

УДК 621.391

О.Ю. Евсева¹, Е.Н. Ильяшенко²¹ Харьковський національний університет радіоелектроніки, Харків² Компанія «РЕКОМ», Харків

МОДЕЛЬ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ СЕТИ IP-OVER-DWDM

Развитие телекоммуникационных сетей, в т.ч. Internet, подчинено двум противоречивым факторам: растущие объемы передаваемого трафика и повышающиеся требования пользователей к качеству их обслуживания с одной стороны, и необходимость снижения капитальных и эксплуатационных расходов с другой. В том плане эффективным является применение технологии IP-over-DWDM, позволяющей, кроме всего прочего, снизить затраты, связанные с энергопотреблением. Растущая актуальность задачи энергосбережения обуславливает смену критерия управления телекоммуникационной сетью. В этой связи в статье предлагается математическая модель сети IP-over-DWDM, охватывающая управление оптическими несущими на уровне DWDM и потоками пакетов трафика на уровне IP с учетом динамики их поступления и требований к качеству обслуживания, где в роли критерия оптимальности принимаемого решения выступает количество потребляемой электроэнергии.

Ключевые слова: оптическая сеть, энергосбережение, оптимальное управление ресурсами, IP-over-DWDM.

Введение

Растущая популярность IP-технологий во многом обязана высоким скоростям передачи информационных потоков, обеспечиваемым средствами ниже лежащих канального и физического уровней. Причем первенство с точки зрения скоростей передачи, количества обслуживаемых абонентов и качества их обслуживания (Quality of Service, QoS), наряду с экономией капитальных и эксплуатационных затрат, принадлежит оптическим технологиям, в первую очередь, технологии плотного волнового мультиплексирования (Dense Wavelength-Division Multiplexing, DWDM), которая в перспективе способна обеспечивать скорости 400 Гбит/с и 1 Тбит/с на одну оптическую несущую. Технологически доступная на данный момент возможность развертывания IP-сети поверх оптической инфраструктуры DWDM напрямую (IP-over-DWDM) позволяет отказаться от таких технологий, как, например, SDH, выполняющих промежуточную согласовательную роль между физическим уровнем и потоками сетевого уровня, и тем самым упростить архитектуру сети, повысить ее надежность и управляемость.

Задача управления ресурсами сети IP-over-DWDM: содержание и анализ известных решений

Исходя из специфики использования IP поверх DWDM, в рамках подобного рода сетей возникает ряд задач, среди которых основными являются задачи синтеза виртуальной топологии IP-сети, наложенной поверх оптической инфраструктуры DWDM, и отображения потоков IP-пакетов на оптические несущие

DWDM. Первая задача связана с установлением соединений между оптическими мультиплексорами ввода/вывода (Optical Add-Drop Multiplexer, OADM) на уровне физической топологии, обеспечивая тем самым логическую смежность соответствующих маршрутизаторов на уровне IP. В базовом варианте оптические соединения устанавливаются между соседними мультиплексорами, в результате чего топология сети на уровне IP частично повторяет топологию оптической сети [1]. Затем в процессе функционирования посредством протоколов маршрутизации данная топология распознается, и на ее основании формируются маршруты передачи IP-пакетов. Однако, как показано в [1], более эффективным с точки зрения задержек передачи и надежности доставки является подход, связанный с формированием оптических соединений (или, используя терминологию оптических сетей, – установлением световых путей) не только между соседними мультиплексорами, но и между произвольной парой OADM. В результате на уровне IP между IP-маршрутизаторами, подключенными к терминальным точкам определенного светового пути, формируется прямой логический канал. Таким образом, управление процессом установления световых путей в оптической инфраструктуре DWDM обеспечивает возможность управления логическими связями на IP уровне, множество которых формирует т.н. виртуальную топологию IP-сети. Причем в общем случае поверх одной и той же оптической сети DWDM возможно развертывание нескольких IP-сетей, каждая из которых претендует на использование общего ресурса в виде оптических несущих, назначение которых вдоль маршрута и представляет собой задачу формирования светового пути.

