

## Протоколы динамической маршрутизации и коммутации, метод построения сети связи для нужд ракетно-космической отрасли

**В. А. Селифанов**, к. т. н., [selifanov.va@spacecorp.ru](mailto:selifanov.va@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**В. В. Мартыненко**, [martynenko.vv@spacecorp.ru](mailto:martynenko.vv@spacecorp.ru)

АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** При построении систем связи и передачи данных (ССПД) в рамках развития ракетно-космической отрасли в процессе реализации опытно-конструкторских работ создают индивидуальные СПД с низким уровнем заимствования и унификации. Целью данной статьи является разработка комплексного метода решения проблемы динамической оптимизации систем связи и передачи данных.

Для решения локальных задач на одном объекте дополнительно создаются новые узлы связи, покупаются или заимствуются каналы связи, которые функционируют в рамках своих информационных систем, что приводит к росту неоправданных затрат. Создание единой сети передачи данных с динамической маршрутизацией позволит оптимизировать затраты и решить проблемы отсутствия четко выраженной топологии сети передачи данных, оперативного выбора кратчайшего пути между узлами сети, избежать образования петель в маршрутизации и возникновения пересечения адресных пространств внутри сетей комплексов технических средств и предприятий ракетно-космической промышленности, обеспечить комплексирование созданных информационных систем с модернизируемыми.

Для решения проблем оптимизации сети передачи данных предлагается использовать комплексный метод с применением протоколов динамической маршрутизации OSPF, MP-BGP и технологии MPLS. Данный метод дает возможность организовать виртуальные распределенные сети на базе единой физической сети, исключая их взаимное влияние друг на друга, и обладает рядом преимуществ. Оптимальное комплексирование повысит надежность проектных решений.

**Ключевые слова:** комплексный метод, OSPF, MP-BGP, динамическая маршрутизация, MPLS

## Protocols of Dynamic Routing and Switching, a Method for Construction of a Communication Network for the Needs of the Rocket and Space Industry

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

**Abstract.** During the construction of communication and data transmission systems (CDTS) as a part of the development of the rocket and space industry in the course of R&D work one creates individual CDTS with a low level of borrowing and unification.

In order to solve local problems, new communication nodes are additionally created at one site, and communication channels are bought or borrowed, which operate within the framework of their information systems. This increases unnecessary costs. The creation of a single data network will optimize the costs of the company.

The purpose of this article is to familiarize specialists of rocket and space industry organizations with methods of solving the problem of dynamic optimization of CDTS.

The sources of the problem are:

- Absence of a clear topology of data transmission system;
- Need to quickly select the shortest path between network nodes;
- Possibility to form loops in routing;
- Intersection of address spaces within networks of hardware complexes and space-rocket industry enterprises;
- Integration of created information systems with the ones that can be modernized.

In order to solve the problem of dynamic optimization of the data network, it is proposed to use an integrated approach using OSPF, MP-BGP, dynamic routing protocols, and the *MPLS* technology.

This approach allows creating dedicated virtual distributed networks based on a single physical network eliminating their mutual influence on each other.

Optimal integration will increase the reliability of design solutions.

**Keywords:** complex method, OSPF, MP-BGP, dynamic routing, *MPLS*

В настоящее время спецификой ракетно-космической отрасли является то, что в ней отсутствует единое масштабируемое информационное пространство для обеспечения информационного обмена между различными группами специалистов за счет предоставления им коллективного доступа к необходимым сетевым сервисам, различным приложениям и отраслевым информационным системам. Отсутствие единого информационного пространства снижает темпы разработки новых изделий и ограничивает возможности взаимодействия сотрудников организаций ракетно-космической промышленности. Кроме того, при создании сетевой инфраструктуры наземных измерительных комплексов часто возникает необходимость создавать отдельные сети передачи данных из-за отсутствия технической возможности использовать существующие.

Таким образом, при проектировании единой сети передачи данных между организациями ракетно-космической промышленности, измерительными пунктами и другими организациями и средствами, участвующими в информационном обмене внутри отрасли, возникает ряд проблем, требующих решения.

Исторически сложилось, что для управления космическими аппаратами строились отдельные независимые комплексы, предусматривающие полный спектр необходимых средств: средства связи, наблюдения и обработки информации. Использование этих ресурсов в иных комплексах зачастую требовало значительной модернизации и внесения изменений в режимы их работы, что зачастую становилось более затратным, чем создание новых, поэтому разработчики предпочитали строить системы полностью под свои нужды. Например, существуют комплексы, в которых маршрутизация осуществляется программными средствами самостоятельно, путем замены шлюза по умолчанию в широкополосной сети, что накладывает ограничения на используемые каналы передачи данных. Отдельные комплексы требуют гарантированной скорости передачи данных, что при отсутствии средств управления потоком трафика делает невозможным совместное использование каналов передачи данных.

