

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ТРАНСПОРТНОЙ ПКС

Волков Алексей Станиславович,

НИУ «МИЭТ», доцент кафедры ТКС, к.т.н., Зеленоград, Россия
leshvol@mail.ru

Баскаков Александр Евгеньевич,

НИУ «МИЭТ», преподаватель кафедры ТКС., Зеленоград, Россия
9999924816@ya.ru

Бахтин Александр Александрович,

НИУ «МИЭТ», заведующий кафедрой ТКС, к.т.н., Зеленоград, Россия
bah@miee.ru

Горелик Александр Владимирович,

*РУТ (МИИТ), заведующий кафедрой «Системы управления транспортной инфраструктурой»,
Москва, Россия*
agorelik@yandex.ru

Аннотация

Программно-конфигурируемые сети связи имеют несколько значимых направлений развития: классические ПКС, глобальные ПКС (SD-WAN), транспортные ПКС (T-SDN) и др. В транспортных ПКС актуальна задача управления ресурсами сети, поскольку сети такого уровня работают на базе модели доступности сервиса и должны обладать высоким уровнем надежности. В работе представлен метод, описанный совокупностью расчетных процедур для поочередного управления различными типами ресурсов транспортной ПКС. Основными этапами являются распределение доступных ресурсов IP-уровня между поступающими на обслуживание потоками пакетов с расчетом и формированием сетевой топологии, распределением оптических ресурсов. В качестве ключевого параметра в работе фигурирует суммарное энергопотребление, необходимое для установки нового светового пути.

Ключевые слова

Программно-конфигурируемые сети, управление ресурсами транспортной сети, виртуальная сетевая топология, оптические транспортные сети, наложенные сети.

Введение

Непрерывный рост передаваемого в глобальных сетях трафика делает необходимым развитие и модернизацию сетей связи [9-12]. При этом основным фактором развития является улучшение показателей задержки передачи данных и пропускной способности сегмента сети. Одним из ярких примеров технологий, позволяющим организовывать высокопроизводительные сети связи, является технология программно-конфигурируемых сетей, ключевой особенностью которой является логическое разделение плоскостей исходной сети, то есть отделение задач управления устройствами от передачи потоков данных. Помимо этого, ПКС предусматривает использование центрального управляющего устройства – контроллера, в котором программно реализованы алгоритмы управления подконтрольными сетевыми устройствами и их ресурсами, возможность динамической реконфигурации сети в соответствии с набором требований.

Отдельно стоит отметить результат наложения ПКС на транспортные сети, такой подход не только сохраняет основные функции ПКС сети, но и распространяет их на нижние уровни, в том числе управления физическими ресурсами, например ресурсами оптической сети. Разработка и внедрение такого рода сетей является актуальной задачей, но основным этапом неизменно остается разработка математической основы исследуемой сети связи, процессов распределения ее ресурсов, поиска путей передачи.

Модель распределения ресурсов транспортной ПКС

Транспортные ПКС, как правило, основаны на базе оптических сетей связи с пакетной передачей данных. Такие сети могут быть описаны как мультиуровневые платформы с установленным набором

сетевых технологий и используемых протоколов, при этом множество протоколов имеют реализации под оптические сети, например, многопротокольная маршрутизация по меткам (MPLS), IP и др.

Исходя из концепции программно-конфигурируемых сетей, можно выделить два уровня транспортных ПКС: уровень оптической сети связи и уровень IP-поток, передаваемых поверх оптической сети [1-3].