Помимо задачи установления световых путей DWDM путем поиска маршрутов и назначения оптических несущих вдоль каждого из них, носящей название Routing and Wavelength Assignment (RWA) в англоязычной литературе, в сети IP-over-DWDM имеет место задача отображения потоков IP-пакетов на оптические несущие DWDM, пропускные способности которых, как правило, намного превышают интенсивности передаваемых потоков. Задача заключается в совместном использовании одной оптической несущей несколькими IP-потоками и нацелена на повышение эффективности использования сетевых ресурсов (в англоязычной литературе известна как traffic grooming problem) [2].

Таким образом, в рамках сетей IP-over-DWDM актуальными являются задачи установления путей в оптической сети и назначения вдоль них оптических несущих, а также отображения IP-потоков на эти несущие с соблюдением при этом требований данных потоков к качеству их обслуживания. Фактически имеем задачу распределения ресурсов оптической сети, т.е. управления ее несущими, общее число которых ограничено технологическими возможностями DWDM-сети. Описанные в литературе подходы к решению задач создания виртуальной топологии и передачи потоков трафика зачастую основываются на совместном их рассмотрении, что объясняется стремлением обеспечить максимально эффективное использование сетевых ресурсов. Тем не менее, существуют работы, предполагающие последовательное решение перечисленных задач, но с более высокой степенью детализации каждой из них [2].

В основном задача управления ресурсами оптической сети формулируется в виде задачи целочисленного линейного программирования, где в качестве объектов управления выступают оптические несущие, световые пути и маршруты передачи трафика, для каждого из которых вводится свой тип управляющих переменных. При этом, как правило, показатели качества обслуживания сетевого уровня (задержка передачи, вероятность потерь пакетов) либо не учитываются, либо учитываются не в полной мере. Например, в работе [3] предлагается эвристический алгоритм для решения задачи управления по критерию минимума средней по сети задержки передачи пакета, оцениваемой с использованием теории массового обслуживания; в работе [4] для учета надежности каналов для каждого из них вводится коэффициент, который равен 1, если уровень ошибок BER в данном канале отвечает заданным требованиям, в противном случае – коэффициент устанавливается равным нулю, исключая тем самым канал из рассмотрения. В целом межконцевое (end-to-end) качество обслуживания, а тем более по совокупности показателей и с учетом их взаимного влияния в рамках известных моделей не фигурирует. Другой принци-

пиальный недостаток известных подходов связан с используемым математическим аппаратом. Как правило, в основе решения задачи управления ресурсами оптической сети лежит потоковая модель в виде системы линейных алгебраических уравнений, что обеспечивает оптимизационную постановку решаемой задачи в виде целочисленного линейного программирования. Однако такой подход не позволяет учесть динамику поступающего в сеть трафика, равно как и изменения в топологии сети (например, выход из строя ее элемента или целого пути), а потому не способен обеспечить соответствующую реакцию сети.

Таким образом, актуальной является задача разработки математической модели сети IP-over-DWDM, обеспечивающей учет динамического характера поступающих в сеть IP-потоков и межконцевого качества их обслуживания, что позволит сформулировать задачу управления ресурсами оптической сети как задачу оптимального управления.

Динамическая математическая модель сети IP-over-DWDM

Комплекс перечисленных требований обуславливает целесообразность представления моделируемой сети IP-over-DWDM в пространстве состояний, где в отличие от известных подходов [5] переменные состояния и управления будут связаны с двумя различными уровнями: IP и DWDM.

Как было выше указано, на уровне оптической сети DWDM решается задача распределения оптических несущих и формирования световых путей. Поскольку поверх одной и той же оптической сети может функционировать несколько IP-сетей, для идентификации создаваемых в их интересах световых путей (логических соединений) введем обозначение $b_{i,j}^h(k)$, где индекс h указывает на номер IP-сети, индексы i и j соответствуют маршрутизаторам R_i^h и R_j^h в h -й виртуальной топологии, между которыми на оптическом уровне формируется путь. Физически создание светового пути $b_{i,j}^h(k)$ предполагает выбор в оптической инфраструктуре последовательности оптических мультиплексоров и трактов передачи, а также выделение в каждом из них оптической несущей, что будет отражено при помощи переменной $w_{i,j,h}^{l,m,n}(k)$:

$$w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-я оптическая несущая в} \\ & \text{тракте передаче } (m,n) \text{ используется} \\ & \text{для создания светового пути } b_{i,j}^h; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

