

Алгоритм управления ресурсами транспортной программно-конфигурируемой сети связи

Баскаков А.Е.*, Волков А.С.**

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», площадь Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498, Россия

**e-mail: 79999924816@ya.ru*

***e-mail: leshvol@mail.ru*

Статья поступила 26.11.2020

Аннотация

Программно-конфигурируемые сети связи, активно развивающиеся в настоящий момент, имеют несколько значимых направлений развития: классические ПКС, программно-конфигурируемые глобальные сети (SD-WAN), транспортные ПКС (T-SDN) и др. Именно в транспортных ПКС актуальна задача непосредственного управления ресурсами контролируемой сети, поскольку сети такого уровня работают на базе модели доступности сервиса и должны обладать высоким уровнем надежности, в том числе, при возникновении непредвиденных сбоев сети связи.

В работе представлен алгоритм, содержащий в себе совокупность расчетных процедур, связанных с поочередным управлением различными типами ресурсов транспортной программно-конфигурируемой сети, связанных единой целевой функцией. Основными этапами разработанного алгоритма являются распределение доступных ресурсов IP-уровня между поступающими на обслуживание потоками

пакетов с последующим расчетом и формированием необходимой сетевой топологии, распределением физических (оптических) ресурсов. В качестве ключевого параметра в работе фигурирует суммарное энергопотребление, необходимое для установки нового светового пути, в зависимости от интенсивности поступающих на обслуживание сетевых пакетов.

Ключевые слова: программно-конфигурируемые сети, управление ресурсами транспортной сети, виртуальная сетевая топология.

Введение

Транспортные ПКС представляют собой результат наложения активно развивающейся концепции централизованного управления сетевыми ресурсами на транспортные реконфигурируемые пакетные сети, в том числе оптические. При этом основные параметры и принципы ПКС не только сохраняются, но и распространяются на нижележащие уровни, в том числе на уровень управления физическими ресурсами.

Ключевой особенностью ПКС является отделение задач управления от функций непосредственной передачи потоков данных, то есть логическое разделение плоскостей сети, а также программная реализация алгоритмов управления сетевыми ресурсами, возможность динамической реконфигурации сети в соответствии с существующими или спрогнозированными требованиями.

Таким образом, концепция SDN предполагает централизованное динамическое оптимальное управление транспортной сетью, включая в себя все типы ее ресурсов: каналные, физические, информационные, буферные. Описанные факторы предполагают формализацию процесса принятия управляющих решений. Вычислительные ресурсы, которые закладываются для реализующих функции управления ПКС–контроллеров, позволяют применять для формализации задач управления, класс более сложных, но многоэффективных динамических моделей.

Основным этапом, предоставляющим возможность разработки решений по управлению ресурсами сети связи, равно как и сетевых протоколов, реализующих их работу, является разработка математической базы исследуемой сети связи, процессов распределения ресурсов, расчета необходимых путей, в том числе с использованием имеющихся разработок из области классических телекоммуникационных сетей, программно-конфигурируемых сетей, сетей связи беспилотных летающих аппаратов или самоорганизующихся сетей связи [1-3].

Модель управления ресурсами транспортной программно–конфигурируемой сети

В основе транспортных ПКС, лежат пакетные оптические сети, которые представляют собой многоуровневые платформы с применением совокупности различных сетевых технологий и протоколов, например, MPLS, IP, WDW, и других, среди которых можно выделить два уровня: уровень реконфигурируемой оптической сети, уровень передаваемых поверх оптической сети IP–потоков [4].

Следуя принципам концепции ПКС, ресурсы оптической сети с точки зрения вышестоящего уровня (IP), будут рассматриваться как набор виртуальных трактов передачи, имеющих определенную пропускную способность, при этом, вся детальная информация о структуре, будет доступна лишь нижележащему оптическому уровню. Такой подход позволит выделить в рамках задачи управления ресурсами пакетной оптической сети две подзадачи:

- управление ресурсами оптической сети с целью создания виртуальной IP-топологии путем установления определенной совокупности световых путей в соответствии с требованиями вышестоящего IP-уровня (задача маршрутизации и назначения оптических несущих);
- управление пулом виртуальных канальных ресурсов на IP-уровне с целью обслуживания потоков пакетов (традиционная задача IP-маршрутизации и управления трафиком).