В концепции ПКС используются абстракции сетевых ресурсов для вышестоящих уровней, для возможности реализации функций централизованного управления сегментом сети связи, исходя из этого утверждения, ресурсы оптической сети связи будут представляться как множество виртуальных каналов передачи данных вышестоящими уровнями, например уровнем IP. При этом виртуальные каналы, для корректности функций управления, должны иметь параметры пропускной способности и задержки передачи данных, доступные для верхних уровней. Детальная же информация о структуре сети доступна лишь оптическому уровню, тогда необходимо разбить изначальную задачу управления и распределения ресурсов транспортной ПКС на две части: управление и распределение ресурсов оптической сети связи и управление набором виртуальных каналов на верхних уровнях (IP). То есть задачи можно трактовать как задачу маршрутизации и назначения оптических поднесущих и классическую задачу маршрутизации с пакетной передачей данных, а также управлением трафиком.

Существующие решения организации программно-конфигурируемых сетей, как правило, базируются на использовании протокола OpenFlow и соответствующих коммутаторов с поддержкой указанного протокола. Такие устройства содержат в себе таблицы переадресации (flowtable) с данными о потоках передаваемой информации, а для реализации функции распределения потоков в сетях связи и передачи их в направлении к управляющему устройству используется FlowVisor – прозрачный прокси-сервер между ПКС коммутаторами и контроллером, являющийся программным компонентом системы.

На основе имеющихся спецификаций, протокол OpenFlow, также имеет функции организации обмена сообщениями между устройствами, например, об изменениях в таблицах адресаций. Формальный вид обмена сообщениями может быть представлен как представлен ниже:

$$F1(T): Out_{sw}(T) \xrightarrow{FV} Inp_{cont}(T) \cup Out_{cont}(T') \xrightarrow{FV} Inp_{sw}(T'),$$

где $F1(T)$ – меняющееся поле в таблице адресаций; $Out_{sw}(T)$ – множество меток пакета T , от нижестоящих устройств к контроллеру; $Inp_{cont}(T)$ – множество меток пакета T , принятых контроллером; $Out_{cont}(T')$ – множество меток пакета T' , исходящие от контроллера; $Inp_{sw}(T')$ – множество модифицированных меток пакета T' , полученного нижестоящим устройством.

При этом логика обработки и внесения изменений в работу сетевых устройств зависит от конкретной реализации ПКС контроллера, именно программная и алгоритмическая реализации функций являются основной аппарата логики изменений в пакеты данных $Inp_{cont}(T)$ и управляющие пакеты $Out_{cont}(T')$.

Неизменным остается принцип формирования нового потока, а именно, необходимость внесения начальных условий. При этом сам процесс формирования управляющего потока может быть описан как последовательность действий, состоящая из несколько этапов. Начальным этапом является перенаправление пакета в направлении к ПКС контроллеру, выполняющееся исключительно в тех случаях, если в имеющихся на ПКС коммутаторе таблицах переадресаций, не обнаружится ни одно совпадения для заданных полей ($Match_j$), содержащих информацию о номере порта, Ethernet адресе источника и получателя, типе Ethernet – пакета, IP-адресе источника и получателя, типе протокола IP, типе обслуживания (ToS).

Важно отметить, что обработка пакета, будет выполнена корректно, в случае использования определенной версии протокола OF на стороне коммутатора и контроллера.

Вторым этапом является обработка пакета контроллером. Формально, сетевую структуру SDN можно задать как граф, который описывается множеством $SDN = \{N, L, F, Md, Mu, S_0\}$, где N – множество элементов сети, L – множество связей между элементами сети i и j и $\{l_{ij}\} \in L$, F – множество отношений переходов элементов сети из множества L , Md – информация управления от SDN-контроллера к нижестоящим устройствам, Mu – обратная информация Md , S_0 – нулевое состояние сети.

Программно-конфигурируемые сети описываются как надежные решения с высокой доступностью, тогда, в общем виде, надежность сети ПКС можно задать как: $R(SDN, p)$ и представить в виде

вершин графа, доступных в момент времени t (все время функционирования сети) с вероятностью p .