В соответствии с физическим смыслом, вкладываемым в переменные $w_{i,j,h}^{l,m,n}(k)$, они должны подчиняться закону сохранения потока:

$$\sum_{n=1}^N \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} c^{l,m,n} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) - \sum_{r=1}^N \sum_{l=1}^{N_{r,m}^w} c^{l,r,m} w_{i,j,h}^{l,r,m}(k) =$$

$$= \begin{cases} b_{i,j}^h(k), & \text{если } m = i; \\ 0, & \text{если } m \neq i, j; \\ -b_{i,j}^h(k), & \text{если } m = j, \end{cases} \quad (1)$$

где $c^{l,m,n}$ – пропускная способность l -й оптической несущей в тракте передачи (m,n) ; $N_{m,n}^w$ – число оптических несущих в тракте передачи (m,n) ; N – число мультиплексоров в сети WDM; $b_{i,j}^h(k)$ – пропускная способность светового пути (i,j) в h -й виртуальной топологии.

Так как количество оптических несущих в каждом тракте передачи ограничено, и каждая из них может быть использована лишь для установления одного соединения, имеем

$$\sum_{h=1}^{N^v} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_h^r} \sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) \leq N_{m,n}^w, \quad (2)$$

$$\sum_{h=1}^{N^v} \sum_{i=1}^{N_h^r} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_h^r} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) \leq 1, \quad (3)$$

где N^v – число виртуальных IP-топологий, создаваемых поверх сети DWDM; N_h^r – количество маршрутизаторов в h -й IP-сети.

Дополнительно может быть введено условие непрерывности длины волны, требующее использования одной оптической несущей вдоль всего светового пути. Т.е. на промежуточных мультиплексорах смена длины волны в рамках одного светового пути запрещается:

$$w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) = w_{i,j,h}^{l,r,m}(k). \quad (4)$$

Кроме того, во избежание разницы в задержках на оптическом уровне при использовании множества световых путей потребуем, чтобы использовались несущие, принадлежащие одному оптическому тракту передачи: т.е. если тракт передачи (m,n) задействуется в создании светового пути

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

в противном случае

$$\sum_{l=1}^{N_{m,n}^w} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) = 0.$$

Синтезированные на уровне сети DWDM световые пути $b_{i,j}^h(k)$ формируют топологию h -й IP-сети,

состояние которой, но уже на уровне IP, будет формализовано через величины текущей загруженности очередей на маршрутизаторах $x_{i,j}^h(k)$. Переменные

$x_{i,j}^h(k)$ отражают объем данных, которые находятся на i -м маршрутизаторе R_i^h , принадлежащем h -й виртуальной топологии, и предназначены для передачи j -му маршрутизатору R_j^h в рамках этой же топологии в момент времени t_k . Основной задачей управления на IP-уровне является маршрутизация потоков IP-пакетов и распределение с этой целью канальных и буферных ресурсов маршрутизаторов. Для ее решения введем переменную $u_{i,l}^{h,j}(k)$, которая определяет порядок маршрутизации IP-потоков и указывает на долю пропускной способности канала (i,l) в h -й топологии, выделяемую в момент времени t_k для передачи потока с адресом R_j^h .

Тогда динамику смены состояний h -й сети IP-over-DWDM (с точки зрения IP-уровня) можно представить в виде следующей системы уравнений:

$$x_{i,j}^h(k+1) = x_{i,j}^h(k) - \sum_{l=1}^{N_h^r} b_{i,l}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^{h,j}(k) +$$

$$(6)$$

$$+ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq i, j}}^{N_h^r} b_{m,i}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^{h,j}(k) + y_{i,j}^h(k),$$

где $i, j = \overline{1, N_h}$, $i \neq j$; $h = \overline{1, N^v}$; $y_{i,j}^h(k) = \zeta_{i,j}^h(k) \Delta t$ – объем нагрузки, поступающей в момент времени t_k на маршрутизатор R_i^h и предназначенной для передачи маршрутизатору R_j^h ; $\zeta_{i,j}^h(k)$ – интенсивность поступающей нагрузки, которая определяется как суммарная интенсивность потоков абонентов, подключенных к маршрутизатору R_i^h , с адресом получателя, находящимся в подсети маршрутизатора R_j^h .