Кроме того, в документе RFC 1918 выделены определенные диапазоны IP-адресов для использо-

вания в частных IP-сетях, что нередко приводит к пересечению адресных пространств различных комплексов.

При этом значительная часть измерительных пунктов располагается в удаленных труднодоступных местах, что делает необходимостью совместное использование каналов передачи данных, т.к. строительство дополнительных линий потребует чрезмерно больших затрат.

В подобных условиях целесообразно применять технологию *MPLS (Multiprotocol Label Switching)*, которая строится на базе IP-сетей и протоколов динамической маршрутизации, комбинирует их преимущества и предоставляет универсальную среду для построения независимых разнородных сетей, использование которой не требует доработки абонентских технологий обработки информации и средств передачи данных.

На основе технологии *MPLS* реализуется возможность построения независимых виртуальных сетей с независимой адресацией в двух вариантах:

- *MPLS L3 VPN*. Позволяет создавать виртуальные изолированные сети 3 уровня модели OSI с произвольным количеством подключений.
- *MPLS L2 VPN*. Позволяет создавать виртуальные подключения 2 уровня: как точка-точка, так и точка-многоточка.

Данная технология успешно применяется крупными операторами связи для предоставления услуг клиентам, однако построение сети связи только на основе сетей операторов ограничивается наличием специфических требований надежности и безопасности в ракетно-космической отрасли, не допускающих применение общедоступных каналов передачи данных без резервирования и использования сертифицированных средств защиты информации, а также предусматривающих собственный контроль над такими средствами.

Описание функционирования технологии *L2 VPN* достаточно объемно и выходит за рамки данной статьи, подробно этот вопрос рассматривается авторами А. Б. Гольдштейном и Б. С. Гольдштейном [1].

В своей книге В. Олифер и Н. Олифер [2] исчерпывающе описали изменения, которые произошли в области развития сетей за последнее время.

Т а б л и ц а. Сравнение протоколов динамической маршрутизации

|                            | OSPF                                      | IS-IS              | iBGP               |
|----------------------------|---|--------------------|--------------------|
| Тип протокола              | Link-State/IGP                            | Link-State/IGP     | Distant-Vector/EGP |
| Скорость сходимости        | Высокая                                   | Высокая            | Средняя            |
| Уровень                    | Сетевой                                   | Канальный          | Прикладной         |
| Фильтрация маршрутов       | Поддерживает на граничных маршрутизаторах | Не поддерживает    | Поддерживает       |
| Административная дистанция | 110                                       | 115                | 200                |
| Объем служебного трафика   | Низкий                                    | Низкий             | Низкий             |
| Балансировка нагрузки      | Одинаковые метрики                        | Одинаковые метрики | Различные метрики  |
| Бесклассовая адресация     | Поддерживает                              |                    |                    |

Очень подробно разъяснены принципы работы аппаратного и программного обеспечения компьютерных сетей различного типа известными экспертами в области информационных технологий Э. С. Таненбаумом, Д. Уэзероллом [3].

Интересную информацию о взаимосвязи маршрутизации и математических методов исследования можно почерпнуть из диссертации кандидата технических наук Д. С. Царева [4].

Для более глубокого понимания проблематики целесообразно ознакомиться с трудами авторов из следующих источников [5–9].

Прежде всего стоит отметить, что необходимым условием функционирования *MPLS* является наличие IP-связности между всеми маршрутизаторами, входящими в состав *MPLS*-сети. Применять для этого возможно как статическую, так и динамическую маршрутизацию, однако в связи с территориальной распределенностью узлов такой сети, наличием резервирования и использованием различных типов каналов связи у нее не будет четко выраженной топологии, что дает предпосылки к образованию петель и усложняет выбор кратчайшего пути между ее узлами. Решается эта проблема с использованием протоколов динамической маршрутизации. При рассмотрении используемых на сегодня протоколов динамической маршрутизации, сразу следует исключить проприетарные протоколы зарубежных компаний в связи с политикой импортозамещения. Из оставшихся протоколов наибольшее распространение получили OSPF, IS-IS и BGP.

