

УДК 621.391

А. С. АЛБУЛ, М. Ф. БАБАКОВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОБОСНОВАНИЕ МОДЕЛИ МАРШРУТИЗАЦИИ ДЛЯ МНОГОСПУТНИКОВЫХ LEO СИСТЕМ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ**

В статье приведена классификация методов маршрутизации. Рассматриваются классы моделей, применяемых для анализа взаимодействия на сетевом уровне МНС ВПД. Произведен выбор критериев эффективности маршрутизации, которые позволяют объективно сравнить различные алгоритмы маршрутизации и провести их оптимизацию. В результате предложен подход к построению процедур адаптивной маршрутизации. Данная статья представляет интерес для исследователей и проектировщиков многоспутниковых низкоорбитальных систем высокоскоростной передачи данных, которые занимаются вопросами управления процессами обмена информацией на сетевом уровне.

Ключевые слова: алгоритмы маршрутизации, космический аппарат, информационный поток, потоковые модели, стохастический процесс, адаптивная маршрутизация, спутниковые системы.

Введение

При построении многоспутниковых низкоорбитальных спутниковых (МНС) систем высокоскоростной передачи данных (ВПД) важной является задача управления на сетевом уровне и связанные с ней процессы организации спутниковых каналов, распределения информационных потоков и управления информацией [1, 2].

Анализ последних исследований и публикаций. На сегодняшний день существует множество протоколов и методов маршрутизации, реализованных как для стационарных, так и для спутниковых систем [3]. Различие между ними состоит во множестве характеристик, но не все из них удовлетворяют требованиям, которые накладываются со стороны СС ВПД.

В спутниковых системах, как и в стационарных сетях связи, процесс маршрутизации реализуется посредством методов маршрутизации, которые представляют собой набор правил, которые определяют процесс построения и поддержания маршрутов передачи между отправителем и адресатом и обеспечивают эффективное использование сетевых ресурсов при заданном качестве обслуживания пользователей (QoS) [2].

В работах [3-5] рассмотрены вопросы маршрутизации для LEO систем, QoS алгоритмов и адаптивные методы маршрутизации, но задача управления на сетевом уровне для таких систем как СС ВПД так и остается нерешенной.

Данные вопросы недостаточно исследованы и остаются трудноразрешимыми, поэтому требуют новых подходов к своему решению.

Для МНС систем характерны следующие особенности сети [6]:

- высокая динамика взаимного движения потребителей и «КА-узлов»;
- большие задержки, вызванные большими расстояниями между узлами.

Вышеуказанные факторы часто делают методы анализа и результаты моделирования, полученные для обычных сетей, непригодными для высокоскоростных низкоорбитальных спутниковых систем.

Одним из ключевых подходов к исследованию процессов управления потоков информации является выбор и создание моделей этих процессов. В данной работе рассматриваются классы моделей, применяемых для анализа взаимодействия на сетевом уровне МНС ВПД [7, 8].

Цель статьи – построение и обоснование модели функционирования МНС ВПД на сетевом уровне для анализа и синтеза алгоритмов управления.

Основная часть

Управление процессом обмена информацией в сети можно условно разделить на управление интенсивностью передаваемых по сети информационных потоков и распределение этих потоков по сети.

Управление интенсивностью информационных потоков достигается путем обеспечения функционирования сети без перегрузок, за счет оптимизации между временем доставки информации и ограничением трафика. При этом различают управление интенсивностью входящих в сеть потоков и потоков, формируемых узлами сети [7].

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

Только при сравнительно небольших интенсивностях, входящих в сеть информационных потоков, управление процессом обмена информацией в сети может быть привязано к процедуре маршрутизации. Увеличение этих интенсивностей может привести к перегрузке сети, следовательно, появляется необходимость ограничения потоков информации.

Решение задачи управления процессом передачи информации в МНС ВПД обеспечивают методы и алгоритмы коммутации, маршрутизации и ограничения информационных потоков, реализуемые в протоколах сетевого и транспортного уровней [6, 7].

1. Классификация методов маршрутизации

Маршрут – это последовательность линий передачи, пройденных пакетом от источника к получателю информации. Определение маршрутов позволяет эффективно использовать существующие каналы 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 [8].

