

УДК 629.783

Е.С. Козелкова

Центральный научно-исследовательский институт навигации и управления, Киев

ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ МАРШРУТИЗАЦИИ В МНОГОСПУТНИКОВОЙ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Рассмотрен класс моделей, применяемых для анализа взаимодействия на сетевом уровне многоспутниковой низкоорбитальной системы.

поток информации, маршрутизация, многоспутниковая низкоорбитальная система

Введение

Постановка задачи. Среди общих вопросов построения многоспутниковой низкоорбитальной системы (МНС) важное место занимает задача управления на сетевом уровне и связанные с ней

процессы организации межспутниковых каналов, распределения информационных потоков и управления информацией.

Цель статьи. Обосновать модель маршрутизации в многоспутниковой низкоорбитальной системе дистанционного зондирования Земли двойного назначения.

Основная часть

Управление процессом обмена информацией в сети может быть разделено на управление интенсивностью передаваемых по сети информационных потоков и распределение этих потоков по сети.

Процедуры управления интенсивностью информационных потоков должны обеспечивать функционирование сети без перегрузок, за счет компромисса между временем доставки информации и ограничением трафика. При этом различают управление интенсивностью входящих в сеть потоков и потоков, формируемых узлами сети.

Распределение информационных потоков по сети осуществляется либо на основе управления структурой сети (характеристиками каналов), либо посредством управления путями (маршрутами) передачи информации по сети без изменения её структуры.

В общем случае управление процессом обмена информацией в сети может быть привязано к процедуре маршрутизации только при сравнительно небольших интенсивностях входящих в сеть информационных потоков. При увеличении этих интенсивностей возникает возможность перегрузки сети, вследствие чего появляется необходимость в ограничении потоков информации. Таким образом, методы и алгоритмы коммутации, маршрутизации и ограничения информационных потоков, реализуемые в протоколах сетевого и транспортного уровней, обеспечивают решение задачи управления процессом обмена информацией в МНС [3, 4].

Маршрут – это последовательность линий передачи, пройденных пакетом от источника к получателю информации [1, 3]. Установление маршрутов необходимо для эффективного использования существующих линий передачи. Тип маршрутизации должен быть определен в начале проектирования сети, поскольку от него зависит выбор методов управления сетью. Различают два класса методов маршрутизации: “волновые методы” и методы двухпунктной маршрутизации.

“Волновые методы” основаны на передаче пакета каждому узлу сети. Никаких попыток запоминать маршруты не предпринимается. Вместо этого узлы отслеживают лишь сам факт прохождения через них отдельных пакетов и принимают решения о том, следует ли передавать их дальше (обычно на основе того, проходил ли пакет ранее или нет). Главное достоинство “волновых методов” состоит в том, что они не требуют больших дополнительных затрат по аппаратному обеспечению узлов и позволяют применять простейшие схемы управления сетью. С другой стороны, поскольку каждый узел в сети принимает каждый пакет как минимум один раз, это приводит к неэффективному использованию сети. Поэтому “волновые методы” хороши там, где требуется высокая надежность доставки пакетов в условиях не точно известной связности, а также в случае быстрых ее изменений, при которых трудно

определять информацию для маршрутизации и распространять ее по сети [1, 3]. Для классификации методов двухпунктной маршрутизации, используемых в информационных сетях, применяют несколько подходов [3, 4]. Один из них состоит в разделении всех методов маршрутизации по признаку централизации управления на централизованные, распределенные (децентрализованные) и зонные.

Централизованные методы предполагают выбор маршрутов в центральном узле (ЦУ), а распределенные – в узлах сети. При этом узлы могут обмениваться друг с другом служебной информацией. Методы зонной маршрутизации основываются на разбиении всей сети на зоны и использовании в пределах каждой зоны и между ними своих методов маршрутизации. При использовании централизованных методов маршрутизации каждый узел сети передает сообщения о своем состоянии в ЦУ, который составляет глобальную картину состояния сети. На основе этих данных ЦУ может определить наилучшие маршруты распределения информационных потоков по сети. Сбор сообщений о состоянии сети и рассылка управляющих директив могут осуществляться синхронно или асинхронно. Если все узлы посылают свои сообщения и получают директивы от ЦУ через регулярные интервалы времени, то управление называется синхронным. Если эти действия выполняются в моменты времени, соответствующие изменению состояния узлов, то управление называется асинхронным.

Недостатком централизованных методов маршрутизации является появление значительного дополнительного служебного трафика. Кроме того, если динамика информационных потоков достаточно велика, то централизованное управление может оказаться неэффективным из-за запаздывания служебной информации, а выход из строя ЦУ приводит к потере управления всей сетью.

