

УДК 004.735 DOI 10.30894/issn2409-0239.2021.8.4.63.71

Анализ применимости стандартных протоколов динамической маршрутизации в сетях спутниковой связи на основе низкоорбитальных космических аппаратов

М. Ю. Сорокин, *sorokin.myu@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. А. Селифанов, *selifanov.va@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

В. В. Мартыненко, *martynenko.vv@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

М. А. Фролов, *frolov.ma@spacecorp.ru*

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. Одной из ключевых составляющих сетей связи, определяющей принципы функционирования, являются протоколы маршрутизации трафика.

Цель данной статьи — рассмотрение возможности применения широко используемых протоколов динамической маршрутизации в низкоорбитальных системах спутниковой связи.

На основе имеющихся публикаций проведен анализ исходных данных и сформулированы условия функционирования протоколов маршрутизации в низкоорбитальных системах спутниковой связи, а также базовые требования к таким протоколам. Проведен анализ функционирования протоколов динамической маршрутизации в заданных условиях, выделены и охарактеризованы недостатки рассмотренных протоколов.

Основным выводом статьи является нецелесообразность использования рассмотренных протоколов в низкоорбитальных сетях спутниковой связи по причине высоких требований к объему применяемых ресурсов и недостаточной скорости распространения изменений. Результаты могут быть использованы в обосновании технических решений при проектировании низкоорбитальных сетей спутниковой связи.

Ключевые слова: низкоорбитальная система, спутниковая связь, динамическая маршрутизация, OSPF, BGP

Analysis of the Applicability of Standard Dynamic Routing Protocols in Low Orbit Satellite Networks

M. Yu. Sorokin, *sorokin.my@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. A. Selifanov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *selifanov.va@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

V. V. Martynenko, *martynenko.vv@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

M. A. Frolov, *Cand. Sci. (Engineering)*, *frolov.ma@spacecorp.ru*

Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. One of the key components of communication networks, which determines the principles of their operation, are traffic routing protocols.

The purpose of this article is to consider the possibility of using widely used dynamic routing protocols in LEO satellite communication systems.

Based on the available publications, the analysis of the initial data was carried out and the conditions for the functioning of routing protocols in low-orbit satellite communication systems, as well as the basic requirements for such protocols, were formulated. The analysis of the functioning of the dynamic routing protocols in the given conditions is carried out. The disadvantages of the considered protocols are highlighted and characterized.

The main conclusion of the article is the inexpediency of using the considered protocols in low-orbit satellite communication networks due to the high resource requirements and the insufficient speed of propagation of changes. The results can be used to substantiate technical solutions in the design of low-orbit satellite communication networks.

Keywords: low-orbit system, satellite communications, dynamic routing, OSPF, BGP

Введение

На сегодняшний день все большее распространение приобретают низкоорбитальные спутниковые системы связи. При их реализации остро встает проблема маршрутизации. Это связано с ее высокой динамичностью, обусловленной быстрым перемещением спутников относительно Земли и относительно друг друга.

В данной статье рассмотрены проблемы применения широко используемых во всем мире протоколов динамической маршрутизации, таких как OSPF, IS-IS, BGP, RIP, EIGRP, в низкоорбитальных сетях спутниковой связи.

Основные характеристики протоколов динамической маршрутизации

Современные протоколы динамической маршрутизации относятся к двум большим классам: дистанционно-векторные протоколы (BGP, RIP, EIGRP) и протоколы состояния канала (OSPF, IS-IS).

Основное отличие классов протоколов в том, как строится база данных содержащая маршруты к сетям назначения.

Особенностями дистанционно-векторных протоколов является обмен маршрутизаторами по цепочке информацией о достижимости через них различных подсетей, после чего для каждой подсети выбирается кратчайший маршрут через цепочку

маршрутизаторов. Таким образом, у каждого маршрутизатора есть информация только о доступности определенной подсети и перечень узлов (автономных систем), через которые она доступна.

В отличие от дистанционно-векторных протоколов работа протоколов состояния канала основана на построении в памяти маршрутизатора базы данных, содержащей информацию о состоянии маршрутизаторов и каналов связи в сети. Таким образом, у каждого маршрутизатора имеется полная информация о топологии сети в его зоне маршрутизации. Наилучший путь вычисляется, как правило, с использованием алгоритма Дейкстры.

В табл. 1 приведены основные характеристики рассматриваемых протоколов.