"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 [3, 6].

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.

Для классификации методов двухпунктной маршрутизации, используемых в информационных

сетях, применяют несколько подходов. Один из них состоит в разделении всех методов маршрутизации по признаку централизации управления [10]:

- централизованные;
- распределенные (децентрализованные);
- зоновые.

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 зоновой маршрутизации основываются на разбиении всей сети на зоны и использовании в пределах каждой зоны и между ними своих методов маршрутизации [6, 11].

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 [8, 10].

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 [7, 11].

В динамических (адаптивных) методах маршрутизации путь от отправителя к получателю может 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. Так в статических методах маршрут каждого 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 [9].

По способу выбора конкретного маршрута из множества возможных маршрутов, различают [8]:

- методы с фиксированной маршрутизацией - выбирается единственный наилучший по отношению к выбранному критерию маршрут;
- методы маршрутизации с балансировкой - маршрут выбирается из группы допустимых по какому-либо правилу.

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 [9].

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.

2. Критерии эффективности маршрутизации

Реализация конкретного метода маршрутизации, как правило, происходит в рамках протокола сетевого уровня, который оказывает существенное влияние на основные характеристики сети: производительность сети (количество обслуживания в еди-

ницу 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 [9, 11].

Важнейшим фактором является выбор рационального критерия эффективности маршрутизации - он позволяет объективно сравнить различные алгоритмы маршрутизации и провести их оптимизацию.

Одним из наиболее часто используемых критериев эффективности маршрутизации является среднее время доставки пакета. Это обусловлено тем, что он обладает относительной простотой построения математических моделей [12].

Закон распределения времени доставки и его соответствующие параметры является более общей характеристикой. Такой критерий позволяет более адекватно описать влияние метода маршрутизации на время доставки информации.

Еще одним подходом к данной проблеме является использование максимизации суммарной ценности доставляемых пакетов. В этом случае каждому пакету приписывается некоторая функция $C(t)$, которая зависит от времени и известна на узле при решении задачи выбора маршрута. При этом значение указанной функции равно тому вкладу в общий критерий, который вносят пакет, доставляемый за время t . Она является убывающей со временем функцией и называется функцией старения сообщений. Можно добиться выполнения необходимых потребительских требований по доставке информации посредством выбора необходимой функции старения.

Эффективность определенного метода маршрутизации зависит не только от принятого критерия эффективности и алгоритма реализации метода маршрутизации, а также от интенсивности и структуры входного потока, который определяется механизмом ограничения входной нагрузки сети.

Модели сети, основанные на интенсивностях трафика (потокные модели), используются для количественного учета факторов, связанных с перегрузкой сети [13].

Потокные модели основываются на применении среднего трафика, проходящего по линии связи. Под нагрузкой линии связи i -го узла с j -м понимается интенсивность трафика x_{ij} , который называется потоком, проходящего по линии (i,j) . Поток измеряется в единицах данных (бит, байт, пакет, сообще-

ние и т.д.) в секунду. При этом в потоковых моделях предполагается, что статистика поступающего в сеть трафика не меняется во времени.

Следующая стоимостная функция используется для количественного описания эффективности сети в потоковых моделях [1]

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

где $D_{ij}(F)$ - некоторая монотонно возрастающая функция, которая определяется 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.

Физический смысл выражения (1) - среднее число пакетов в системе в предположении, что каждая очередь описывается моделью системы массового обслуживания M/M/1 и учитывает факт возникновения перегрузки при приближении к пропускной способности линии. Следовательно, для оптимизации маршрутов необходимо обеспечить минимизацию функции (1).

Информационную сеть представим в виде графа $G=(N,A)$ с некоторым множеством вершин $N=\{1,2, \dots, n\}$ и множеством ребер $A=\{(i,j)\}$. Каждому ребру (i,j) соответствует функция распределения вероятностей $P_{ij}(t)$ времени передачи пакета по линии связи, которая соответствует этому ребру [10].