Таким образом, необходимым условием для полноценного функционирования ПКС сети, является требование $p \neq 1$. В общем виде, надежность ПКС можно задать системой:

$$R(SDN_i, p) = \begin{cases} \sum_{i=1}^N r_i^{N-1}, & \text{если } SDN_i \text{ имеет} \\ N \text{ доступных вершин: } p \neq 1, \\ 0, & \text{если } C_i \text{ недоступен: } p = 1 \\ \sum_{i=1}^N r_i^{k-1}, & \text{если } p_k = 1 \end{cases}$$

где, SDN – граф сети, C_i – множество элементов контроллера, p – вероятность отказа, r^{N-1} – последовательность достижимых вершин сети $r^1, r^2, r^3 \dots r^{N-1}$.

Третьим этапом является передача уже обработанного пакета к ПКС коммутатору:

$$Translate(t): Out_{cont}(T') = FV(T') \rightarrow Inp_{sw}(T'),$$

где $FV(T')$ – функция, описывающая изменения, вносимые в поля заголовка j -го пакета.

Четвертым этапом является получение коммутатором пакета OpenFlow. Оно осуществляется тем портом, который указывается в заголовке $Match_j$, не претерпевающим изменений. Основываясь, на первоначальных параметрах коммутатора, вносится новая запись в таблицу потоков.

Таким образом, телекоммуникационные системы, выполненные на основе концепций программно-конфигурируемых сетей, представляют сложную многоуровневую систему, содержащую в себе не только распределение уровней передачи данных, отделенное от уровня управления, с централизованным управлением, но и ряд механизмов, которые позволяют виртуализировать тракты передачи управляющей информации. В этом заключается основная сложность реализации таких сетей.

Но помимо программных реализаций технологии, на конечный функционал влияет и алгоритм принятия решений. Так как концепция ПКС направлена на динамический характер управления сетевыми ресурсами, то ее отдельные компоненты требуют строгого математического обоснования.

При этом задачи управления ресурсами оптической сети и распределении ресурсов IP-топологии взаимосвязаны. Так, структура световых путей имеет прямое влияние на пропускную способность IP-уровня и принципы маршрутизации.

Определенное концепцией ПКС требование относительно динамического и оптимального характера управления транспортными ресурсами пакетной оптической сети предполагает строгую математическую формализацию и оптимизационную постановку данной задачи. Стоит обратить внимание на модели сети, представленные в виде дифференциально-разностных уравнений состояний, такие модели успешно применяются для решения задач маршрутизации на уровне IP-сети, рассматривая ее как задачу распределения канальных и буферных ресурсов между поступающими на обслуживание потоками IP-пакетов.

Процесс информационного обмена на уровне IP может быть описан формулой: [4-6]:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{l=1}^{N'} b_{i,l}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^j(k) + \sum_{m=1}^{N'} b_{m,i}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $i, j = \overline{1, N'}$, $i \neq j$; $\Delta t = t(k+1) - t(k)$; $x_{i,j}(k)$ – объем данных на устройстве i , предназначенный для передачи устройству j во времени t ; $u_{i,l}^j(k)$ – управляющая переменная, указывающая на долю пропускной способности между устройствами i и j ; $b_{i,l}(k)$ – пропускная способность пути i - j ; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k) \Delta t$ – объем сетевой нагрузки от i к j ; $\zeta_{i,j}(k)$ – интенсивность нагрузки; N' – число устройств.

На верхнем уровне накладывается ограничение, связанное с максимально допустимой длиной очереди на сетевом устройстве, тогда справедливы уравнения:

$$0 \leq x_{i,l}(k) \quad \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N'} x_{i,l}(k) \leq x_i^{max} \quad (2)$$

$$0 \leq u_{i,l}^j(k) \leq 1 \quad \sum_{n=1}^{N'} u_{i,l}^j(k) \leq 1, \quad (3)$$

где, x_i^{max} – максимально допустимая длина очереди на i -м устройстве.