В настоящее время существуют решения, предоставляющие возможность технической реализации описанного подхода. В функции виртуальных коммутаторов Open Transport Switch на базе протокола OpenFlow включены мониторинг и выделение ресурсов на уровнях пакетной и оптической сетей, что обеспечивает возможность виртуализации ресурсов транспортной ПКС [5].

Основная сложность заключена не в способе реализации, а в самом алгоритме принятия решений. Так как концепция программно-конфигурируемых сетей ориентируется на динамический и оптимальный характер управления всеми типами

сетевых ресурсов, то требует строгого математического обоснования. Следует учитывать, что задачи управления ресурсами оптической сети и распределении ресурсов вышестоящей виртуальной IP–топологии тесно связаны друг с другом. Структура световых путей определяет пропускную способность на IP–уровне и, как следствие, порядок маршрутизации трафика. С другой стороны, именно порядок распределения виртуальных ресурсов будет определять требования к создаваемой на оптическом уровне виртуальной топологии.

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.

Представим совокупность следующих выражений для описания процесса информационного обмена на уровне IP–сети [6]:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{N^j} b_{i,l}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^j(k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N^j} b_{m,i}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k), \quad (1)$$

где $i, j = \overline{1, N^\gamma}$, $i \neq j$; $\Delta t = t(k+1) - t(k)$; $x_{i,j}(k)$ – объем данных маршрутизатора i , для передачи маршрутизатору j во время t ; $u_{i,l}^j(k)$ – переменная управления, или доля пропускной способности между маршрутизатором i и маршрутизатором j , для передачи входных данных заданных с адресом j ; $b_{i,l}(k)$ – пропускная способность маршрута i - j ; $y_{i,j}(k) = \zeta_{i,j}(k)\Delta t$ – объем нагрузки, от маршрутизатора i к маршрутизатору j ; $\zeta_{i,j}(k)$ – интенсивность нагрузки; N^γ – число маршрутизаторов.

На уровне IP–сети на них будет накладываться ряд ограничений, связанный с максимально допустимыми длинами очередей на маршрутизаторе [7]:

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

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

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

Отличие модели (1) – (3) связано с ролью переменных $b_{i,j}(k)$, отражающих пропускные способности трактов передачи между маршрутизаторами IP–сети. При этом физически тракты передачи представляют световые пути, установленные между определенными парами мультиплексоров ввода/вывода на оптическом уровне.

Формирование светового пути должно отвечать требованиям обслуживаемых потоков данных, то есть структура и пропускные способности световых путей, формализуемые через переменные $b_{i,j}(k)$, подлежат расчету. Через $b_{i,j}(k)$, определяется

виртуальная топология IP–сети, физически обеспечиваемая за счет коммутации световых волн на оптическом уровне. Следовательно, эти переменные могут выступать в качестве исходных данных, так и в качестве исходных переменных [8].

Тогда, модель (1)–(3) может быть использована, для распределения доступных на этом уровне буферных и виртуальных канальных ресурсов между множеством обслуживаемых потоков IP–пакетов, при известных пропускных способностях трактов передачи, а также для формирования виртуальной топологии, обладающей достаточными ресурсами для обслуживания IP–потоков с заданными показателями качества обслуживания.

При этом искомыми будут переменные объема данных, управляющая переменная и переменная пропускной способности сети. Управляющая переменная является указателем на используемую долю пропускной способности тракта передачи данных.

Процесс формирования световых путей может быть формализован в рамках линейной модели:

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

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

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

где, $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$ – принимает единичное значение, если на k -м временном интервале управления используется одна несущая в оптическом тракте (m,n) для создания светового пути между маршрутизаторами i и j ; c^w – пропускная способность оптической несущей; N – число мультиплексов ввода/вывода оптической сети; $N_{m,n}^w$ – число оптических несущих в тракте передачи (m,n) ; $f_{i,j}(k)$ – пропускная способность формируемого светового пути (i,j) ; $b_{i,j}^{req}(k)$ –требуемая пропускная способность формируемого светового пути (i,j) [9].

Переменная $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$ отражает процесс назначения оптических несущих с целью установления определенного светового пути. На нее накладывается ряд ограничений, связанный с сохранением потока (4), ограниченным количеством оптических несущих в каждом тракте передачи, каждая из которых может быть использована один раз (5), требованиями связности между маршрутизаторами на уровне IP (6).

Выражения (1)–(6) описывают процесс распределения разнотипных ресурсов пакетной оптической сети, где управляющими являются переменные трех типов: $b_{i,j}(k)$, $u_{i,j}^j(k)$, $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$.