При этом входные потоки описываются функциями распределения интервалов времени между входом в сеть отдельных потоков. Положим: $Q_{ij}(t)$ - функция распределения для потока из узла i в узел j ; $\|\lambda_{ij}\|$ - матрица интенсивностей потоков; $i,j=1, \dots, n$.

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 определяются матрицей маршрутных переменных момент [10]

$$\Phi = \left\| \left\| j_{ij}^{(k)}(t) \right\| \right\|, \quad (3)$$

где $k=1, \dots, n$, $(i,j) \in A$,

$\varphi_{ij}^{(k)}(t)$ - вероятность отправки в узле i в времени t пакета, адресованного узлу k , в направлении ребра (i,j) .

Таким образом

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

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

В частном случае для стационарных потоков маршрутная переменная $\varphi_{ij}^{(k)}$ представляется 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 случае значения 1 в любой момент времени на узле имеется единственное направление передачи для каждого адреса.

3. Задача оптимального распределения потоков

Поэтому анализ указанной модели, даже для простых адаптивных методов маршрутизации, оказывается весьма затруднительным. В динамических алгоритмах процессы, описывающие поведение элементов сети, зависят от принимаемых решений по выбору направления передачи, а решения принимаются с учетом актуального состояния элементов сети. Разрешить полученную связь аналитическими методами оказывается крайне сложно [12, 13].

Следовательно, 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 $X = \{x_{ij}^{(k)}\}$.

Под термином мультипоток будем принимать вектор-функцию $(R^+)^n$, которая определена на ребрах графа $G=(N, A)$ и отображающую их в n -мерное пространство. При этом мультипоток удовлетворяет следующим свойствам $\varphi_{ij}^{(k)} \leq 0$ для любого k , принадлежащего N , и (i,j) , принадлежащего A [14]

$$\sum_{i \in V^-(j)} x_{ij}^{(k)} + \lambda_{ij} = \sum_{e \in V^+(j)} x_{je}^{(k)}, \quad (6)$$

где $x_{ij}^{(k)}$ - 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.

Предположим t_{ij} и x_{ij} - соответственно интенсивности полного потока, протекающего через узел i и предназначенного для узла j , и протекающего по

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^n x_{ij}^{(k)}; \quad (7)$$

ребру (i,j) , в таком случае

$$t_{ij} = \lambda_{ij} + \sum_{k \in V^-(i)} x_{ki}^{(k)}. \quad (8)$$

Управление потоками осуществляется через маршрутные переменные $\phi_{ij}^{(k)}$, поэтому в рассматриваемой потоковой модели они выступают в роли варьируемых переменных. При этом маршрутные и потоковые переменные связаны между собой уравнениями [7, 8]

$$t_{ij} = \lambda_{ij} + \sum_{e \in V^-(i)} t_{ei} j_{ei}^{(i)}, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad (9)$$

$$x_{ij} = \sum_{e=1}^n j_{ij}^{(e)} t_{ie}, \quad i, j = 1, \dots, n; \quad (10)$$

$$j_{ij}^{(k)} = \frac{x_{ij}^{(k)}}{t_{ik}}, \quad \text{при } t_{ik} > 0. \quad (11)$$

Соотношения (9-11) представляют собой систему линейных уравнений относительно t_{ij} при известных маршрутных переменных и входных потоках. Фактически уравнения (9) являются уравнениями баланса: средний поток, поступающий в узел для данного адресата, равен среднему потоку, исходящему из этого узла для того же адресата. Мультипоток для правильных маршрутных сетей при заданных входных потоках однозначно определяется маршрутными переменными [1, 8, 13].

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

В [13] для рассматриваемой постановки задачи маршрутизации 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 том случае, если любая его нитка представляет собой кратчайший маршрут $\|e_{ij}\|$, $i, j = 1, \dots, n$ в метрике

$$e_{ij} = \frac{\delta D_{ij}}{\delta x_{ij}}. \quad (12)$$

Согласно приведенной теореме большинство используемых в настоящее время алгоритмов маршрутизации в вычислительном плане могут быть отнесены к алгоритмам выбора кратчайшего пути и отличаются только выбранной метрикой [13].