Для объединения достоинств централизованных и децентрализованных методов маршрутизации используют гибридные методы, характеризующиеся тем, что ЦУ следит за глобальной ситуацией, а остальные узлы оперативно реагируют на локальные изменения трафика и компонентов сети. При этом каждый узел может самостоятельно решать, по какому из разрешенных ЦУ альтернативных путей направить пакет с учетом текущей локальной обстановки.

Другая классификация методов маршрутизации основана на стабильности маршрута, в зависимости от интенсивности входных потоков. В статических (фиксированных) методах маршрутизации путь следования пакета не зависит от колебаний трафика. Он может меняться только в случае выхода из строя какого-либо узла или линии связи, т.е. при изменении топологии сети. Такой метод маршрутизации может быть рекомендован для очень простых сетей с невысокой пропускной способностью [6].

В динамических (адаптивных) методах маршрутизации путь от отправителя к получателю мо-

жет меняться в зависимости от трафика, т.е. маршруты зависят от конкретной ситуации в сети в некоторый момент (загрузки узлов сети, состояния каналов связи и т.д.) или от интенсивности и характера входных потоков.

Некоторое промежуточное положение между статическими и динамическими методами маршрутизации занимают квазистатические методы [2]. Если в статических методах маршрут каждого сообщения (пакета) известен заранее до его входа в сеть, а в динамических методах он заранее не известен и направление дальнейшей передачи в каждом узле выбирается исходя из текущей информации о состоянии сети, то в квазистатических методах совокупность локальных маршрутных таблиц каждого узла не фиксирована раз и навсегда, а меняется, хотя и относительно медленно, при изменении интенсивностей входных потоков.

По способу выбора конкретного маршрута из множества возможных маршрутов, различают методы с фиксированной маршрутизацией, когда выбирается единственный наилучший по отношению к выбранному критерию, маршрут, и методы маршрутизации с балансировкой, когда маршрут выбирается из группы допустимых по какому-либо правилу [4]. По информации, используемой для выбора маршрута, децентрализованные методы маршрутизации можно разделить на глобальные, локальные и точечные. Глобальные используют для выбора маршрута в каждом узле информацию о состоянии сети в целом, локальные – о состоянии узлов, входящих в локальное окружение данного узла, а точечные учитывают информацию о состоянии только данного узла.

Конкретный метод маршрутизации обычно реализуется в рамках протокола сетевого уровня. Он оказывает существенное влияние на две основные характеристики сети – производительность сети (количество обслуживания в единицу времени) и среднюю задержку информации в сети.

Методы и алгоритмы маршрутизации влияют на величину задержки информации и через неё на величину отвергнутой нагрузки, устанавливаемую алгоритмом управления потоком. То есть повышение эффективности маршрутизации уменьшает задержку информации, что дает возможность алгоритму управления потоками принимать в сеть больше трафика и увеличить производительность сети. При этом выбор рационального критерия эффективности маршрутизации является весьма важным, так как именно он позволяет объективно сравнить различные алгоритмы маршрутизации и провести их оптимизацию. Однако при выборе критерия эффективности приходится искать компромисс между практической ценностью получаемых с его использованием результатов и простотой построения математических моделей, позволяющих получать содержательные результаты в приемлемые сроки.

В качестве критерия эффективности маршрутизации часто используется среднее время доставки

пакета. Однако такой выбор чаще всего обусловлен относительной простотой построения математических моделей [2].

Более общей характеристикой является закон распределения времени доставки и его соответствующие параметры. Во многих случаях он позволяет более адекватно описать влияние метода маршрутизации на время доставки информации.

Другим подходом к данной проблеме является использование максимизации суммарной ценности доставляемых пакетов. При этом каждому пакету приписывается некоторая функция $C(t)$, зависящая от времени и известная на узле при решении задачи выбора маршрута. Значение данной функции равно тому вкладу в общий критерий, который вносят пакет, доставляемый за время t . Эту убывающую со временем функцию обычно называют функцией старения сообщений. Выбором необходимой функции старения можно добиться выполнения необходимых, с точки зрения пользователя, требований по доставке информации [2].

Необходимо отметить, что эффективность определенного метода маршрутизации зависит не только от принятого критерия эффективности и алгоритма реализации метода маршрутизации, но и от интенсивности и структуры входного потока, определяемых, в свою очередь, механизмом ограничения входной нагрузки сети.

Количественный учет факторов, связанных с перегрузкой сети, позволяет использовать модели сети, основанные на интенсивностях трафика. Это так называемые потоковые модели [2].