В связи с развивающейся тенденцией энергосбережения в качестве критерия оптимальности управления ресурсами оптических сетей выбран минимум потребляемой сетью электроэнергии.

Потребляемая сетью электроэнергия напрямую связана с количеством задействованных в ней устройств, что в свою очередь, также определяется выбором

способа наложения пакетной сети поверх оптической. Среди всех возможных вариантов, с точки зрения экономии следует обратить внимание на «прозрачную» архитектуру IP–ower–WDM, в которой возможно установление световых путей исключительно на оптическом уровне, без задействования транзитных маршрутизаторов [10]. Тогда, целевая функция примет вид:

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

$$P_{tr}(k) = 2E_{tr} \sum_{i=1}^{N^{\gamma}} \sum_{\substack{j, \\ j \neq i}}^{N^{\gamma}} V_{i,j}(k), \quad (8)$$

$$P_{IP}(k) = E_0 \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N^{\gamma}} \sum_{\substack{j, \\ l \neq i}}^{N^{\gamma}} \left[\sum_{l=1}^{N^{\gamma}} b_{i,l}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,j}^l(k) + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N^{\gamma}} b_{m,i}(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^j(k) + y_{i,j}(k) \right], \quad (9)$$

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

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

где, $P_{tr}(k)$, $P_{IP}(k)$, $P_0(k)$, $P_{am}(k)$ – потребляемые мощности транспондерами, IP–маршрутизаторами, оптическими элементами сети и линейными усилителями на протяжении k -го интервала управления;

$V_{i,j}(k)$ – количество световых путей, установленных между i -м и j -м маршрутизаторами в k -й момент времени;

E_{tr} , E_{IP} , E_0 , E_{am} – номинальное электропотребление оптического транспондера, маршрутизатора, оптического коннектора и усилителя;

$N_{m,n}^F$ – количество волокон в тракте передачи (m,n) на уровне оптической сети;

$A_{m,n}$ – количество усилителей в оптическом тракте передачи (m,n) протяженностью $L_{m,n}$, $A_{m,n} = \lfloor L_{m,n} / L - 1 \rfloor + 2$, где L – номинальная длина оптического усилительного участка.

В рамках представленной модели, задача распределения ресурсов пакетной оптической транспортной программно–конфигурируемой сети сформулирована как оптимизационная задача, связанная с минимизацией суммарной потребляемой сетью электроэнергии $P_{\Sigma}(k)$.

Метод управления ресурсами транспортной программно–конфигурируемой сети

В предыдущем разделе, существовали ограничения (1), тогда сформулированная задача будет нести нелинейный характер. С точки зрения практической реализации, используемый метод поиска должен обеспечить такое решение, которое приведет к улучшению текущего состояния сети в любой момент времени. С целью упрощения и одновременно получения реализуемого управляющего решения, целесообразным является разбиение исходной задачи (1)–(7) на небольшие подзадачи:

- задача управления ресурсами IP–сети в условиях известной ее топологии;
- задача формирования требований к виртуальной топологии на IP–уровне;

– задача формирования виртуальной топологии путем распределения оптических несущих и установления соответствующих световых путей [11-12].

Задачей верхнего уровня управления является распределение ресурсов доступной виртуальной топологии между поступающими на обслуживание IP–потоками, которая формализуется как задача минимизации (7) при ограничениях (1)–(3).

Исходными будут являться переменные $u_{i,j}^j(k)$ - маршрутные переменные. В качестве исходных данных выступают известные структуры виртуальной топологии IP–сети, заданные в виде переменных $b_{i,j}^*(k)$, объемы передаваемого трафика описаны переменными $y_{i,j}^*(k)$.

Интервал перерасчета управляющих переменных, определяется в (1) в виде величины Δt , которая в общем случае должна отвечать динамике поступающего на обслуживание трафика.

Второй, среди поставленных подзадач, являлась задача формирования требований к виртуальной топологии на IP–уровне. Сведем обновление виртуальной топологии к расчету $b_{i,j}^{req}(k)$, а также математически заключим в минимизацию (7) по переменным $u_{i,j}^j(k)$, и $b_{i,j}(k)$. Результирующее значение $b_{i,j}^{req}(k)$, отражает требования к количеству световых путей между парами маршрутизаторов и их пропускной способности. В процессе расчета новой виртуальной топологии, во внимание должны быть приняты QoS–требования обслуживаемых потоков, что может быть реализовано путем введения в модель (1)–(3) соответствующих QoS ограничений [13-15].