4. Подход к построению процедур адаптивной маршрутизации

Предлагается подход к построению процедур адаптивной маршрутизации путем выбора в качестве метрик путей величин, отражающих не только длину, но и степень их загруженности в некоторый момент времени. В таком случае более нагруженной линии приписывается большая метрика, а алгоритм отыскания кратчайшего пути стремится отыскать путь с минимальной метрикой. Для корректного решения задачи синтеза адаптивных процедур маршрутизации рационально осуществить построение методами, которые основываются на теории управления динамическими системами [12].

Так как показателями качества функционирования выбраны задержка сообщения в сети и коэффициент использования канала, следует считать эффективными процедуры маршрутизации, при которых достигается экстремум целевых функций

$$D = T(t) = \sum_S \sum_{t=0}^{\Delta} f_t(y_{t-1}, \tau, x_{t-s}, \dots, x_t) + f_0(y_0) \rightarrow \min_S, \quad (13)$$

$$y_t = P_t(y_{t-1}, \tau, x_{t-s}, \dots, x_t), \quad x_t \in X, y_t \in Y,$$

где y_t - переменные состояния;

x_t - переменные управления;

$T(t)$ - задержка сообщений;

$f_0(\cdot)$ - потери на момент окончания управления;

S - множество всевозможных маршрутов;

$$D = K = \max_S \sum_{(i,j)} \left\{ \frac{h_{ij}(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t)}{c_{ij}} \right\}, \quad (14)$$

где c_{ij} - пропускная способность линии между узлами i и j ;

K - коэффициент использования канала.

Задача минимизации (13), (14) известна и успешно решаются. Они относятся к детерминированным задачам динамической дискретной оптимизации, приводимым к эквивалентным задачам выбора кратчайшего маршрута.

В общем случае переменные состояния, под которыми в дальнейшем подразумевается загруженность элементов сети - длины очередей в узлах, является по своей сути стохастическими, поэтому необходимо рассматривать их стохастические эквиваленты.

Пусть $y(t)$ - стохастический процесс с непрерывным временем и пусть существует $p(y, 1)/t = p(y, t)$.

Пусть переменная состояния известна неточно и известно условное распределение

$$p: p(\hat{y}|y, t), \quad (15)$$

где y - оценка вектора состояния.

В таком случае задачу динамической оптимизации среднего времени доставки сообщения можно сформулировать следующим образом

$$T(t) = \sum_S \sum_{t=0}^{\Delta} \int_Y f_t(y_{t-1}, \tau, x_{t-s}, \dots, x_t) \times \\ \times p(y_{t-1} | \hat{y}_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) dy_{t-1} + \\ + f_0(\hat{y}_0 | y_0) \rightarrow \min_S \quad (16)$$

Задача динамической оптимизации показателя вероятности доставки сообщения за заданное время T_0 подразумевает минимизацию функционала

$$p(t \leq T) = \sum_S \sum_{t=0}^T \int p(f(y, t), \tau, x(t)) df(y(t), x(t)) \rightarrow \\ \rightarrow \min_S \quad (17)$$

где $p(f(y_{t-1}, x_{t-1}))$ - плотность распределения целевой функции.

Для стохастической задачи функционал типа (2) можно записать в следующем виде

$$D=K = \max_S \sum_{(i,j)} 1/c_{ij} \times \\ \times \int_Y h_{ij}(y_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) \times \\ \times p(y_{t-1} | \hat{y}_{t-1}, x_{t-s}, \dots, x_t) dy_{t-1} \quad (18)$$

Заключение

Исследования общих вопросов построения сети СС ВПД указывает на приоритетность решения задач управления на сетевом уровне и связанных с ней организацией каналов, процессов распределения информационных потоков и управления информацией.

Решение оптимизационных задач (17)-(18) позволяет разрешить ряд вопросов, к которым следует отнести:

- выбор формализованной модели функционирования системы на сетевом уровне;
- идентификацию параметров модели;
- формирование управляющих воздействий.

Таким образом, полученные результаты позволяют в дальнейшем провести моделирование взаимодействия на сетевом уровне в МНС для разработки научно-технических предложений по повышению эффективности функциональных узлов и устройств СС ВПД.