Формирование требований к протоколам маршрутизации

Особенностью низкоорбитальных спутниковых систем связи является малая зона видимости космического аппарата. Так, при высоте орбиты 500 км радиус зоны покрытия космического аппарата не превышает 400–500 км, что при скорости движения аппарата 8 км/с ограничивает время работы отдельного абонента с КА 5–7 мин. По этой причине абонент должен регулярно перенастраиваться на новый КА взамен уходящему из зоны видимости.

С точки зрения маршрутизации это означает регулярное (один раз в 5–7 мин) изменение привязки адреса абонента к КА, который в данном случае можно воспринимать как маршрутизатор.

Таблица 1. Основные характеристики протоколов динамической маршрутизации

Характеристика	OSPF	IS-IS	BGP	EIGRP	RIP
Тип протокола	Состояния каналов	Состояния каналов	Дистанционно-векторный	Дистанционно-векторный	Дистанционно-векторный
Количество транзитных участков	–	–	–	–	15
Масштабируемость	Высокая	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая
Скорость сходимости	Высокая	Высокая	Низкая	Высокая	Низкая
Бесклассовая маршрутизация	Да	Да	Да	Да	Нет
Использование ресурсов	Высокое	Высокое	Высокое	Средняя	Низкое

Кроме того, в связи с незначительной зоной покрытия количество аппаратов для покрытия всей поверхности Земли должно быть достаточно велико. Для орбит высотой 500 км количество КА в одной орбитальной плоскости должно быть не менее 40, чтобы поверхность Земли под КА этой орбитальной плоскости полностью покрывалась зонами обслуживания КА. Количество орбитальных плоскостей должно быть примерно таким же, чтобы полностью покрыть поверхность земли областями обслуживания КА. Таким образом, задачи маршрутизации необходимо решать в сети с количеством узлов не менее 1600 (40 КА \times 40 плоскостей).

Размещение шлюзовых станций связано с различными ограничениями, такими как невозможность размещения шлюзовых станций в океанах, также возможны иные ограничения (например, политические), не позволяющие размещать шлюзовые станции в других странах.

Взаимодействие между КА может осуществляться при нахождении их в одной орбитальной плоскости, на соседних позициях, а также между КА в соседних орбитальных плоскостях (см. рисунок).

Исключение составляют приполярные области. В окрестностях полюса значительно возрастают

взаимные линейные и угловые скорости КА, находящихся в соседних орбитальных плоскостях, в подобных условиях существенным становится влияние эффекта Доплера; увеличивается плотность расположения КА в пространстве, что может привести к интерференции в межспутниковых радиолиниях. В подобных условиях резко возрастают требования к приемопередающим средствам и системе управления антеннами, обеспечивающим межспутниковое взаимодействие, что существенно повысит массогабаритные характеристики и стоимость КА [7]. Таким образом, без серьезного экономического обоснования следует принять, что межспутниковое взаимодействие КА в различных орбитальных плоскостях в приполярных районах нецелесообразно.

Поэтому в высоких широтах (выше 70 параллели) будет происходить отключение каналов связи широтного направления и новое подключение при перемещении КА в более низкие широты. При периоде обращения 100 мин подобные переключения будут происходить с интервалами ориентировочно 10 и 40 мин. В рассматриваемой сети это соответствует $1600 \times 4 = 4800$ изменений за период обращения, или 48 изменений в минуту.

Для оценки интенсивности возникновения изменений в сети при переходе абонентов с одного КА на другой рассмотрим космическую группировку с 40 орбитальными плоскостями по 40 аппаратов в каждой (1600 аппаратов), позволяющую полностью покрыть поверхность Земли. Количество абонентов возьмем равное 1 000 000, равномерно распределенных по поверхности Земли. Таким образом, в зону обслуживания одного КА попадает порядка 700 ($1\,000\,000/1600$) абонентов.

С учетом движения КА по орбите полное обновление адресов абонентов происходит в течение 300–500 с, что для всей сети означает поток изменений в интервале от 1600 до 3200 обновлений/с.