Избежать дополнительного усложнения возможно за счет использования в качестве исходных данных не оценку объемов передаваемого трафика $y_{i,j}^*(k)$, а величины $y_{i,j}^{req}(k) = (\lambda_{i,j}^{req} + \Delta\lambda_{i,j})d_{i,j}\Delta t$, где $\lambda_{i,j}^{req}$ – пакетная интенсивность потока от i -го маршрутизатора к j -му, наблюдаемому на IP-уровне; $d_{i,j}$ – средняя длина IP-пакета в потоке (i,j) ; $\Delta\lambda_{i,j}$ – дополнительные требования к пропускной способности.

На основе теории массового обслуживания, задержка передачи пакетов будет зависеть от отношения интенсивности потока к пропускной способности, сформированного для обслуживания пути. То есть, передача потока с заданной задержкой τ_{req} предполагает выделение пропускной способности в объеме, превышающем интенсивность поступления этого потока на величину $\Delta\lambda_{i,j} = f(\tau_{req}, \lambda_{i,j}^{req}, b_{i,j}(k))$. Тогда величина «запаса» $\Delta\lambda_{i,j} = \mu_{i,j} - \lambda_{i,j}^{req}$, где $\mu_{i,j}$ – средняя интенсивность обслуживания IP-пакетов в тракте передачи (i,j) на IP-уровне.

$\mu_{i,j} = b_{i,j} / d_{i,j}$ – рассчитывается с использованием результатов теории массового обслуживания, исходя из принятой модели трафика и его обслуживания на маршрутизаторах IP-сети.

Известно, что потоки IP-пакетов обладают свойствами самоподобия, и величина задержки может быть оценена [16]:

$$\tau_{i,j} = \frac{1}{\mu_{i,j}} \left[1 + \frac{(\rho_{i,j}) \frac{1}{2(1-H)}}{(1-\rho_{i,j}) \frac{H}{1-H}} \right], \quad (12)$$

где, $\rho_{i,j} = \lambda_{i,j}^{req} / \mu_{i,j}$; H – параметр Херста.

Зная $y_{i,j}^{req}(k)$, для расчета требуемой виртуальной топологии необходимо решить оптимизационную задачу (7) при ограничениях (1)–(3), где неизвестными являются переменные $u_{i,j}^j(k)$, и $b_{i,j}(k)$, но искомыми с точки зрения физически решаемой задачи, лишь переменные $b_{i,j}(k)$.

В этой связи, уравнение состояния IP–сети будет иметь вид:

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) - \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^{N^r} \varphi_{i,l}^j(k) \cdot \Delta t + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i,j}}^{N^r} \varphi_{m,i}^j(k) \cdot \Delta t + y_{i,j}^{req}(k), \quad (13)$$

где, $\varphi_{i,j}(k) = b_{i,l}(k) \cdot u_{i,j}^j(k)$ – интенсивность потока, передаваемого на k -м временном интервале от i -го к l -му маршрутизатору и адресованного j -му маршрутизатору.

Переменная $\varphi_{i,j}(k)$ отражает абсолютную величину потока, а потому подчиняется условиям:

$$0 \leq \varphi_{i,j}(k) \leq b_{i,l}(k) \quad (14)$$

В условиях заданной топологии, то есть при $b_{i,l}(k) = b_{i,j}^*(k) = const$, выражение (13) представляет собой лишь иную форму записи (1), где условие (3) заменяется на:

$$\sum_{j=1}^{N^r} \varphi_{i,j}(k) \leq b_{i,l}^*(k) \quad (15)$$

Однако в случае формирования топологии, условие (15) теряет силу и должно быть заменено на выражение:

$$\sum_{j=1}^{N'} \varphi_{i,j}(k) \leq b_{i,l}^{max}(k), \quad (16)$$

где, $b_{i,l}^{max}(k)$ – максимально допустимая пропускная способность, которая может быть выделена тракту передачи (i,l).

Тогда задача формирования требований к виртуальной топологии примет вид оптимизации задачи (7) при ограничениях (2), (13), (14), (16), где в качестве искомым переменных выступают переменные $\varphi_{i,l}^j(k)$ (рисунок 1).