Литература

1. Лазарев, В. Г. Динамическое управление потоками в сетях связи [Текст] / В. Г. Лазарев, Ю. В. Лазарев. – М. : Радио и связь, 1989. – 237 с.
2. Yin, Z. On-Demand QoS Multicast Routing for Triple-Layered LEO/HEO/GEO Satellite IP Networks

[Text] / Z. Yin, L. Zhang, X. Zhou // *Journal of Communications*. – 2011. – no. 6. – P. 495-508.

3. Yan, J. Reverse Detection Based QoS Routing Algorithm for LEO Satellite Constellation Networks [Text] / J. Yan, Y. Zhang, Z. Cao // *Tsinghua Science & Technology*. – 2011. – no. 16 (4). – P. 358-363.

4. Jiang, W. A Discrete-Time Traffic and Topology Adaptive Routing Algorithm for LEO Satellite Networks [Text] / W. Jiang, P. Zong // *International Journal of Communications, Network and System Sciences*. – 2011. – no. 4 (1). – P. 42-52.

5. Wang, M. The New Algorithm for Finding the Paths based on Coding Graph [Text] / M. Wang // *Journal of Software*. – 2012. – no. 7(1). – P. 1-8.

6. Крылов, В. В. Теория телеграфика и ее приложения. Основы теории систем массового обслуживания для задач телекоммуникаций [Текст] / В. В. Крылов, С. С. Самохвалова. – СПб. : БХВ, 2005. – 288 с.

7. Волков, Л. Н. Системы цифровой радиосвязи [Текст] / Л. Н. Волков, Н. С. Немировский, Ю. С. Шинаков. – М. : Экотрендз, 2005. – 501 с.

8. Романюк, В. А. Управление построением маршрутов для сети с динамической топологией [Текст] / В. А. Романюк // *Управляющие системы и машины*. – 1993. – № 2. – С. 81-86.

9. Советов, Б. Я. Построение сетей интегрального обслуживания [Текст] / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – Л. : Машиностроение, 1990. – 332 с.

10. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа [Текст] / В. А. Григорьев, О. И. Лагутенко, Ю. А. Раснаев. – М. : Эко-Трендз, 2005. – 384 с.

11. Кульгин, М. Технологии корпоративных сетей [Текст] / М. Кульгин. – СПб : Издательство "Питер", 2000. – 704 с.

12. Танненбаум, Э. Компьютерные сети [Текст] / Э. Танненбаум. – СПб : Издательство Питер, 2003. – 520 с.

13. Албул, А. С. Анализ алгоритмов маршрутизации в высокоскоростных низкоорбитальных спутниковых системах связи [Текст] / А. С. Албул // *Международная научно-техническая конференция «Радиотехнические поля, сигналы, аппараты и системы»*. Киев, 16–22 марта 2014 г.: материалы конференции – Киев : 2014. – С. 150-151.

References

1. Lazarev, V. H., Lazarev, Yu. V. *Dynamicheskoe upravlenye potokamy v setyakh svyazy* [Dynamic flow control in communication networks]. Moscow, Radyo y svyaz' Publ., 1989. 237 p.
2. Yin, Z., L. Zhang, and X. Zhou, On - Demand QoS Multicast Routing for Triple - Layered LEO/HEO/GEO Satellite IP Networks. *Journal of Communications*, 2011, no. 6, pp. 495-508.
3. Yan, J., Y. Zhang, and Z. Cao, Reverse Detection Based QoS Routing Algorithm for LEO Satellite Constellation Networks. *Tsinghua Science & Technology*, 2011, no. 6 (4), pp. 358-363.