Таким образом, требования к протоколам маршрутизации, предназначенным для использования в низкоорбитальной спутниковой сети, можно сформулировать следующим образом:

- 1) устойчивое функционирование в сетях с количеством маршрутизаторов порядка нескольких тысяч;

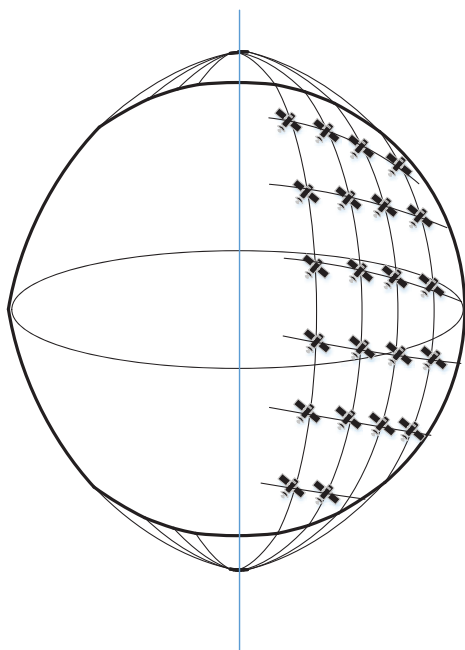


Рисунок. Расположение КА на орбитах

- 2) формирование маршрутов с большим количеством пересылок (не менее 50);
- 3) устойчивость функционирования при регулярных отключениях каналов связи (в приполярных областях не менее 1 отключения в секунду) и перемещениях абонентов между КА (3000 обновлений в секунду);
- 4) высокая скорость сходимости при разрыве каналов связи;
- 5) минимальные издержки при передаче маршрутной информации.

Применение протокола RIP

Маршрут в RIP должен состоять не более чем из 15 промежуточных участков. Все адреса назначения, находящиеся за пределами такой зоны, будут рассматриваться как находящиеся на бесконечном удалении. Поэтому для сети, длина маршрута в которой может достигать 40 промежуточных участков, большая часть узлов будет находиться вне пределов зоны маршрутизации узла, соответственно применение RIP в рассматриваемой сети невозможно.

Применение протокола OSPF

Протокол OSPF относится к классу протоколов состояния канала. Функционирование протокола основано на построении базы данных состояний каналов (Link State Database, LSDB), одинаковой для всех узлов сети. После построения LSDB для всех конечных узлов выполняется расчет путей по алгоритму Дейкстры (Shortest Path First, SPF). На основании результатов расчета формируется таблица маршрутизации.

Построение LSDB происходит за счет лавинообразной рассылки по всей объявлений о состоянии каналов (Link State Advertisement, LSA) нескольких типов, каждое из которых несет определенную информацию о состоянии соединений маршрутизатора. Доступность каналов связи регулярно проверяется с использованием сообщений Hello. Подробно протокол рассмотрен в работе [5].

Как показано в [1], время распространения LSA по сети можно оценить по формуле:

$$T_{LSA} = \frac{\lambda_{LSA} D_{LSA} R S}{N \sum_i C_i},$$

где λ_{LSA} — интенсивность отправки пакетов LSA [пак./с];

D_{LSA} — длина пакета LSA [бит];

R — средняя длина маршрута в сети, выраженная в количестве каналов связи;

S — показатель связности узлов (среднее число каналов связи, смежное узлу);

C_i — пропускная способность i канала связи;

N — количество каналов связи в сети.

Данная формула не учитывает задержки в каналах связи, поэтому с их учетом время распространения, принимая максимальную длину маршрута 40, составит не менее 130 мс.

Как отмечалось выше, при периоде обращения 100 мин подобные переключения будут происходить с интервалами 10 и 40 мин. Таким образом, каждый КА за период обращения дважды выключит и дважды включит каналы связи широтного направления, что приведет к перестройке LSDB. Поток изменений составит при этом 48 изменений в минуту.

Каждое изменение влечет за собой полноценный процесс определения отказа, добавления отношений соседства, синхронизации LSDB и распространения LSA по всей сети. Кроме того, каждое такое перестроение требует перерасчета SPF. Параллельно идет процесс регистрации изменений привязки абонентов к КА, что в OSPF отражается потоком LSA при каждом изменении привязки. Как отмечалось ранее, в рассматриваемой сети поток LSA, связанных с привязкой абонента, составит в среднем 2400 в секунду.

Как показано в [1], время сходимости зависит от множества параметров. Основной вклад во время сходимости вносят временные параметры определения отказов, распространения LSA и вычисления SPF.

Таким образом, в LSDB на маршрутизаторах все время функционирования сети будут накапливаться изменения, требующие пересчета SPF и перезаписи таблиц маршрутизации. Интенсивность

поступления изменений не может быть для рассматриваемой сети менее 2400 в секунду. Кроме того, с интенсивностью порядка 1 события в секунду будут происходить отключения/включения межспутниковых каналов связи. Учитывая размер LSDB и ограниченную производительность маршрутизатора КА, производить расчет SPF и формировать таблицу маршрутизации с такой частотой не представляется возможным. Поэтому в приполярных районах из-за высокой частоты изменений, маршрутизация будет нестабильной, значительно повысится вероятность потерь из-за неактуальности маршрутов. Очевидно, что с увеличением масштаба сети проблемы будут только нарастать.