Результаты решения $\varphi_{i,l}^{*j}(k)$ будут представлять собой требования к структуре и пропускным способностям трактов передачи, которые должны быть установлены между маршрутизаторами IP–сети, исходя из известных объемов передаваемого трафика и их

QoS показателей, $\sum_{j=1}^{N'} \varphi_{i,l}^j(k) \leq b_{i,l}^{req}(k)$.

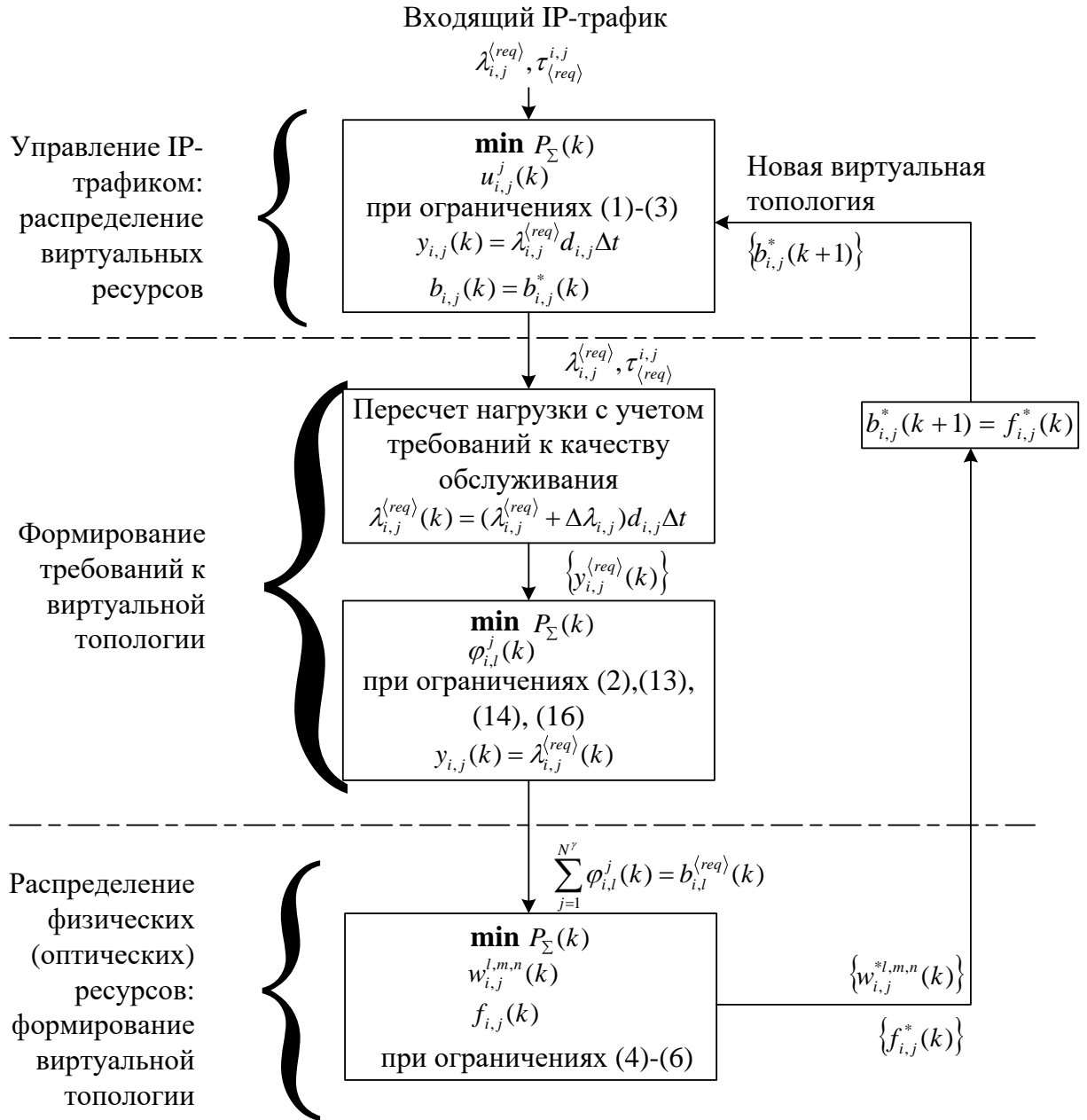


Рисунок 1 – Упрощенная структура алгоритма управления ресурсами транспортной SDN

Рассчитанные требования к структуре световых путей $b_{i,j}^{req}(k)$, спустятся на нижний уровень управления, который ассоциируется с оптической сетью.