На переменные $x_{i,j}^h(k)$ и $u_{i,l}^{h,j}(k)$, относящиеся к уровню IP, исходя из их физического смысла и ограниченности ресурсов h -й виртуальной топологии (размера буферов очередей на маршрутизаторах и пропускной способности каналов между ними), накладываются ограничения:

$$0 \leq x_{i,j}^h(k) \leq x_{i,j}^{h, \max}, \quad (7)$$

$$0 \leq u_{i,l}^{h,j}(k) \leq 1, \quad (8)$$

$$\sum_{n=1}^{N_h^r} u_{i,l}^{h,n}(k) \leq 1, \quad (9)$$

где $x_{i,j}^{h \max}$ – максимально допустимая длина очереди на маршрутизаторе R_i^h для трафика, адресованного маршрутизатору R_j^h .

Поскольку существующие механизмы формирования очередей зачастую позволяют перераспределять доступное буферное пространство между разными очередями, ограничения на переменные состояния (7) могут быть записаны в виде

$$0 \leq x_{i,j}^h(k), \quad (10)$$

$$\sum_{j=1, j \neq i}^{N_h^f} x_{i,j}^h(k) \leq x_i^{h \max}, \quad (11)$$

где $x_i^{h \max}$ – максимально допустимый объем буфера на маршрутизаторе R_i^h .

При управлении потоками пакетов на уровне IP наиболее сложным моментом является обеспечение требований к межконцевому качеству обслуживания по совокупности показателей QoS, задаваемых, как правило, в виде требуемой интенсивности потока $\lambda^{(трб)}$, допустимой межконцевой средней задержки $\tau_{(доп)}$ и вероятности потерь пакетов $p_{(доп)}$. С целью комплексного выполнения данных требований введем в модель условие, полученное в рамках тензорного моделирования телекоммуникационных систем [6]:

$$\lambda^{(трб)}(1 - p_{(доп)}) \leq \left\{ G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} \Lambda_{\eta-1} + \left(G_{\pi\eta}^{(4,1)} - G_{\pi\eta}^{(4,2)} \left[G_{\pi\eta}^{(4,4)} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{(4,3)} \right) \tau_{(доп)} \right\}, \quad (12)$$

где $\left\| \begin{matrix} G_{\pi\eta}^{(4,1)} & | & G_{\pi\eta}^{(4,2)} \\ \hline & & \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} & & \\ \hline G_{\pi\eta}^{(4,3)} & | & G_{\pi\eta}^{(4,4)} \end{matrix} \right\| = G_{\pi\eta}^{(4)}$, $G_{\pi\eta}^{(4,1)}$ – первый элемент матрицы $G_{\pi\eta}^{(4)}$;

$\left\| \begin{matrix} G_{\pi\eta}^{(1)} & | & G_{\pi\eta}^{(2)} \\ \hline & & \end{matrix} \right\| + \left\| \begin{matrix} & & \\ \hline G_{\pi\eta}^{(3)} & | & G_{\pi\eta}^{(4)} \end{matrix} \right\| = G_{\pi\eta}$, $G_{\pi\eta}^{(1)}$,

$G_{\pi\eta}^{(4)}$ – квадратные подматрицы размера $\mu \times \mu$ и $\phi \times \phi$ соответственно; μ и ϕ – цикломатическое число и ранг виртуальной топологии, определяющие число ее базисных контуров и базисных узловых пар соответственно; $G_{\pi\eta}$ – проекция метрического тензора сети G в системе координат ее контуров и узловых пар; $\Lambda_{\eta-1}$ – вектор размера $(\phi - 1)$, элементы которого определяют для каждого отдельно взятого маршрутизатора суммарную по всем его интерфейсам интенсивность потерь пакетов (рассчитываются

согласно принятой на маршрутизаторе политике отбрасывания пакетов [6]).