Применение протокола OSPF в многоспутниковых низкоорбитальных сетях теоретически возможно, однако в значительных областях маршрутизация будет нестабильной, велики риски высоких потерь пакетов.

Применение протокола IS-IS

Протокол IS-IS относится к классу протоколов состояния канала, и принципы его функционирования схожи с OSPF. Основным отличием протоколов OSPF и IS-IS является принцип деления сети на области маршрутизации. В отличие от OSPF маршрутизаторы IS-IS принадлежат к какой-то определенной области и возможность взаимодействия между маршрутизаторами определяется его уровнем L1 (возможность взаимодействия с маршрутизаторами только своей области) или L2 (возможность взаимодействия с маршрутизаторами как своей, так и других областей).

Так как принцип деления на области для рассматриваемой сети не приведет к существенным изменениям топологии, то соображения, приведенные выше для протокола OSPF, будут справедливы и для IS-IS.

В работе [2] авторами проведено сравнение протоколов OSPF и IS-IS, а также описано экспериментальное исследование объема, генерируемого протоколами OSPF и IS-IS служебного трафика. Так, показано, что при прочих равных условиях объем служебного трафика протокола IS-IS в разы превышает объем служебного трафика OSPF

и растет прямо пропорционально количеству узлов сети и связей между ними, что еще более усугубит описанные для OSPF проблемы.

Таким образом, применение данного протокола в многоспутниковых низкоорбитальных сетях нецелесообразно.

Применение протокола BGP

Протокол BGP — дистанционно-векторный протокол, предназначен в первую очередь для организации маршрутизации между автономными системами и является протоколом прикладного уровня.

Основная единица маршрутизации в BGP — автономная система, то есть логически выделенная и достаточно стабильная область сети с единой политикой маршрутизации.

В низкоорбитальной сети достаточно сложно выделить подобные области, так как взаимное расположение КА постоянно меняется. Варианты стабильных конфигураций:

- автономную систему представляют КА, находящиеся в одной орбитальной плоскости;
- каждый отдельный КА представляет собой автономную систему.

Альтернативой может быть только использование iBGP-вариации протокола, в который все маршрутизаторы сети включены в одну автономную систему и обмениваются маршрутной информацией в режиме все со всеми. Однако для построения такой конфигурации должна существовать сетевая связность между всеми маршрутизаторами, то есть в сети уже должен функционировать протокол динамической маршрутизации.

В случае представления каждого КА отдельной автономной системой каждый маршрутизатор должен сохранить в БД все возможные пути до каждого префикса, зарегистрированного в системе. В рассматриваемой сети для 1 000 000 абонентов, БД маршрутов будет содержать сотни миллионов записей, что за пределами технических возможностей существующих маршрутизаторов.

В случае деления орбитальной группировки на автономные системы в соответствии с орбитальными плоскостями получим топологию, состоящую

из нескольких колец, соседние из которых соединяются несколькими линиями связи.

Маршрут в BGP представляет собой перечисление автономных систем, через которые проходит путь от источника до получателя. Маршрут внутри автономной системы выбирается на основании политик, принятых в автономной системе.

Для поддержания баз данных в актуальном состоянии при включении КА в сеть (установлении отношений с соседом) через него должны быть анонсированы все префиксы, доступные в сети, то есть передана практически вся база данных маршрутов.

При смене привязки абонента к КА его адрес должен быть последовательно удален со всех маршрутизаторов сети, а затем также последовательно распространен с анонсами по всей сети.

Таким образом, при переходе абонента с одного КА на другой, в интервале времени от начала распространения информации об удалении префикса, до завершения распространения информации о новой привязке префикса имеется неопределенность (маршрут может отсутствовать или указывать на неверное местоположение абонента). Учитывая, что часть изменений привязок будет происходить в одной автономной системе (орбитальной плоскости), количество изменений привязки абонентов к КА, анонсируемых вовне автономной системы будет ориентировочно на 30–50 % ниже общего количества изменений.

Полный поток изменений привязки составляет в рассматриваемой сети 1600–3200 в секунду, следовательно, поток изменений по всей системе составит 1200–2300 в секунду, а учитывая необходимость удаления устаревших записей — 2400–4600 в секунду.