В нашем случае для организации сетевой связности наилучшим образом подходит протокол OSPF, так как он основан на алгоритме состояния сетевых соединений и обладает высокой скоростью сходимости. При выборе маршрута используется метрика, основанная на пропускной способности соединения, а наилучший путь выбирается на дереве кратчайших путей, построенных с помощью алгоритма Дейкстры.

Остановимся подробнее на базовых определениях *MPLS*, а также дадим краткое описание функционирования *MPLS L3 VPN*.

*MPLS* — технология коммутации по меткам. В данной технологии решение о направлении пакета в определенный интерфейс принимается маршрутизатором на основании метки — короткого идентификатора, который добавляется между заголовком пакета и заголовком кадра протокола канального уровня. Меток может быть несколько, в этом случае они формируют стек.

На любом маршрутизаторе *MPLS* для каждой входящей метки в таблице маршрутизации *FIB* (*Forwarding Information Base*) существует определенная исходящая метка. Каждый маршрутизатор *MPLS*, принимая пакет, удаляет установленную (входящую) метку и при передаче следующему узлу добавляет новую (исходящую). Таким образом пакет передается от маршрутизатора к маршрутизатору до узла назначения, где метка окончательно удаляется и пакет подвергается дальнейшей обработке.

Маршрутизаторы, участвующие в коммутации пакетов по меткам, называются *LSR (Label Switch Router)*, маршрут следования пакетов по меткам называется *LSP (Label Switch Path)*.

Таким образом, чтобы сформировать *LSP*, все *LSR* должны заполнить свои таблицы маршрутизации метками.

Механизм распространения меток по сети *MPLS* основывается на протоколе *LDP (Label Distribution Protocol)* и понятии *FEC (Forwarder Equivalence Classes)*, который представляет собой некую характеристику пакетов, соответствующих определенному *LSP*. То есть все пакеты с одинаковым *FEC* будут направляться по одному *LSP*. В наиболее простом случае *FEC* представляет собой IP-адрес или префикс сети.

Каждый *LSR* распространяет между своими соседями перечень *FEC*, доступных через него, и получает от соседних *LSR* аналогичные сообщения. Для каждого *FEC* *LSR* выделяет уникальную метку, после чего сообщает *FEC* и выделенную метку своим соседям. *LSR*, получивший сообщение от соседа, сохраняет в своей таблице меток полученные данные, интерфейс, через который получено сообщение, выделяет собственную метку для данного *FEC* и передает остальным соседям сообщение с *FEC* и новой меткой.

Передача пакета по *LSP* производится только на основании верхней метки стека; остальные метки, а также содержимое пакета передаются без изменений. Такое поведение позволяет после снятия верхней метки на конечном *LSR* подвергать пакет дополнительной обработке. На этом и базируется технология *MPLS L3VPN*.

Для реализации отдельных *VPN* используются так называемые виртуальные маршрутизаторы. Различные производители телекоммуникационного оборудования называют их по-разному, но суть от этого не меняется. В рамках данной статьи используем термин *VRF (Virtual Routing and Forwarding instance)*. *VRF* — сущность, фактически представляющая собой виртуальный маршрутизатор. Так, для каждой *VPN*, организованной в сети *MPLS*, создается отдельный *VRF*, выполняющий независимую от других *VRF* маршрутизацию.

Когда интерфейс граничного *LSR* назначается конкретному *VRF*, для него создается метка *MPLS*,

после чего созданная метка и подсети, сопоставленные данному интерфейсу, а также адрес *LSR* распространяются в *MPLS*-сети.

При обмене пакетами маршрутизатор, через который пакет попадает в *MPLS*-сеть, называется *Ingress LSR*, а маршрутизатор, через который пакет покидает ее, — *Egress LSR*.

*Ingress LSR*, получив пакет, находит в таблице маршрутов *VFR* необходимую запись и добавляет в стек меток метку, соответствующую нужному маршруту. После чего находит в таблице меток *FEC*, соответствующий адресу *Egress LSR* и добавляет в стек соответствующую ему метку (транспортную метку), после чего отправляет пакет в соответствующий интерфейс.

Далее пакет следует по *LSP* до *Egress LSR*, который, определив, что пакет предназначен ему, снимает транспортную метку и обнаруживает под ней еще одну метку, в соответствии с этой меткой он направляет пакет в нужный интерфейс.

Из приведенного описания очевидно, что инкапсуляция пакетов протоколов верхнего уровня в пакеты *MPLS*, а также использование сертифицированных средств защиты информации ограничивает допустимые размеры пакетов, передаваемых по такой сети.