Основное отличие модели, описываемой в формулах (1)-(3) выражено в переменных $b_{i,j}(k)$, описывающих пропускные способности каналов связи между устройствами уровня IP-сети. При этом на нижних уровнях каналы связи представляют собой установленные световые пути между конкретными парами мультиплексоров на оптическом уровне.

Следующим шагом является расчет пропускных способностей световых потоков, описанных с использованием переменных $b_{i,j}(k)$, что соответствует требованиям формирования обслуживаемых потоков данных, значит и формированию световых путей. Через переменные $b_{i,j}(k)$, происходит первичное определение топологии сети верхнего уровня. Значит, указанные переменные можно использовать и в роли исходных данных.

Тогда, можно использовать модель, описываемая формулами (1)–(3), для распределения буферных и канальных ресурсов, по сути являющихся виртуальными в рамках верхнего уровня, между набором существующих сетевых потоков. Вышеуказанное справедливо при наличии известных параметров пропускных способностей каналов передачи данных между устройствами. Также модель может быть использована для формирования новой виртуальной сетевой топологии с выделением достаточного объема вычислительных и сетевых ресурсов для последующей обработки существующих сетевых потоков с требуемыми параметрами качества обслуживания, например, пропускной способности и задержки передачи данных.

При использовании такого необходимо найти значения переменных, описывающих объемы данных, передаваемые через указанный сегмент сети, управляющие переменные, являющиеся указателем на используемую долю пропускной способности канала передачи данных, и переменные, указывающие на пропускную способность сегмента сети связи. При этом сам процесс формирования световых путей может быть описан в рамках линейной модели, представленной ниже:

$$\sum_{\substack{n=1 \\ n \neq m}}^N \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} c^w w_{i,j}^{l,m,n}(k) - \sum_{\substack{g=1 \\ g \neq m}}^N \sum_{l=1}^{N_{g,n}^w} c^w w_{i,j}^{l,g,n}(k) = \begin{cases} f_{i,j}(k), & \text{if } m = i; \\ 0, & \text{if } m \neq i, j; \\ -f_{i,j}(k), & \text{if } m = j; \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{\substack{l=1 \\ j \neq i}}^{N_{m,n}^w} w_{i,j}^{l,m,n}(k) \leq N_{m,n}^w, \quad \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N w_{i,j}^{l,m,n}(k) \leq 1 \quad (5)$$

$$f_{i,j}(k) \geq b_{i,j}^{req}(k), \quad (6)$$

где, $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$ – может иметь только одно значение при использовании одной поднесущей оптического канала для создания светового пути между устройствами i и j на временном интервале k ; c^w – пропускная способность конкретной оптической поднесущей; N – общее количество используемых мультиплексоров оптической сети; $N_{m,n}^w$ – количество используемых оптических поднесущих в канале передачи данных от m до n ; $f_{i,j}(k)$ – параметр пропускной способности формируемого светового пути между двумя устройствами; $b_{i,j}^{req}(k)$ – заданный параметр необходимой пропускной способности для светового пути между устройствами i и j [7-8].

В соответствии с набирающей обороты концепцией уменьшения количества потребляемой электроэнергии, в том числе в концепции GreenSDN, указывающей на возможность минимизации энерго-

затрат на передачу данных через ПКС без потери функционала и/или без ухудшения параметров передачи данных, введем новый критерий оптимальности для управления ресурсами оптической сети, а именно, минимум потребляемой сетью связи электроэнергии. Тогда, выразим общее количество потребляемой электроэнергии через зависимость используемых для передачи данных устройств и способом наложения пакетной сети передачи данных поверх оптических соединений.