Потоковые модели основываются на применении среднего трафика, проходящего по линии связи. При этом под нагрузкой линии связи i -го узла с j -м понимается интенсивность трафика x_{ij} , называемого потоком, проходящего по линии (i,j) . Поток измеряется в единицах данных (бит, байт, пакет, сообщение и т.д.) в секунду. В потоковых моделях делается предположение, что статистика трафика, поступающего в сеть, не меняется во времени.

Для количественного описания эффективности сети в потоковых моделях используют стоимостную функцию

$$D = \sum_{(ij)} D_{ij}(x_{ij}), \quad (1)$$

где $D_{ij}(F)$ – некоторая монотонно возрастающая функция, часто определяемая следующим выражением

$$D_{ij}(F) = \frac{F}{c_{ij} - F} + d_{ij}F, \quad (2)$$

где c_{ij} – пропускная способность линии (ij) ; d_{ij} – задержка из-за обработки и распространения.

Выражение (1) имеет смысл среднего числа пакетов в системе, если предположить, что каждая очередь описывается моделью системы массового обслуживания $M/M/1$ и учитывает факт возникнове-

ния перегрузки при приближении к пропускной способности линии [2]. Поэтому для оптимизации маршрутов необходимо обеспечивать минимизацию функции (1).

Другой стоимостной функцией с аналогичными качественными свойствами является

$$D = \max_{(i,j)} \{x_{ij}/c_{ij}\}, \quad (3)$$

обеспечивающая максимум коэффициента использования линий связи.

Анализ показывает, что большого различия между критериями (1) и (3) нет, поэтому может использоваться та стоимостная функция, которая легче поддается оптимизации [3, 4].

Представим информационную сеть в виде графа $G = (N, A)$ с множеством вершин $N = \{1, 2, \dots, n\}$ и множеством ребер $A = \{(i, j)\}$. Каждому ребру (i, j) этого графа соответствует функция распределения вероятностей $P_{ij}(t)$ времени передачи пакета по линии связи, соответствующей этому ребру [2 – 6].

Входные потоки описываются функциями распределения интервалов времени между входом в сеть отдельных пакетов. Пусть $Q_{ij}(t)$ – функция распределения для потока из узла i в узел j ; $\|\lambda_{ij}\|$ – матрица интенсивностей этих потоков; $i, j = 1, \dots, n$.

При этом предполагается, что абоненты (источники и получатели информации) в модели отсутствуют, для чего входные и выходные потоки приписываются узлам, непосредственно связанным с корреспондирующими абонентами. Правила маршрутизации в модели будут определяться матрицей маршрутных переменных

$$\Phi = \|\varphi_{ij}^{(k)}(t)\|,$$

где $k = 1, \dots, n$, $(i, j) \in A$, $\varphi_{ij}^{(k)}(t)$ – вероятность отправки в узле i в момент времени t пакета, адресованного узлу k , в направлении ребра (i, j) .

$$\text{Очевидно, } \sum_{j \in V^+(i)} \varphi_{ij}^{(k)}(t) = 1; \quad (4)$$

$$\varphi_{ij}^{(k)}(t) \geq 0. \quad (5)$$

Для стационарных потоков маршрутная переменная $\varphi_{ij}^{(k)}$ может интерпретироваться как доля потока, адресованного узлу k и отправляемого в направлении (i, j) . Выбор маршрутных переменных определяется принятым алгоритмом маршрутизации и может допускать только дискретные значения переменных $\varphi_{ij}^{(k)}$, равные 0 или 1. В последнем случае в любой момент времени на узле имеется единственное направление передачи для каждого адреса.

Анализ указанной модели, даже для простых адаптивных методов маршрутизации оказывается весьма затруднительным. Это связано с тем, что в динамических алгоритмах процессы, описывающие поведение элементов сети, зависят от принимаемых решений по выбору направления передачи, а реше-

ния эти принимаются с учетом текущего состояния элементов сети. Разомкнуть эту связь аналитическими методами оказывается крайне сложно [6].

В связи с этим, при исследовании методов маршрутизации, задачу нахождения оптимального алгоритма маршрутизации чаще всего сводят к задаче построения оптимального мультипотока или, как ее еще называют, оптимального распределения потоков $X = \{x_{ij}^{(k)}\}$.

Мультипоток будем называть вектор-функцию $(R^+)^h$, определенную на ребрах графа $G = (N, A)$ и отображающую их в n -мерное пространство. Мультипоток удовлетворяет следующим свойствам $t_{ij}^{(k)} \leq 0$ для любого k , принадлежащего N , и (i, j) , принадлежащего A

$$\sum_{i \in V^-(j)} x_{ij}^{(k)} + \lambda_{ij} = \sum_{e \in V^+(j)} x_{je}^{(k)},$$

где $t_{ij}^{(k)}$ – интенсивность потока с адресом k по ребру (i, j) .