Данный уровень, путем минимизации (7) по переменным $w_{i,j}^{l,m,n}(k)$ при заданных ограничениях (4)–(6) сформирует совокупность световых путей и распределит оптические пути вдоль них.

Таким образом, представленный алгоритм позволяет описать процесс управления ресурсами транспортной ПКС совокупностью расчетных процедур. При этом, все уровни управления связаны единой целевой функцией – минимумом суммарного энергопотребления, и их решения, скоординированы между собой.

Выводы

В статье представлены основные положения и математическая модель транспортной программно-конфигурируемой сети связи. На основе математического аппарата систем массового обслуживания описана технология формирования виртуальной сетевой топологии для оптической транспортной программно-конфигурируемой сети связи. Приведен общий алгоритм управления ресурсами транспортной ПКС, включающий в себя этап распределения виртуальных ресурсов с использованием критерия сбережения энергии на установление световых путей, формирования требований к виртуальной топологии с учетом параметров качества обслуживания, распределения оптических ресурсов сети связи.

Результат работы выражен в разработке математической базы транспортной оптической программно-конфигурируемой сети, позволяющей провести предварительную оценку параметров разрабатываемой системы связи или отдельных ее

компонентов на основе приведенных выражений, в том числе общие энергозатраты установления светового пути, задержку передачи пакетов и другие, актуальные в рамках описываемой системы и отдельных ее реализаций, например, «Green SDN» [17-18], SD-WSN (программно-конфигурируемая беспроводная сенсорная сеть) [19-20], SD-FANET (программно-конфигурируемая самоорганизованная сеть беспилотных летающих аппаратов) акцент в которых сделан на обеспечение максимальной энергоэффективности системы.

Работа была выполнена при финансовой поддержке центра НТИ "Сенсорика" в НОЦ РЦСС НИУ МИЭТ в рамках проекта "Создание автоматизированной системы мониторинга окружающей среды (АСМОС) для сбора, обработки, хранения и передачи метеорологической и экологической информации", рег. № НИОКТР: АААА-А20-1200130090100-3.

Библиографический список

1. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894>
2. Бородин В.В. Шевцов В.А. Выбор параметров управления доступом в сетях связи с мобильными объектами // Труды МАИ. 2012. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=56886>

3. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ алгоритмов маршрутизации в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 87.
URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=69735>
4. Дышленко С.Г. Маршрутизация в транспортных сетях // Информационные технологии в науке, образовании и управлении. 2018. № 1 (5). С. 15 - 20.
5. Thyagaturu A.S. et al. Software defined optical networks (SDONs): A comprehensive survey // IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 2738 - 2786.
DOI: [10.1109/COMST.2016.2586999](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2586999)
6. 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, pp. 1689 - 1693. DOI: [10.1109/EIConRus49466.2020.9039461](https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039461)
7. De Souza F. R. et al. QoS-aware virtual infrastructures allocation on SDN-based clouds // 17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID), 2017, pp. 120 - 129. DOI Bookmark: [10.1109/CCGRID.2017.57](https://doi.org/10.1109/CCGRID.2017.57)
8. Oki E., Iwaki A. Load-balanced IP routing scheme based on shortest paths in hose model // IEEE Transactions on Communications, 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2088 - 2096.
DOI: [10.1109/ICC.2009.5198976](https://doi.org/10.1109/ICC.2009.5198976)
9. Shen G., Tucker R.S. Energy-minimized design for IP over WDM networks // Journal of Optical Communications and Networking, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 176 - 186. DOI: [10.1364/JOCN.1.000176](https://doi.org/10.1364/JOCN.1.000176)