В принятых нами допущениях количество абонентов составляет 1 000 000. Так как абоненты могут произвольным образом менять свою привязку к КА в связи с перемещениями как КА, так и самого абонента, то адреса строго индивидуальны и сгруппировать их (суммировать) в общем случае не получится. Даже если учесть, что значительная часть адресов будут суммированы, количество записей будет составлять сотни тысяч. При этом, согласно статистике сети Интернет, количество записей в БД маршрутов в режиме Full View составляет порядка 500 000, а объем — порядка 300 Мбайт.

Таким образом, объем БД рассматриваемой системы будет иметь объем, сопоставимый с БД сети Интернет, порядка сотен мегабайт, что потребует для обработки значительных ресурсов памяти и производительности процессора, реализовать которые на борту КА проблематично.

Время сходимости BGP и его временные параметры рассматривались в [3]. Так, показано, что время сходимости при одиночных изменениях значительно зависит от минимальной задержки между последовательными изменениями. Такая задержка не может выбираться слишком малой ввиду взрывного роста количества обновлений, происходящих при добавлении либо удалении префикса. Учитывая нестабильность соединений между КА и высокую частоту изменения привязки префиксов, время сходимости протокола BGP будет как минимум сопоставимо со временем между изменениями в сети, что приведет к значительным несоответствиям между текущей конфигурацией сети и маршрутной информацией, содержащейся в БД КА, результатом чего станет значительный объем потерь в результате ошибок маршрутизации.

Кроме того, как показано в [4], одной из особенностей протокола BGP является то, что при определенных конфигурациях его сходимость не гарантируется. Ввиду сложной динамической природы структуры спутниковой сети вероятно образование зон, маршруты в которые никогда не будут выбраны и направленные в них пакеты будут потеряны.

Применение протокола EIGRP

Протокол EIGRP является дистанционно-векторным, что накладывает на него ограничения, аналогичные протоколу BGP. При инициализации протокола в сети происходит лавинообразная рассылка обновлений с маршрутной информацией, аналогично происходящей в протоколе OSPF, однако в отличие от последнего стоимость маршрута не рассчитывается для каждого маршрутизатора, а формируется на основе метрики, полученной от соседа.

После построения таблицы топологии маршрутизаторы обмениваются с соседями пакетами hello и, таким образом, отслеживают их доступность. В случае топологических изменений (появление

новой сети, отключение канала связи и т. п.) маршрутизатор выполняет рассылку обновлений маршрутов либо выполняет запрос маршрута для требуемой сети.

Таким образом, функционирование протокола аналогично функционированию OSPF. Отличием является то, что, являясь дистанционно-векторным протоколом, EIGRP не создает и не хранит базу данных состояния каналов связи и, соответственно, не производит расчет кратчайших путей. Вместо этого каждый маршрутизатор выполняет расчет метрики для каждого адреса назначения на основании информации, полученной от соседей.

Преимуществом протокола можно назвать меньшие требования к производительности маршрутизаторов относительно OSPF для вычисления кратчайших путей, однако при этом время распространения изменений несколько выше из-за необходимости устанавливать маршрут в таблицу маршрутизации, прежде чем выполнять его передачу соседям. Также протокол EIGRP является проприетарным.

Существующие низкоорбитальные сети спутниковой связи

В настоящее время наиболее известной и полностью функционирующей низкоорбитальной сетью спутниковой связи является Iridium. Описание системы приведено в [6].

Аналогичные по назначению сети Globalstar и Orbcomm предоставляют существенно меньший функционал. В сети Globalstar отсутствуют межспутниковые связи, что требует наличие в зоне покрытия КА хотя бы одной шлюзовой станции. Orbcomm ориентирована на передачу коротких сообщений и не имеет сервисов постоянного доступа к сети.

В состав системы спутниковой связи Iridium входит орбитальная группировка КА из 66 космических аппаратов на приполярных орбитах высотой 780 км в шести орбитальных плоскостях. Каждый КА имеет межспутниковые связи с КА расположенными спереди и сзади в той же орбитальной плоскости, а также с двумя КА в соседних, расположенных справа и слева орбитальных плоскостях.

Главной особенностью данной сети является возможность маршрутизации трафика от абонентского терминала до шлюзовой станции через космический сегмент, минуя наземные каналы связи.

Управление и контроль вызовов осуществляется шлюзовыми станциями.

Система Iridium реализует в числе своих сервисов передачу данных в различных режимах (см. табл. 2).