При использовании архитектуры IPoverWDM (IPoDWDM), описывающей функции установления световых путей только на оптическом уровне, без использования устройств транзитных «маршрутизаторов», также представленных в виде ПКС-коммутаторов. Технология IPoDWDM может быть использована на сетевых устройствах коммутаторах и маршрутизаторах с поддержкой стандарта ITU-T G.709. При таком подходе устройства могут контролировать установленные оптические пути передачи данных с внедрением транспортного функционала на основе технологии FEC (коррекция ошибок передачи), описываемой в стандартах ITU-T G.709/Y.1331 или SuperFec из стандарта ITU-T G.975.1. Тогда возможно применение целевой функции вида:

$$P_{\Sigma}(k) = P_r(k) + P_{IP}(k) + P_0(k) + P_{am}(k) \rightarrow \min, \quad (7)$$

$$P_r(k) = 2E_{ir} \sum_{i=1}^{N'} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N'} V_{i,j}(k), \quad (8)$$

$$P_{IP}(k) = E_0 \sum_{i=1}^{N'} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N'} \left[\sum_{l=1}^{N'} b_{i,l}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,j}^l(k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N'} b_{m,i}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k) \right], \quad (9)$$

$$P_0(k) = E_0 \sum_{i=1}^{N'} \sum_{\substack{j \\ j \neq i}}^{N'} \left(V_{i,j} + \sum_{\substack{m \\ n \neq m}}^N \sum_{n,l}^N \sum_{m,q}^{N_{m,q}^w} W_{i,j}^{l,m,n}(k) \right), \quad (10)$$

$$P_{am}(k) = E_{am} \sum_{\substack{m \\ n \neq m}}^N \sum_n^N A_{m,n} N_{m,n}^F, \quad (11)$$

где, $P_r(k)$, $P_{IP}(k)$, $P_0(k)$, $P_{am}(k)$ – мощности, потребляемые оптическими транспондерами, ПКС-коммутаторами на IP-уровне, оптическими компонентами сети связи и линейными усилителями на протяжении всего интервала управления подконтрольным сегментом сети связи; $V_{i,j}(k)$ – общее количество установленных между устройствами i и j световых путей; E_{ir} , E_{IP} , E_0 , E_{am} – параметры номинального электропотребления телекоммуникационного оборудования по техническому паспорту конкретного устройства; $N_{m,n}^F$ – количество используемых оптических волокон в канале передачи данных уровня оптической сети; $A_{m,n}$ – общее число усилителей в оптическом канале передачи.

В используемой модели присутствуют ограничения (1), тогда исходная задача имеет нелинейный характер, что с точки зрения реализации функций управления ресурсами сегмента ПКС должно обеспечивать возможность нахождения решения, приводящего к улучшению параметров сети связи в конкретный момент времени. Тогда возможно разбиение исходной задачи на несколько подзадач, а именно, задачи управления вычислительными и сетевыми ресурсами верхнего уровня, задача формирования требований к виртуальной топологии верхнего уровня, задача формирования виртуальной топологии на основе требований путем распределения оптических поднесущих между существующими заявками и последующим установлением световых путей для передачи данных через тестируемый сегмент транспортной ПКС сети.

Задачи верхнего уровня, а именно распределение ресурсов имеющейся виртуальной сети связи между поступающими на обслуживание потоками данных может быть описана в рамках решения задачи минимизации при существующих ограничениях (1)-(3), тогда в качестве исходных переменных примем маршрутные переменные $u_{i,j}^j(k)$, в качестве исходных данных используем структуру виртуальной топологии верхнего уровня, представленную как совокупность переменных пропускной способности соединений и объемов передаваемого трафика, $b_{i,j}^*(k)$ и $y_{i,j}^*(k)$ соответственно.

Поскольку виртуальная топология верхнего уровня не является статичной, то требуется периодический перерасчет управляющих переменных. При этом период перерасчета выражен через переменную Δt , при этом численное значение периода может быть изменено в соответствии с динамикой поступающих на обслуживание потоков данных, причем период перерасчета должен быть обратно пропорционален потоку данных. Следующим шагом являлось формирование требований к виртуальной топологии верхнего уровня, что может быть описано как задача минимизации (7) по переменным $u_{i,j}^j(k)$ и $b_{i,j}^*(k)$, то есть исходная подзадача фактически может быть приведена к задаче обновления виртуальной топологии через расчет переменных $b_{i,j}^{req}(k)$. Тогда результирующее значение отражает требования к количеству необходимых световых путей, установленных между парами ПКС-коммутаторов и пропускным способностям найденных световых путей.