10. Papagiannaki K. et al. Measurement and analysis of single-hop delay on an IP backbone network // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2003, vol. 21, no. 6, pp. 908 - 921.
11. Montazerolghaem A., Yaghmaee M. H. Load-balanced and QoS-aware Software-defined Internet of Things // IEEE Internet of Things Journal, 2020. vol. 7, no. 4, pp. 3323 - 3337. DOI: [10.1109/JIOT.2020.2967081](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2967081)
12. Thaenchakun C. et al. Mitigate the load sharing of segment routing for SDN green traffic engineering // 2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS), IEEE, 2016, pp. 1 - 6. DOI: [10.1109/ISPACS.2016.7824746](https://doi.org/10.1109/ISPACS.2016.7824746)
13. Thazin N. QoS-based Traffic Engineering in Software Defined Networking, University of Computer Studies, Yangon, 2019. URI: <http://onlineresource.ucsy.edu.mm/handle/123456789/2477>
14. Ishii K. et al. Energy consumption and traffic scaling of dynamic optical path networks // Optical Metro Networks and Short-Haul Systems V. International Society for Optics and Photonics, 2013, vol. 8646. pp. 86460A. DOI: [10.1117/12.2003591](https://doi.org/10.1117/12.2003591)
15. Hohn N. et al. Bridging router performance and queuing theory //ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review, 2004, vol. 32, no. 1, pp. 355 - 366. DOI: [10.1145/1005686.1005728](https://doi.org/10.1145/1005686.1005728)
16. Вавенко Т.В., Стерин В.Л., Симоненко А.В. Поточковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди в программно-конфигурируемых сетях //

Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. № 4 (86). С. 38 – 45.

17. Moin S. et al. GREEN SDN—An enhanced paradigm of SDN: Review, taxonomy, and future directions // Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2018, vol. 32, no.

21. URL: <https://doi.org/10.1002/cpe.5086>

18. Rodrigues B.B. et al. GreenSDN: Bringing energy efficiency to an SDN emulation environment // IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM), IEEE, 2015, pp. 948 - 953. DOI: [10.1109/INM.2015.7140416](https://doi.org/10.1109/INM.2015.7140416)

19. Satija S., Sharma T., Bhushan B. Innovative approach to Wireless Sensor Networks: SD-WSN // 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS), IEEE, 2019, pp. 170 - 175. DOI: [10.1109/ICCCIS48478.2019.8974548](https://doi.org/10.1109/ICCCIS48478.2019.8974548)

20. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018 № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93398>

Resources managing algorithm for transport software-defined communication network

Baskakov A.E.*, Volkov A.S.**

*National Research University of Electronic Technology,
1, sq. Shokina, Moscow, Zelenograd, 124498, Russia*

*e-mail: 79999924816@ya.ru

**e-mail: leshvol@mail.ru

Abstract

Transport SDNs represent the imposition of actively developing concept of network resources centralized management on transport reconfigurable packet networks, including optical ones. The main parameters and principles of the PCS herewith are not only preserved, but also extended to the lower levels, including the level of physical resources management.

The basic stage ensuring the possibility for developing solutions to manage the resources of the communication network, along with the network protocols realizing their operation, consists in developing

- Mathematical base of the communication network under study;
- Processes of resources allocation;
- computation of the necessary paths, including application of the existing developments in the field of standard telecommunications networks, software-defined networks, communication networks of unmanned aerial vehicles or self-organizing communication networks.

Following the principles of the SDN concept, the resources of the optical network from the viewpoint of the higher layer (IP) will be considered as a set of virtual transmission paths with a certain bandwidth, and all the detailed information on the structure will be available herewith only to the lower optical layer. Such approach will allow outlining the two subtasks within the framework of the resources managing task of a packet optical network: the optical network resources managing to create a virtual IP topology, and managing the pool of virtual channel resources at the IP level.

The requirement for dynamic and optimal control of transport resources of a packet optical network, defined by the PCN concept, presupposes a rigorous mathematical formalization and optimization statement of this problem. The attention is worth paying to the network models represented in the form of differential-difference equations of state. Such models are successfully employed for solving routing problems at the IP-network level, regarding it as the problem of channel and buffer resources allocation between incoming IP-packet flows.

With a view to the developing trend of energy saving, minimum of electric energy consumed by the network was selected as the optical networks resources control optimality criterion.

Electric energy consumed by the network directly relates to the number of devices involved in it, which in turn is also determined by the choice of the method of overlaying the packet network atop the optical one. Among all possible options, from the viewpoint of economy, attention should be paid to the “transparent” architecture of the IP-over-WDM, in

which establishing of light paths exclusively at the optical level is possible without transit routers engaging.

The of the upper control level task consists in resources distribution of the available virtual topology between the incoming IP-flows, which e initial data is routing variables: the known structures of the virtual topology of the IP-network, and the volumes of the transmitted traffic. Besides, it is necessary to form the requirements for the virtual topology of the IP-level, namely, for the number of light paths between pairs of routers and their bandwidth.

It is possible to avoid additional complication by applying as the initial data the packet flow rate from the i-th to the j-th router with the given requirements for the average IP packet length and bandwidth, rather than the transmitted traffic volumes estimation.