Заметим, что условие (12) должно быть записано для каждой пары адресатов в рамках каждой топологии; его выполнение гарантирует заданные численные значения QoS-показателей путем реализации многопутевой маршрутизации и распределения потоков между множеством используемых маршрутов на уровне IP. В выражении (12) с целью упрощения записи индексы, указывающие пару отправитель-получатель и номер виртуальной топологии, опущены. Составляющая основу выражения (12) проекция метрического тензора сети рассчитывается как

$$G_{\pi\eta} = A^t G_v A, \quad (13)$$

где A – матрица ковариантного координатного преобразования, всецело определяемая структурными свойствами сети (рассматриваемой h -й виртуальной топологии); G_v – диагональная матрица размера $N_h^c \times N_h^c$, представляющая собой проекцию метрического тензора сети G в системе координат ее ветвей (отдельных каналов); N_h^c – количество каналов в h -й IP-сети.

Элементы g_v^{ii} главной диагонали матрицы G_v отражают взаимосвязь между интенсивностью передаваемого потока в i -м канале с претерпеваемой при этом задержкой и представляют собой функции от параметров канала, прежде всего его пропускной способности и интенсивности передаваемого по нему потока, которая с использованием ранее введенных обозначений формализуется как $b_{m,j}^h(k) \sum_I u_{m,j}^{h,l}(k)$ при условии, что при одноиндексной записи i -й канал соответствует каналу (m, j) в двухиндексной записи. Подробно правила формирования матрицы ковариантного координатного преобразования и расчета элементов матрицы G_v описаны в работе [6].

Таким образом, выражения (1) – (5) описывают процесс формирования световых путей в DWDM-сети, а выражения (6) – (13) отражают динамику обслуживания потоков пакетов на уровне IP. Задачи, решаемые на различных уровнях, тесно взаимосвязаны: эффективность и качество обслуживания IP-потоков во многом зависит от доступных на оптическом уровне ресурсов (количества световых путей и их пропускных способностей), а количество выделяемых на оптическом уровне ресурсов определяется реализуемыми на IP-уровне методами управления. В рамках предлагаемого подхода такая взаимосвязь формализуется при помощи переменных $\{b_{i,j}^h(k)\}$, что позволяет рассматривать задачи

управления оптическими несущими и маршрутизацию IP-потоків как единую оптимизационную задачу, где сформулированные выше (1) – (13) выступают в качестве ограничений.

Оптимизационная постановка задачи управления ресурсами оптической сети

Оптимизационная постановка задачи предполагает наличие критерия оптимальности управляющих решений, в качестве которого традиционно в телекоммуникациях выступают сетевая производительность, оцениваемая, например, через объем трафика, доведенного конечному пользователю, предоставляемое при этом качество обслуживания или объем используемых сетевых ресурсов (эксплуатационные расходы). Поскольку качество обслуживания в рамках предлагаемой модели введено в качестве отдельной группы ограничений (12), целевую функцию целесообразно формировать на основе затрат по доставке пользовательского трафика. При этом, учитывая растущую актуальность так называемых «зеленых» энергосберегающих технологий, имеет смысл сосредоточиться на минимуме потребляемой сетью электроэнергии.

Для сети IP-over-DWDM параметры электропотребления зависят от реализуемой сетевой архитектуры, среди различных вариантов которой наиболее перспективной является так называемая «прозрач-

ная» архитектура (Transparent IP-over-DWDM, Tr-IP-over-DWDM) [7, 8]. В ее рамках каждый узел сети оснащается оптическим кроссконнектором (Optical Crossconnect, OXC), представляющие собой микро-электромеханическую систему (Micro-electro-mechanical-system, MEMS) или оптический мультиплексор ввода/вывода (OADM), которые соединены с IP-маршрутизаторами посредством оптических транспондеров. Основная задача транспондеров состоит в приеме/передаче оптических сигналов и опто-электрическом (O-E) и обратном (E-O) преобразовании. Обработка пользовательского трафика предполагается в форме электрических сигналов и выполняется IP-маршрутизаторами. Они же обеспечивают при необходимости усиление и регенерацию оптических сигналов (по схеме O-E-O). При отсутствии необходимости в регенерации оптического сигнала OXC осуществляет коммутацию на оптическом уровне (рис. 1).

