этапа пути, а окончательный маршрут складывается в результате работы всех маршрутизаторов, через которые проходит данный пакет. Такие алгоритмы маршрутизации называются одношаговыми

Существует и многошаговый подход — маршрутизация от источника (*Source Routing*). В соответствии с ним узел-источник указывает в отправляемом в сеть пакете полный маршрут его следования через все промежуточные маршрутизаторы. Такой способ не требует построения и анализа таблиц маршрутизации. Это ускоряет прохождение пакета по сети и разгружает маршрутизаторы, но при этом большая нагрузка ложится на конечные узлы.

Некоторые алгоритмы маршрутизации предполагают, что конечный узел источника определяет весь маршрут (маршрутизация от источника). В этих системах маршрутизаторы

действуют просто как устройства хранения и пересылки пакета к следующей остановке. При этом “интеллект” маршрутизации находится в главной вычислительной машине. Другие алгоритмы предполагают, что главные вычислительные машины ничего не знают о маршрутах. При использовании этих алгоритмов маршрутизаторы определяют маршрут через объединенную сеть, базируясь на своих собственных расчетах. В этом случае “интеллектом” маршрутизации наделены маршрутизаторы.

Компромисс между маршрутизацией с “интеллектом” в главной вычислительной машине и маршрутизацией с “интеллектом” в маршрутизаторе достигается путем сопоставления оптимальности маршрута с непроизводительными затратами трафика. Системы с “интеллектом” в главной вычислительной машине чаще выбирают наилучшие маршруты, т.к. они, как правило, находят все возможные маршруты к пункту назначения, прежде чем пакет будет действительно отослан. Затем они выбирают наилучший маршрут, основываясь на показателе оптимальности данной конкретной системы. Однако процедура определения всех маршрутов требует значительного объема времени.

Внутридоменные алгоритмы действуют только в пределах доменов; междоменные как в пределах доменов, так и между ними.

К разовым относятся алгоритмы, выполняющие коррекцию маршрутной матрицы после прихода в соответствующий узел каждого нового сообщения. Групповые осуществляют такое изменение после поступления некоторого определенного количества сообщений. Групповые синхронные методы производят изменение маршрутной матрицы в заранее определенные моменты времени. Групповые асинхронные методы осуществляют данную процедуру через нефиксированные временные интервалы.

В алгоритмах дистанционно-векторного типа (*Distance Vector Algorithm, DVA*), например, алгоритм Беллмана-Форда [11], каждый маршрутизатор периодически и всенаправлено рассылает по сети вектор, компонентами которого являются расстояния от данного маршрутизатора до всех известных ему сетей. Под расстоянием обычно понимается число транзитных узлов. Получив вектор от соседа, маршрутизатор пересчитывает таблицу и рассылает новое значение вектора по сети. В конце концов, каждый маршрутизатор узнает информацию обо всех сетях и о расстоянии до них через соседние маршрутизаторы. Этот подход реализован в современных протоколах RIP, IGRP, EIGRP.

Алгоритмы состояния каналов (*Link State Algorithm, LSA*), например, алгоритм Дейкстры [12], позволяют каждому маршрутизатору получить достаточную информацию для построения точного графа связей сети. Все маршрутизаторы работают на основании одинако-

вых графов, в результате процесс маршрутизации оказывается более устойчивым к изменениям конфигурации. Всенаправленная рассылка производится только при изменениях состояния связей, что в надежных сетях происходит не так часто.

Алгоритмы состояния каналов фактически направляют небольшие корректировки по всем направлениям, в то время как алгоритмы вектора расстояний отсылают более крупные корректировки только в соседние маршрутизаторы. Современные протоколы IS-IS, OSPF, NLSP используют этот подход.

Отличаясь более быстрой сходимостью, алгоритмы состояния каналов несколько меньше склонны к образованию петель маршрутизации, чем алгоритмы дистанционно-векторного типа. С другой стороны, алгоритмы состояния канала характеризуются более сложными расчетами в сравнении с алгоритмами дистанционно-векторного типа, требуя большей процессорной мощности и памяти, чем алгоритмы вектора расстояний. Вследствие этого, реализация и поддержка алгоритмов состояния канала может быть более дорогостоящей. Несмотря на их различия, оба типа алгоритмов хорошо функционируют при самых различных обстоятельствах.

Большинство известных алгоритмов маршрутизации в силу приоритета простоты использования построены на основе графовых методов и являются ограниченными в своем применении.