Поскольку описанное решение не учитывает исходной задачи обеспечения выполнения требований качества обслуживания, предъявляемых для сетевого потока, в модель (1)-(3) должны быть введены дополнительные ограничения.

Заключение

В работе представлены основные положения и этапы разработки математической модели транспортной ПКС. На основе представленного математического аппарата систем массового обслуживания разработаны методы формирования виртуальных сетевых топологий.

Представленная математическая модель сегмента транспортной программно-конфигурируемой сети связи может быть использована для расчета требований, необходимых для формирования виртуальной топологии сети связи, на верхних уровнях, а именно, в контексте исходной задачи – виртуальной топологии IP-сети.

На основе полученных результатов возможно проведение первичной оценки параметров проектируемой системы связи, в том числе с учетом затраченных энергозатрат, как общих, так и отдельно по оптическим компонентам: транспондерам, мультиплексорам, каналами связи. При этом учтены параметры задержки передачи данных на установление световых путей, передачи сетевых пакетов и их обработки на верхних уровнях сети. Указанные параметры являются актуальными в рамках разработки или проектирования систем связи с использованием критичных к задержкам, например сетей мобильной связи пятого поколения, а также применимы к сетям с использованием концепций энергоэффективных систем, например программно-конфигурируемой беспроводной сенсорной сети.

Литература

1. Дышленко С. Г. Маршрутизация в транспортных сетях // ИТНОУ: информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. №. 1 (5).
2. Thyagaturu A. S. et al. Software defined optical networks (SDONs): A comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2016. Т. 18. №. 4. С. 2738-2786.
3. Baskakov A. E. et al. Development of a Mathematical Model of Software-defined Network Segment // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus). IEEE, 2020. С. 1689-1693.
4. De Souza F. R. et al. QoS-aware virtual infrastructures allocation on SDN-based clouds // 2017 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID). IEEE, 2017. С. 120-129.
5. Oki E., Iwaki A. Load-balanced IP routing scheme based on shortest paths in hose model // IEEE Transactions on Communications. 2010. Т. 58. №. 7. С. 2088-2096.
6. Shen G., Tucker R. S. Energy-minimized design for IP over WDM networks // Journal of Optical Communications and Networking. 2009. Т. 1. №. 1. С. 176-186.
7. Papagiannaki K. et al. Measurement and analysis of single-hop delay on an IP backbone network // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2003. Т. 21. №. 6. С. 908-921.

8. *Montazerolghaem A., Yaghmaee M. H.* Load-balanced and QoS-aware Software-defined Internet of Things // IEEE Internet of Things Journal. 2020. Т. 7. № 4. С. 3323-3337.
9. *Кузнецов В.С., Волков А.С., Солодков А.В., Дорошенко В.А.* Разработка системы синхронизации на основе сложных широкополосных сигналов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 5. С. 4-14.
10. *Волков А.С., Бахтин А.А., Шалягин Д.В., Угроватов А.В., Волкова Е.А.* Применение протокола TCP в мобильных самоорганизующихся сетях AD HOC, основанных на широкополосных сигналах // Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов. 2019. Т. 10. № 1. С. 4-10.
11. *Кузнецов В.С., Волков А.С., Быков А.В.* Разработка и моделирование метода декодирования помехоустойчивого блокового кода с применением второго алгоритма Чейза // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 5. С. 46-55.
12. *Волков А.С., Лазарев А.В.* Исследование методов декодирования полярных кодов для систем мобильной связи пятого поколения // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2018. Т. 8. № 2. С. 82-86.