Для определения допустимых размеров пакетов был произведен расчет. Расчет проводился исходя из использования АПКШ «Континент». В случае применения иного средства размеры заголовков пакетов могут быть иными. Размеры заголовков пакетов используемых сетевых протоколов взяты в соответствии со стандартом IEE 802.3, а также RFC 768, RFC 791, RFC3032 и приведены на рис. 1.

Исходя из этих данных размер *MTU* можно рассчитать по формуле:

$$L_{\text{MTU}} = 1500 - (L_{\text{IP}} + L_{\text{UDP}} + L_{\text{OH}} + L_{\text{Eth}} + 4N_{\text{MPLS}} + L_{\text{FCS}}),$$

где  $L_{\text{MTU}}$  — размер *MTU*

$L_{\text{IP}}$  — длина заголовка IP;

$L_{\text{UDP}}$  — длина заголовка UDP;

$L_{\text{OH}}$  — длина заголовка протокола туннелирования (*overhead*);

$L_{\text{Eth}}$  — длина заголовка кадра Ethernet;

$N_{\text{MPLS}}$  — размер стека меток *MPLS*;

| 1500         |               |                   |                    |            |            |        |     |
|--------------|---------------|-------------------|--------------------|------------|------------|--------|-----|
| Заголовок IP | Заголовок UDP | Заголовок туннеля | Заголовок Ethernet | Метка MPLS | Метка MPLS | Данные | FCS |
| 20           | 8             | 70                | 14                 | 4          | 4          |        |     |
| 120          |               |                   |                    |            |            | 1376   | 4   |

Рис. 1. Размеры заголовков пакета

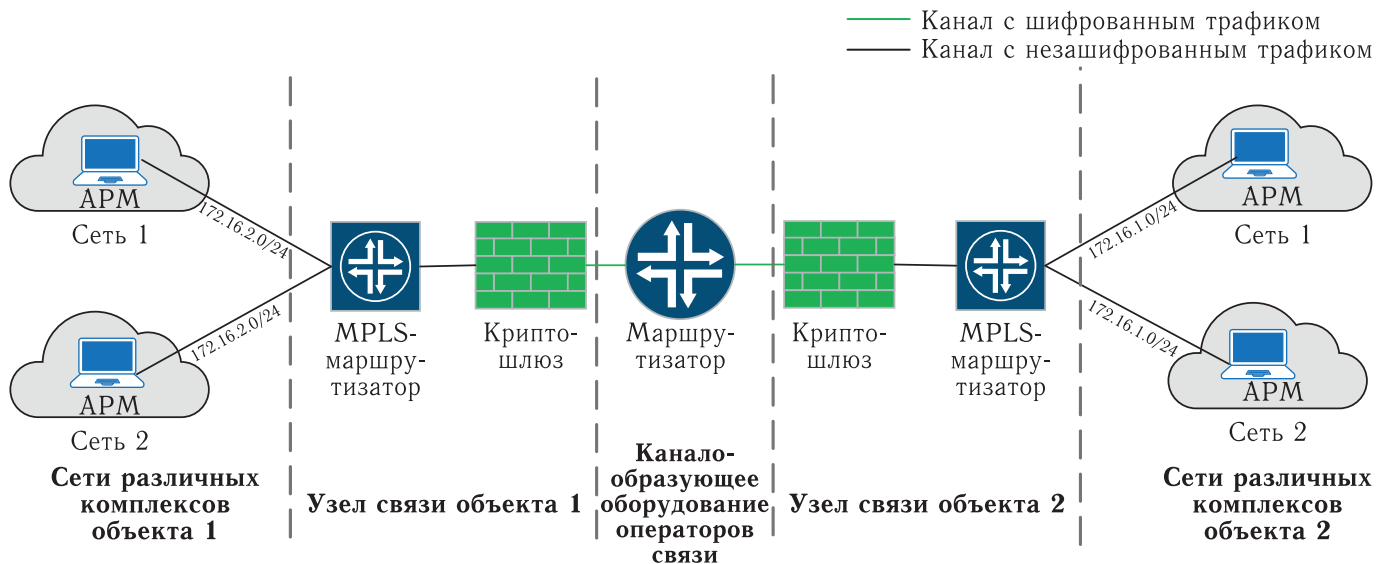


Рис. 2. Схема макета стенда

$L_{FCS}$  — длина поля контрольной суммы Ethernet.

Таким образом, в наложенной защищенной сети размер MTU не должен превышать 1376 байт, это необходимо учитывать при настройке активного сетевого оборудования.