Алгоритм, основанный на *методе Дейкстры*, является неулучшаемым по числу операций для вычисления кратчайших маршрутов. Выходными данными для алгоритма являются веса каналов, оцениваемые узлами маршрутизации. Результатом работы алгоритма для каждого узла является таблица, в которой для каждого i -го узла получателя указан сосед, на который следует направить пакет, адресованный i -му узлу. Алгоритм является детерминированным и централизованным [12].

Выходными данными для *алгоритма Беллмана-Форда* являются также веса каналов. Результат работы алгоритма для каждого i -го узла - таблица размерности $n \times p$, где n - число узлов в сети, p - максимальная степень связности. Каждый элемент таблицы представляет собой вес кратчайшего маршрута к получателю j , если идти через k -го соседа. Имея такую таблицу, маршрутизацию можно проводить двумя способами: либо по кратчайшему маршруту (детерминировано), либо рандомизированно, т.е. направляя большую долю потока по направлениям с меньшими весами и меньшую - по направлениям с большими весам [11]. Интересной практической реализацией подобного метода маршрутизации является метод, применяемый в сети DECNET. Вес каналов в сети DECNET - целое число от 1 до 25, определяю-

щие характеристики аппаратуры и каналов связи (пропускную способность, частоту ошибок). Узлы обмениваются маршрутной информацией либо периодически, либо когда в сети выходят из строя или добавляются узлы и каналы, и изменяется цена пути. Алгоритм является децентрализованным [13].

Необходимо также выделить ряд методов, основывающихся на строгих математических решениях (например, на дискретном принципе максимума Понтрягина), но практически мало используемых из-за сложности реализации.

К ним относятся *метод Шварца* [14], *метод Галлагера* [13,15], *метод Сегалла* [16-18] и обобщающий их *метод динамического управления сетью* [19,20], который непосредственно и использует дискретный принцип оптимальности Беллмана.

Метод Шварца состоит в выборе канальных потоков (бит/сек), минимизирующих суммарное время задержки для всей сети. При этом применяется метод градиентного спуска. Метод носит централизованный характер. Входными данными, которые необходимо измерять на сети, для него являются входные потоки (их интенсивности) для каждого узла по каждому получателю.

Метод Галлагера работает с использованием так называемых маргинальных или приращенных задержек (мера градиента целевой функции) - поэтому учитывается влияние выбора маршрута в данный момент на состояние сети в будущем. Маршрутизация производится рандомизированно. Алгоритм децентрализованный, итеративный. На каждой итерации каждый узел посылает своим соседям маргинальные задержки. Все входные потоки в сеть считаются стационарными

Метод Сегалла является модификацией метода Галлагера для нестационарного случая.

4. Маршрутизация в спутниковых сетях связи

Маршрутизация трафика особенно сложна и важна в сетях спутниковой связи на основе низкоорбитальных спутников с межспутниковыми линиями связи. Главная сложность ее связана с высокой динамичностью таких сетей, обусловленной быстрым перемещением спутников относительно друг друга и относительно Земли. В результате популярные протоколы маршрутизации, реализованные в наземных сетях, здесь абсолютно неприемлемы. Высокая динамичность подразумевает использование динамических алгоритмов, а поскольку физические длины маршрутов (расстояния между спутниками) велики, то это оказывает существенное влияние на время прохождения данных и, соответственно, на общую задержку.

Для таких сетей спутниковой связи предложено несколько решений, из которых наиболее известны два основных алгоритма спутниковой маршрутизации — *DT-DVTR* и *VN*.

Алгоритм DT-DVTR (Discrete-Time Dynamic Virtual Topology Routing) [21] основан на периодическом характере изменений в орбитальной группировке. Вся шкала времени делится на интервалы стационарности, определяемые таким образом, что топология меняется только в начале и конце интервалов, оставаясь постоянной до начала следующего интервала. На длительности каждого такого интервала можно решать задачу статической маршрутизации уже известными методами. Результатом ее решения для каждого интервала является соответствующая таблица маршрутизации. Набор таблиц маршрутизации для всех возможных интервалов стационарности хранится на борту каждого спутника и каждая из них используется в соответствующем интервале. При таком подходе вместо проведения сложных вычислений в реальном масштабе времени спутник должен хранить многочисленные таблицы маршрутизации и, следовательно, обладать бортовой памятью большого объема. Для уменьшения требуемого объема памяти возможна организация обмена таблицами между соседними спутниками [6].