4. Jiang, W. and P. Zong, A Discrete - Time Traffic and Topology Adaptive Routing Algorithm for LEO Satellite Networks. *International Journal of Communications, Network and System Sciences*, 2011, no. 4 (1), pp. 42-52.
5. Wang, M., The New Algorithm for Finding the Paths based on Coding Graph. *Journal of Software*, 2012, no. 7(1), pp. 1 - 8.
6. Krylov, V. V., Samokhvalova, S. S. *Teoriya teletrafyka y ee prylozheniya. Osnovy teoryy system massovoho obsluzhyvaniya dlya zadach telekommunikatsyy* [Teletraffic Theory and Its Applications. Basic theory of queuing systems for telecommunications tasks]. Sankt-Peterburg, Pyter Publ., 2005. 288 p.
7. Volkov, L. N., Nemyrovskyy, N. S., Shynakov, Yu. S. *Sistemy tsyfrovoy radyosvyazy* [Digital Radio System]. Moscow, Ekotrendz Publ., 2005. 501 p.
8. Romanyuk, V. A. Upravlenye postroyenyem marshrutov dlya sety s dynamicheskoy topologiyey [Managing the construction of routes for networks with dynamic topology]. Kiev, *Upravlyayushchye systemy y mashyny Publ.*, 1993, no. 7, pp. 81 – 86.
9. Sovetov, B. Ya., Yakovlev, S. A. *Postroyeniye setey yntehral'noho obsluzhyvaniya* [Construction of Integrated Services Networks]. Lvov, Mashynostroeniye Publ., 1990. 332 p.
10. Hryhor'ev, V. A., Lahutenko, O. Y., Raspaev, Yu. A. *Sety y systemy radyodostupa* [Networks and radio systems]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2005. 384 p.
11. Kul'hyn, M. *Tekhnolohyy korporativnykh setey* [Corporate Networks Technology]. Sankt-Peterburg, Pyter Publ., 2000. 704 p.
12. Tannenbaum, E. *Komp'yuternyye sety* [Computer Networks]. Sankt-Peterburg, Pyter Publ., 2003. 520 p.
13. Albul, A. S. Analysis of routing algorithms in high throughput LEO satellite communication. *Conference Proceeding International Scientific and Technical Conference "RADIOENGINEERING FIELDS, SIGNALS, DEVICES AND SYSTEMS"*. Kiev, 2014, pp. 150-151. (In Russian).

Поступила в редакцію 15.02.2016, рассмотрена на редколлегии 14.04.2016

ОБГРУНТУВАННЯ МОДЕЛІ МАРШРУТИЗАЦІЇ ДЛЯ БАГАТОСУПУТНИКОВИХ LEO СИСТЕМ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

О. С. Албул, М. Ф. Бабаков

У статті наведено класифікацію методів маршрутизації. Розглядаються класи моделей, що застосовуються для аналізу взаємодії на мережевому рівні МНС ВПД. Зроблено вибір критеріїв ефективності маршрутизації, які дозволяють об'єктивно порівняти різні алгоритми маршрутизації та провести їх оптимізацію. В результаті запропоновано підхід побудови процедур адаптивної маршрутизації. Дана стаття становить інтерес для дослідників і проектувальників багатосупутникових низькоорбітальних систем високошвидкісної передачі даних, які займаються питаннями управління процесами обміну інформацією на мережевому рівні.

Ключові слова: алгоритми маршрутизації, космічний апарат, інформаційний потік, потокові моделі, стохастичний процес, адаптивна маршрутизація, супутникові системи.

JUSTIFICATION OF THE ROUTING MODEL FOR LEO HIGH-SPEED DATA TRANSMISSION SATELLITE SYSTEMS

A. S. Albul, M. F. Babakov

The article presents the classification of routing methods. Classes of models used to analyze the interaction between the network layers in LEO systems are considered. Criteria of routing efficiency is suggested. As a result, the approach of the construction of adaptive routing procedures is proposed. The article is of interest to researchers and engineers in the area of routing algorithms in LEO high-speed data transmission satellite systems.

Keywords: routing algorithms, spacecraft, information flow, flow models, stochastic process, adaptive routing, satellite systems.

Албул Александр Сергеевич – аспирант кафедры 502 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a_albul@ukr.net.

Бабаков Михаил Федорович – канд. техн. наук, профессор кафедры 502 Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: babakovmf@mail.ru.

Albul Alexander Sergeevich – PhD Student, Department of Electronic Aircraft System Production, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: a_albul@ukr.net.

Babakov Mikhail Fedorovich – Candidate of Technical Science, Professor of Department of Electronic Aircraft System Production, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky "Kharkov Aviation Institute", Kharkov, Ukraine, e-mail: babakovmf@mail.ru.