Ниткой мультипотока Π_{ij} называется маршрут из узла i в узел j , на любом ребре (l, m) для которого выполняется условие

$$x_{lm}^{(j)} > 0.$$

В рамках потоковой модели рассматриваются средние интенсивности входных потоков и внутренних потоков сети.

Пусть t_{ij} и x_{ij} – соответственно интенсивности полного потока, протекающего через узел i и предназначенного для узла j , и протекающего по ребру (i, j) , тогда

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ij}^{(k)};$$

$$t_{ij} = \lambda_{ij} + \sum_{k \in V^-(i)} x_{ki}^{(j)}.$$

В рассматриваемой потоковой модели в роли варьируемых переменных выступают маршрутные переменные $\varphi_{ij}^{(k)}$, поскольку управление потоками осуществляется именно через них. Маршрутные и потоковые переменные связаны между собой уравнениями

$$t_{ij} = \lambda_{ij} + \sum_{e \in V^-(i)} t_{ei} \varphi_{ei}^{(j)}, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad (6)$$

$$x_{ij} = \sum_{e=1}^n \varphi_{ij}^{(e)} t_{ie}, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad (7)$$

$$\varphi_{ij}^{(k)} = \frac{x_{ij}^{(k)}}{t_{ik}} \quad \text{при } t_{ik} > 0. \quad (8)$$

Уравнения (6) фактически являются уравнениями баланса: средний поток, поступающий в узел для данного адресата, равен среднему потоку, исходящему из этого узла для того же адресата. Эти соотношения представляют собой систему линейных

уравнений относительно t_{ij} при известных маршрутных переменных и входных потоках. Для правильных маршрутных сетей мультипоток при заданных входных потоках однозначно определяется маршрутными переменными [6].

Основная задача маршрутизации, решаемая в рамках потоковой модели, заключается в нахождении маршрутных переменных и соответствующих им потоков, обеспечивающих экстремум функции эффективности сети, описываемой выражениями (1) и (2).

Для рассматриваемой постановки задачи маршрутизации в [7] доказана следующая теорема.

Для оптимального распределения потоков с выпуклыми функциями $D_{ij}(x_{ij})$ необходимым и достаточным условием оптимума является то, что мультипоток $X = \{x_{ij}^{(k)}\}$ минимизирует целевую функцию D в том и только в том случае, если любая его нитка представляет собой кратчайший маршрут в метрике

$$\|e_{ij}\|, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad e_{ij} = \left. \frac{\delta D_{ij}}{\delta x_{ij}} \right|_{x=\{x_{ij}^{(k)}\}}.$$

Выводы

Большинство используемых в настоящее время алгоритмов маршрутизации в вычислительном плане могут быть отнесены к алгоритмам выбора кратчайшего пути с той или иной метрикой. Завершая рассмотрение потоковых моделей, следует заметить, что между задачей маршрутизации (управления потоками) и выдачей распределения потоков имеется существенное различие.

Каждому алгоритму маршрутизации при заданных входных потоках соответствует некоторое распределение потоков внутри сети, в то же время заданному распределению потоков соответствует множество различных алгоритмов маршрутизации.

Список литературы

1. Калашиников В.В. Сложные системы и методы их анализа. – М.: Знание, 1980. – 64 с.
2. Козелков С.В. Выбор оптимальных методов оценивания параметров движения космических аппаратов // Труды конференции. ХВУ „Проблемы совершенствования систем управления и связи”. 10 - 12.12.97. – Х.: ХВУ. – 1997. – С. 46.
3. Козелкова Е.С. Методика повышения качества моделирования многоспутниковой низкоорбитальной экологической системы дистанционного зондирования Земли: Монография. – К.: НАОУ, 2006. – 124 с.
4. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии. – М.: Мир, 1988. – 252 с.
5. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Т. 1. 2-е изд., пер. и доп. – М.: Советское радио, 1969. – 752 с.
6. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В.С. Шебшаевич, П.П.Дмитриев, Н.В. Иванцевич и др.; Под ред. В.С. Шебшаевича. – М.: Радио и связь, 1993. – 408 с.
7. Тартаковский А.Г. Последовательные методы в теории информационных систем. – М.: Радио и связь, 1991. – 280 с.

Поступила в редколлегию 2.08.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Л.Ф. Купченко, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.