Главная идея алгоритма VN (Virtual Node) [22] состоит в том, чтобы спрятать от протокола маршрутизации топологические изменения. Для этого вводится виртуальная топология, которая является суперпозицией виртуальных узлов и физической топологии орбитальной группировки. В течение определенного периода времени каждый виртуальный узел представляет собой определенный физический спутник, находящийся в заданной области. Пока он остается в ней, виртуальная топология считается неизменной. Как только спутник покидает ее, виртуальный узел соотносится с другим спутником, который вошел в эту область. Первый спутник передает второму всю необходимую для работы данного виртуального узла информацию. Задача маршрутизации решается уже над виртуальной топологией, и при передаче трафика протоколу маршрутизации не нужно отслеживать динамику орбитальной группировки.

На основе этих двух базовых алгоритмов разработано несколько конкретных схем переноса пакетов через низкоорбитальную сеть. Как правило, они основаны на алгоритме VN. В ряде коммерческих спутниковых сетей (включая проект сети Teledesic) используются собственные технологии маршрутизации, ориентированные на учет особенностей орбитальной группировки. Однако во всех этих решениях остается ряд проблем, связанных с практической реализацией алгоритмов маршрутизации, особенно при требовании обеспечения качества об-

служивания (QoS, quality of service), определению и заданию которой соответствуют параметры:

- *пропускная способность*, включающая среднюю, максимальную (пиковую) и минимальную скорости передачи данных;
- *задержки* - средняя и максимальная величина задержек, а также среднее и максимальное значения вариаций задержек, то есть отклонений межпакетных интервалов в прибывающем трафике по сравнению с отправленным;
- *надежность передачи* - процент потерянных пакетов, а также процент искаженных пакетов.

Для коммутации трафика внутри сети в относительно большом числе проектов (Cyberstar, Astrolink, Spaceway, Skyway) предполагается применение технологии ATM (Asynchronous Transfer Mode) в качестве базовой [23].

В частности, существует ATM-версия алгоритма DT-DVTR, согласно которой каждая пара соседних спутников сгруппирована в виртуальный путь VPC (Virtual Path Connection), и бортовой процессор работает уже исходя из меток этого VPC. При этом предполагается применение специфичных для спутниковой сети протоколов сигнализации и передачи данных канального уровня.

Разработчики, производители и операторы спутниковых сетей делают все возможное, чтобы в их сетях были реализованы наиболее эффективные протоколы маршрутизации. В то

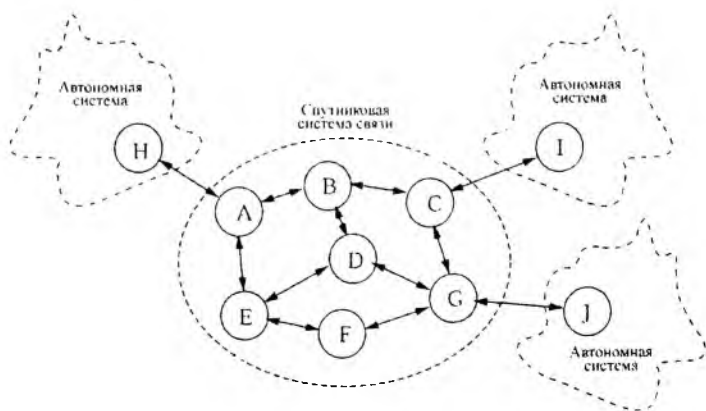


Рис. 1. Автономные системы

же время детали реализации спутниковой сети должны быть скрыты от наземных сетей. Для изоляции специфичных сетей широко используется концепция автономной системы AS (рис.1). Согласно ей, для маршрутизации трафика между AS применяются несколько стандартных протоколов, в то время как внутри каждой AS для передачи трафика может быть использован свой собственный уникальный протокол маршрутизации.

Спутниковую сеть можно считать отдельной автономной системой с рядом граничных шлюзов BG (Border Gateway), реализующих внешний протокол маршрутизации BGP (Border Gateway Protocol), который принят в наземных сетях. Входной граничный шлюз определяет выходной граничный шлюз для каждого пакета, передаваемого через спутниковую AS. При необходимости входной и выходной шлюзы осуществляют преобразование адресов и инкапсуляцию/декапсуляцию пакетов. Граничные шлюзы можно реализовать как на борту, так и в составе земных станций. В первом случае требования к вычислительным ресурсам и энергетике спутника могут оказаться чрезмерными.