Таблица 2. Скорости передачи данных в Iridium

Сервис	Скорость передачи данных, кбит/с
Телефония	2,4
Низкоскоростная передача данных	9,5–64
Передача данных морским и воздушным объектам	128–512
Высокоскоростная передача данных	88; 176; 352; 704; 1408

Работа сервисов передачи данных основана на установлении коммутируемого соединения от АТ (абонентский терминал) через КА до шлюзовой станции путем организации сквозного IP-соединения.

Для установления соединения между двумя АТ необходимо участие шлюзовой станции. Таким образом, весь трафик абонентских терминалов проходит через одну из шлюзовых станций даже в случае, если АТ расположены в зоне покрытия одного (или соседних КА), что делает невозможным непосредственное взаимодействие двух АТ невозможным и увеличивает нагрузку как на космический сегмент, так и на шлюзовые станции.

Альтернативные транспортные технологии глобальных сетей

Существующие технологии организации каналов передачи данных, такие как Frame Relay и АТМ, в глобальных сетях ориентированы на установление виртуальных соединений с использованием статической конфигурации узлов.

В связи с динамической природой низкоорбитальной спутниковой сети все проблемы функционирования протоколов динамической маршрутизации будут актуальны для технологий Frame Relay и ATM, так как для поддержания виртуальных каналов необходим механизм формирования маршрута передачи кадров (ячеек) от отправителя к получателю в условиях быстро изменяющейся конфигурации сети.

Вывод о применимости

Исходя из изложенного выше следует:

1. Применению протокола RIP препятствует заложенное в нем ограничение на количество промежуточных пересылок.

2. Протоколу BGP для функционирования требуется поддержание базы данных маршрутов размером порядка нескольких сотен мегабайт, в которой необходимо будет проводить обновления маршрутной информации с высокой интенсивностью (3–5 тысяч обновлений в секунду для рассматриваемой сети), что, учитывая ограничения производительности маршрутизаторов, обусловленные областью их применения, приведет к низкой скорости распространения изменений и нестабильной маршрутизации.

3. Протокол OSPF позволяет быстро распространять изменения (расчетное время распространения составляет 130 мс), однако ввиду значительного потока обновлений (порядка 2500 обновлений в секунду для рассматриваемой сети) своевременная их обработка будет невозможна из-за ограниченной производительности маршрутизаторов КА, что повлечет увеличение времени между перерасчетами маршрутов и будет вызывать нестабильную маршрутизацию и потери пакетов, особенно в приполярных областях, где будут происходить регулярные изменения топологии с частотой порядка 1 изменения в секунду.

4. Выводы, сделанные в отношении OSPF, применимы и к протоколу IS-IS, построенному на схожих принципах. При этом протокол IS-IS

порождает в несколько раз больший служебный трафик.

Скорость распространения изменений при использовании протокола EIGRP ниже, чем в OSPF. Также протокол EIGRP является проприетарным и реализован только на оборудовании Cisco, что накладывает определенные ограничения на его применение в низкоорбитальной сети спутниковой связи.

Таким образом, очевидно, что наиболее подходящим для использования в низкоорбитальных спутниковых сетях связи из рассмотренных протоколов динамической маршрутизации является протокол OSPF. Однако и его использование в том виде, в котором он существует сейчас, невозможно. Необходима разработка нового или доработка существующего протокола динамической маршрутизации с учетом ограничений и требований, обусловленных особенностями их применения в низкоорбитальных спутниковых сетях связи.

Список литературы

1. Макаренко С. И. Время сходимости протоколов маршрутизации при отказах в сети // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 2. С. 45–98.
2. Шардаков К. С., Корбаков А. И., Красновидов А. В. Сравнение протоколов динамической маршрутизации IS-IS и OSPF // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 2. С. 22–28.
3. Griffin T. G., Premore B. J. An Experimental Analysis of BGP Convergence Time // 9th International Conference on Network Protocols (ICNP 2001). 2001. С. 53–61.
4. Griffin T. G., Wilfong G. An Analysis of BGP Convergence Properties // ACM SIGCOMM Computer communication Review. 1999. № 29 (4). С. 277–288.
5. Паркер Т., Сиан К. TCP/IP. Для профессионалов. 3-е изд. СПб.: Питер, 2004. 859 с.
6. Макаренко С. И. Описательная модель системы спутниковой связи Iridium // Системы управления, связи и безопасности. 2018. № 4. С. 1–34.
7. Gavish B., Kalvenes J. The Impact of Intersatellite Communication Links on LEOS Performance // Telecommunication Systems. 1997. № 8. С. 159–190.