Для распространения маршрутной информации *VRF* между маршрутизаторами используется протокол *MP-BGP*.

Для того чтобы отличать маршруты, принадлежащие различным *VRF*, каждый из маршрутов дополняется уникальным идентификатором *Route Distinguisher (RD)*, идентифицирующим конкретный *VRF*.

Таким образом каждый *Ingress* и *Egress LSR* анонсирует через атрибуты *Extended Community* *MP-BGP* маршруты в виде *Route Target (RT)* — префиксов подсетей, дополненных уникальным идентификатором.

С целью изучения данного метода и подтверждения возможности его применения был собран макет, схема которого представлена на рис. 2. Для имитации сетей объекта с совпадающей адресацией были использованы АРМы, а в качестве арендуемых у операторов или собственных каналов связи — маршрутизатор.

В результате изучения функционирования макета работоспособность предлагаемой схемы полностью подтверждается. Технология *MPLS* полностью функциональна и может применяться для решения поставленных задач.

На сегодняшний день эксплуатируемые в ракетно-космической отрасли системы передачи данных являются набором сетей, использующих метод статической маршрутизации, частично применяющих протокол маршрутизации *OSPF*. Статические системы маршрутизации не могут реагировать на изменения в сети. Они непригодны для



современных крупных, постоянно изменяющихся сетей.

Комплексный подход с использованием динамической маршрутизации дополняет статический метод маршрутизации, при котором маршруты устанавливаются администратором сети и не меняются до тех пор, пока администратор сети не поменяет их вручную.

Предлагаемый метод комплексного подхода с использованием динамической маршрутизации гарантирует качественные характеристики каналов передачи данных. Разделение сетей с использованием технологии *MPLS* позволяет изолировать трафик одной сети от другой, избежать конфликтов IP-адресов и гибко управлять пропускной способностью каждой сети.

## Заключение

Таким образом, метод комплексного подхода включает совместное применение протоколов, *MP-BGP* и технологии *MPLS* при построении единой сети передачи данных для нужд ракетно-космической отрасли. Данный метод позволяет, не привязываясь к определенной топологии, добавлять новые узлы и каналы связи без внесения существенных изменений в конфигурацию оборудования сети. Он дает возможность организовывать отдельные распределенные виртуальные сети для наземных измерительных комплексов и наземных комплексов управления, при этом исключив влияние одной виртуальной сети на другую путем гибкой настройки пропускной способности каждой сети. Это значительно сокращает затраты на организацию связи, так как отпадает необходимость постройки отдельной сети под новые задачи и пропускная способность каналов связи используется более эффективно.

Применение комплексного подхода позволяет:

– уменьшить время перехода на резервный канал при отказе основного канала передачи данных;

– отказаться от строительства индивидуальной физической сетевой инфраструктуры для решения индивидуальных задач при построении единого информационного пространства и управления космическими аппаратами;

– оптимизировать использование ресурсов (оборудования и каналов передачи данных);

– снизить стоимость;

– унифицировать контроль доступа к сетевым ресурсам для нужд ракетно-космической отрасли.

Оптимальное комплексирование повысит надежность проектных решений.

## Список литературы

1. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. Технология и протоколы *MPLS*. СПб.: ВHV–Петербург, 2005. 304 с.
2. Олифер В.Г., Олифер В.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. 6-е изд. СПб.: Питер, 2016. 958 с.
3. Таненбаум Э., Уэзеролл Д. Компьютерные сети. 5-е изд. СПб.: Питер, 2019. 960 с.
4. Царев Д.С. Разработка алгоритма маршрутизации трафика в *MPLS*-сети: дисс. ... канд. тех. наук. Воронеж, 2010. 140 с.
5. Cowley J. Communications and networking. An introduction Second edition. London: Springer-Verlag, 2012. 251 p.
6. Minei I., Lucek J. MPLS-Enabled Applications: Emerging Developments and New Technologies. Wiley, 3-d edition, 2011. 628 p.
7. Nor Musliza Mustafa. Routing Optimization in OSPF: A Matrix Usage Method for Load Balancing in Shortest Path Routing., LAP LAMBERT Academic Publishing. 2011. 168 p.
8. Rosen E. RFC 8277 Using BGP to Bind MPLS Labels to Address Prefixes. RFC, DOI. 2017.
9. Zhang R., Bartell M. BGP Design and Implementation: Practical guidelines for designing and deploying a scalable BGP routing architecture. Indianapolis: Cisco Press, 2016. 672 p.