5. Характеристика проблемы построения модели маршрутизации

В целом проблема маршрутизации решается каждый раз практически с нуля, и анализ эффективности функционирования спутниковой сети связи невозможен без сравнительной оценки применяемых методов маршрутизации. Это подразумевает определение имитационной модели маршрутизации для особенностей низкоорбитальной спутниковой сети связи [25]. В качестве конечного уровня детализации и желательной степени адекватности модели логично в ее составе рассматривать спутник как движущееся по физическим законам устройство маршрутизации и рассматривать каналы передачи информации с учетом характера этого движения. К основным параметрам модели маршрутизации относятся:

- типы информационных потоков (пользовательский или служебный, значение приоритета передачи, размер одной единицы информации, максимальное время жизни пакета);
- параметры каналов связи (тип канала, скорость и задержка передачи пакетов, вероятность сбоя при передаче пакета на единичной длине, размер служебной части пакета);
- параметры сегментов сети (распределение времени генерации пакетов и количество информационных единиц в одном пакете);
- используемые методы управления объемом информационных потоков (управление объемом поступающих и транзитных потоков, управление началом сеанса связи, управление объемом потоков на линиях связи);

- используемый метод маршрутизации (тип метода; метрические параметры; интервалы времени действия маршрутов, проверки маршрутизатором своих соседей, синхронизации маршрутных матриц, интервалы времени распределения скорости и задержки обработки информации различных типов);
- параметры движения спутников и их связность;
- правила управления каналами связи и связностью спутников с наземных терминалов.

Структурная компонента модели

характеризуется как открытая сеть массового обслуживания (СеМО) [26]. Фрагмент СеМО, соответствующий дуплексному каналу связи, приведен на рис.2, а устройству маршрутизации на рис.3.

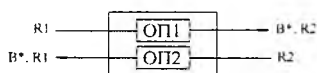


Рис. 2. Фрагмент СеМО, соответствующий дуплексному каналу связи

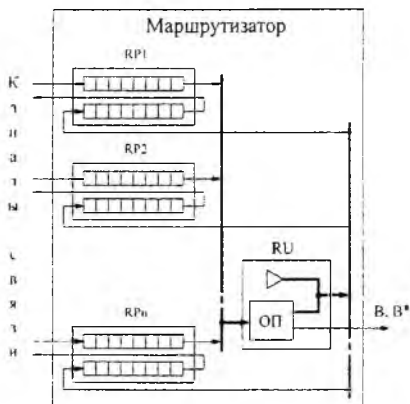


Рис. 3. Фрагмент СеМО, соответствующий маршрутизатору

- ОП, ОП1, ОП2 – обслуживающий прибор;
- R1, R2 – маршрутизаторы,
- В и В* – успешное и неуспешное окончание передачи пакета;
- RU и RP_i – функциональный блок и порты входа/выхода маршрутизатора.

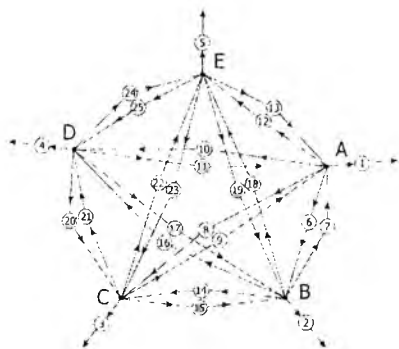


Рис. 4 Представление в виде СеМО
Числам соответствуют симплексные каналы связи, буквам – маршрутизаторы

Сеть связи представима в виде СеМО следующим образом (рис. 4):

- каждый канал, связывающий узлы коммутации, является дуплексным, то есть определяется парой одноканальных СМО (систем массового обслу-

живания);

выходной канал, связывающий узел с его локальной сетью, изображается одноканальной СМО.

Основными *поведенческими* компонентами в работе сети являются передача пакетов и изменение маршрутных матриц в соответствии с пространственным расположением спутников связи и их смежностью.

В соответствии с распределениями времен генерации и длины, абонентские пакеты каждого типа информационных потоков добавляются во входную очередь маршрутизатора. Маршрутизация пакетов происходит в порядке их приоритета по заданному закону и состоит в задании пакету приоритетного списка направлений передачи. Далее пакет попадает в выходную очередь маршрутизатора и производится попытка передачи в каналы связи всех находящихся в ней пакетов в соответствии с их приоритетом. Для каждого из них производится проверка истечения лимита времени нахождения в сети. Низкоприоритетные пакеты теряются при переполнении очередей.

При передаче пакета по каналу связи производится проверка на отсутствие ошибок. В случае возникновения искажений пакет передается обратно в выходную очередь маршрутизатора-отправителя. Если пакет передан правильно, то он попадает во входную очередь следующего маршрутизатора. Далее процесс повторяется до обработки пакета маршрутизатором, находящимся в одной локальной сети с абонентом-получателем.