Тогда, учитывая, что каждый элемент сети потребляет определенное количество электроэнергии, суммарные энергозатраты на функционирование сети, построенной по принципу Tr-IP-over-DWDM, представляют собой [4, 7, 11]:

$$P_{\Sigma}^h(k) = P_{tr}^h(k) + P_{IP}^h(k) + P_o^h(k) + P_{am}^h(k), \quad (14)$$

где $P_{tr}^h(k)$, $P_{IP}^h(k)$, $P_o^h(k)$, $P_{am}^h(k)$ – мощность, потребляемая транспондерами, IP-маршрутизаторами, оптическими элементами сети (OXC) и линейными усилителями соответственно.

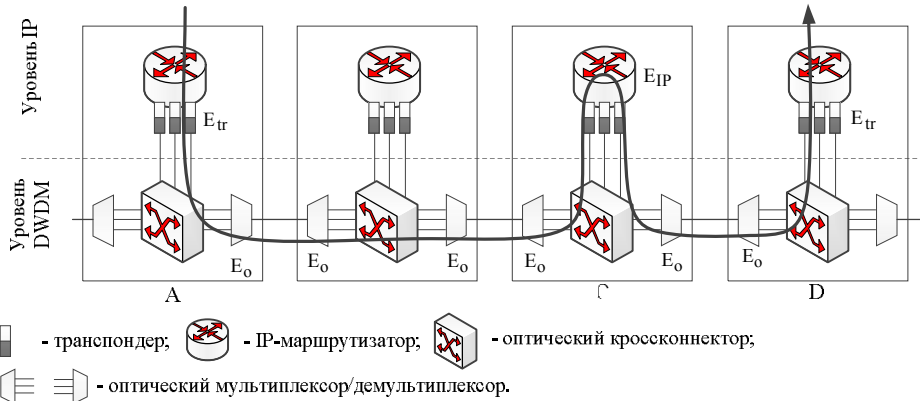


Рис. 1. «Прозрачная» архитектура сети IP-over-DWDM

Мощность, потребляемая оптическими транспондерами, которые являются фактически терминальными точками световых путей, прямо пропорциональна их количеству:

$$P_{tr}^h(k) = 2E_{tr} \sum_i \sum_{j \neq i} V_{i,j}^h(k), \quad (15)$$

где $V_{i,j}^h(k)$ – количество световых путей, установленных между маршрутизаторами R_i^h и R_j^h в h -й топологии в k -й момент времени; E_{tr} – номинальное энергопотребление оптического транспондера. Усредненные номинальные значения потребляемой

мощности для различных элементов сети: транспондеров, маршрутизаторов, OXC и усилителей (E_{tr} , E_{IP} , E_o , E_{am} соответственно), представлены в табл. 1 [9]. Мощность, расходуемая IP-маршрутизаторами, напрямую связана с объемами обрабатываемого ними трафика:

$$P_{IP}^h(k) = E_{IP} \left[\sum_{l=1, l \neq i}^{N_h^i} b_{i,l}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{i,l}^{h,j}(k) + \sum_{m=1, m \neq i, j}^{N_h^i} b_{m,i}^h(k) \cdot \Delta t \cdot u_{m,i}^{h,j}(k) + y_{i,j}^h(k) \right]. \quad (16)$$

Таблица 1
Усредненные значения мощности,
потребляемые элементами оптической сети

Средняя потребляемая мощность	10 Гбит/с	40 Гбит/с	100Гбит/с
E_{tr} , Вт	50	10	150
E_{IP} , Вт	5 на 1 Гбит/с обрабатываемого трафика (CRS-3)		
E_o , Вт	7,5 на одну оптическую несущую		
E_{am} , Вт	25 EDFA, 50 рамановский усилитель		