The presented algorithm allows describing the process of managing the resources of the transport PMS by an aggregate of computational procedures. All levels of management herewith are linked by a single target function, namely by the minimum of total energy consumption, and their solutions are coordinated with each other.

Keywords: software defined network, transport network resource management, virtual network topology.

References

1. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2015, no. 81. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57894>

2. Borodin V.V., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 80. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=56886>
3. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2016, no. 87. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=69735>
4. Dyshlenko S.G. *Informatsionnye tekhnologii v nauke, obrazovanii i upravlenii*, 2018, no. 1 (5), pp. 15 - 20.
5. Thyagaturu A.S. et al. Software defined optical networks (SDONs): A comprehensive survey, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, vol. 18, no. 4, pp. 2738 - 2786. DOI: [10.1109/COMST.2016.2586999](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2586999)
6. 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, pp. 1689 - 1693. DOI: [10.1109/EIConRus49466.2020.9039461](https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039461)
7. De Souza F. R. et al. QoS-aware virtual infrastructures allocation on SDN-based clouds, *17th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID)*, 2017, pp. 120 - 129. DOI Bookmark: [10.1109/CCGRID.2017.57](https://doi.org/10.1109/CCGRID.2017.57)
8. Oki E., Iwaki A. Load-balanced IP routing scheme based on shortest paths in hose model, *IEEE Transactions on Communications*, 2010, vol. 58, no. 7, pp. 2088 - 2096. DOI: [10.1109/ICC.2009.5198976](https://doi.org/10.1109/ICC.2009.5198976)

9. Shen G., Tucker R. S. Energy-minimized design for IP over WDM networks, *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, vol. 1, no. 1, pp. 176 - 186. DOI: [10.1364/JOCN.1.000176](https://doi.org/10.1364/JOCN.1.000176)
10. Papagiannaki K. et al. Measurement and analysis of single-hop delay on an IP backbone network, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, vol. 21, no. 6, pp. 908 - 921.
11. Montazerolghaem A., Yaghmaee M. H. Load-balanced and QoS-aware Software-defined Internet of Things, *IEEE Internet of Things Journal*, 2020. vol. 7, no. 4, pp. 3323 - 3337. DOI: [10.1109/JIOT.2020.2967081](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2967081)
12. Thaenchakun C. et al. Mitigate the load sharing of segment routing for SDN green traffic engineering, *2016 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, IEEE, 2016, pp. 1 - 6. DOI: [10.1109/ISPACS.2016.7824746](https://doi.org/10.1109/ISPACS.2016.7824746)
13. Thazin N. *QoS-based Traffic Engineering in Software Defined Networking*, University of Computer Studies, Yangon, 2019. URI: <http://onlineresource.ucsy.edu.mm/handle/123456789/2477>
14. Ishii K. et al. Energy consumption and traffic scaling of dynamic optical path networks, *Optical Metro Networks and Short-Haul Systems V. International Society for Optics and Photonics*, 2013, vol. 8646. pp. 86460A. DOI: [10.1117/12.2003591](https://doi.org/10.1117/12.2003591)

15. Hohn N. et al. Bridging router performance and queuing theory, *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 2004, vol. 32, no. 1, pp. 355 - 366. DOI: [10.1145/1005686.1005728](https://doi.org/10.1145/1005686.1005728)
16. Vavenko T.V., Sterin V.L., Simonenko A.V. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki*, 2013, no. 4 (86), pp. 38 – 45.
17. Moin S. et al. GREEN SDN—An enhanced paradigm of SDN: Review, taxonomy, and future directions, *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 2018, vol. 32, no. 21. URL: <https://doi.org/10.1002/cpe.5086>
18. Rodrigues B.B. et al. GreenSDN: Bringing energy efficiency to an SDN emulation environment, *IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, IEEE, 2015, pp. 948 - 953. DOI: [10.1109/INM.2015.7140416](https://doi.org/10.1109/INM.2015.7140416)
19. Satija S., Sharma T., Bhushan B. Innovative approach to Wireless Sensor Networks: SD-WSN, *2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)*, IEEE, 2019, pp. 170 - 175. DOI: [10.1109/ICCCIS48478.2019.8974548](https://doi.org/10.1109/ICCCIS48478.2019.8974548)
20. Borodin V.V., Petrakov A.M., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2018, no. 100. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=93398>