Выводы

Задача маршрутизации в спутниковой системе связи является сложной многопараметрической задачей, существенной отличающейся от маршрутизации в стационарных сетях. Для ее решения необходимо разработать адекватную математическую модель, которая позволит выполнить сравнительный анализ существующих алгоритмов маршрутизации и выбрать из них наиболее эффективные, и провести ее структурную и параметрическую оптимизацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Yongguang Zhang (ed.). *Internetworking and Computing over Satellite Networks*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Hardbound, ISBN 1-4020-7424-7, April 2003.

2. Yurong Hu and Victor O. K. Li, the University of Hong Kong: *Satellite-Based Internet: A Tutorial*. *Satellite-Based Internet Technology and Services*, IEEE Communications Magazine, vol. 39, no. 3, March 2001, pp. 154 - 162
3. J. G. Walker. *Satellite Constellations*. J. Brit. Interplanetary Soc., vol. 37, 1984, pp. 559–71.
4. Bruce R. Elbert, *The Satellite Communication applications handbook*, 1997 Artech House.
5. Энди Дорнан, *Последние пятьсот миль*. Журнал сетевых решений/LAN №05/2001.
6. *Lloyd's satellite constellation* <http://www.sat-net.com/L.Wood/constellations/>
7. Лагутенко О.И. Спутниковый доступ в Интернет. Сети и системы связи, № 10 '2002
8. Тодд Леммл, Шон Одом, Кевин Уоллес, CCNP Маршрутизация. Учебное руководство. Издательство: Лори, ISBN 5-85582-167-6, 2002.
9. CISCO Internetworking Technology Overview. <http://www.mark-itt.ru/CISCO/ИТО/>
10. L. Wood et al., *IP Routing Issues in Satellite Constellation Networks*, Special Issue on Internet Protocols over Satellite, Int'l. J. Sat. Commun., vol. 19, no. 1, Jan./Feb. 2001, pp. 69–92..
11. Хизер Остерлох. Маршрутизация в IP-сетях. Принципы, протоколы, настройка. Издательство: ДиаСофт. Сентябрь 2002. ISBN 5-93772-051-2.
12. Анализ и синтез сетей связи с использованием ЭВМ, М., Наука, 1974.
13. Суздаев А.В. Сети передачи информации АСУ, М., Радио и связь. 1983.
14. Богуславский Л.Б. Управление потоками данных в сетях ЭВМ, М., Энергоатомиздат, 1984.
15. Schwartz, M., and Cheung, C., *The Gradient Projection Algorithm for Multiple Routing in Message-Switched Networks*, IEEE Trans. on Commun., 449-456 (1976).
16. R. Gallager. *A minimum delay routing algorithm using distributed computation*. IEEE Transactions on Computers, 23:73-85, 1977.
17. A. Segall *The modeling of adaptive routing in data communication networks*. IEEE Trans. Commun., vol. 25, pp. 85-95, January, 1977.
18. A. Segall *Optimal distributed routing for virtual line-switched data networks* IEEE Trans. Commun., 27:201-209, January 1979.
19. F. H. Moss and A. Segall. *An optimal control approach to dynamic routing in networks*. IEEE Transactions on Automatic Control, 27(2):329-339, 1982.
20. Амосов А.А., Коленченко А.М. Динамическое управление сетью, использующее дискретный принцип оптимальности Беллмана, в кн.: Адаптивные алгоритмы управления в сетях связи ЭВМ Совет по комплексной проблеме "Кибернетика" АН СССР, Куйбышевский госуниверситет, 1980, с.5-11.

21. Коленченко А.М., Исследование алгоритмов динамического управления распределением потоков по сети связи. Канд. дисс., ЛЭИС, 1982.
22. Markus Werner, *A Dynamic Routing Concept for ATM-Based Satellite Personal Communication Networks*, IEEE JSAC, vol. 15, no. 8, Oct. 1997.
23. R. Manger and C. Rosenberg, *QoS Guarantees for Multimedia Services on a TDMA-Based Satellite Network*, IEEE Commun. Mag., July 1997, pp. 56–65.
24. I. Mertzanis *et al.*, "Protocol Architectures for Satellite ATM Broadband Networks," *IEEE Commun. Mag.*, Mar. 1999, pp. 46–54.
25. Савельев А. Современные протоколы маршрутизации. Журнал сетевых решений/LAN №12/1998.
26. Денисов Е.А. Математическая модель маршрутизации пакетов в глобальной информационной сети. Вычислительные сети/Network journal, 2003г., №1(3)/5.2
27. Климов Г.П. Стохастические системы обслуживания. – М.: Наука, 1966.