Энергозатраты оптических кроссконнекторов связаны с коммутацией оптических несущих в процессе формирования, а в последствии и поддержания световых путей:

$$P_o^h(k) = E_o \sum_i \sum_{\substack{j \\ j \neq i}} \left(V_{ij}^h + \sum_l \sum_m \sum_{\substack{n \\ n \neq m}} w_{i,j,h}^{l,m,n}(k) \right). \quad (17)$$

В случае большой протяженности оптических трактов передачи (более 70-80 км) они оснащаются линейными усилителями, потребляемая мощность которых может быть представлена как:

$$P_{am}^h(k) = E_{am} \sum_m \sum_{\substack{n \\ n \neq m}} A_{m,n} N_{m,n}^F, \quad (18)$$

где $N_{m,n}^F$ – количество оптических волокон в тракте передачи (m,n); $A_{m,n}$ – количество усилителей в тракте передачи (m,n) протяженностью $L_{m,n}$, $A_{m,n} = \lceil L_{m,n}/L - 1 \rceil + 2$; $\lceil \bullet \rceil$ – операция округления в сторону ближайшего большего целого; L – номинальная длина усилительного участка.

Тогда целевая функция задачи управления ресурсами оптической IP-over-DWDM принимает вид

$$\sum_h P_{\Sigma}^h(k) \rightarrow \min, \quad (19)$$

а сама задача представляет собой нелинейную (благодаря ограничениям по качеству обслуживания) задачу смешанного целочисленного программирования с ограничениями (1) – (13), для решения которой целесообразно применить численные методы поиска.

Выводы

Таким образом, предлагаемая математическая модель за счет введения трех типов переменных управления объединяет в себе задачи IP-маршрутизации и управления оптическими несущими,

обеспечивая тем самым учет их взаимопроникающего влияния и позволяя решить их совместно или, как минимум, согласованно. При этом в качестве критерия принятия решения предлагается минимум потребляемой электроэнергии, что нацеливает на снижение эксплуатационных расходов и стоимость предоставления телекоммуникационных услуг в целом. Принципиальным отличием предлагаемой модели является ее динамический характер, что с одной стороны, усложняет поиск численного решения, но с другой стороны, обеспечивает учет изменений состояния телекоммуникационной системы во времени (динамика пользовательского трафика, неисправности узлов и трактов передачи, реконфигурация сети).

Список литературы

1. Hart G. *Improving Network Efficiency with Digital Optical Networks* / Gaylord Hart. – Document Number A-NE-10.2010. – Infinera Corporation, 2010. – 8 p.
2. *Traffic Grooming for Optical Networks. Foundations, Techniques, and Frontiers* / [Edited by Rudra Dutta, Ahmed E. Kamal, George N. Rouskas]. – Springer, 2008. – 312 p.
3. Junichi Katou. *A design method of logical topology for IP over WDM networks with stable routing* / Junichi Katou, Shin'ichi Arakawa, Masayuki Murata // *Towards an Optical Internet: New Visions in Optical Network Design and Modelling* / [Edited by Admela Jukan]. – Springer, 2001. – P. 61-78.
4. *On the Design of Energy-Efficient Mixed-Line-Rate (MLR) Optical Networks* / Pulak Chowdhury, Massimo Tornatore, Avishek Nag [and other] // *Journal of lightwave technology*. – Vol. 30, No. 1. – 2012. – P. 130-139.
5. Поповский В.В. Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // *Проблемы телекоммуникаций*. – 2011. – № 2 (4). – С. 3-41.
6. Лемешко А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // *Проблемы телекоммуникаций*. – 2012. – № 4 (9). – С. 16-31.
7. Musumeci F. *A Power Consumption Analysis for IP-Over-WDM Core Network Architectures* / Francesco Musumeci, Massimo Tornatore, Achille Pattavina // *Journal of Optical Communications and Networking*. – 2012. – Vol. 4. Is. 2. – P. 108-117.
8. *Energy Efficient Segmentation-Link Strategies for Transparent IP over WDM Core Networks* / M.N.M. Warip, I. Andonovic, I. Glesk, [and other] // *Journal of Marketing Communications*. – 2014. – Vol. 9. Is. 1. – P. 48-55.
9. *Power consumption modeling in optical multilayer networks* / W. Van Heddeghem, F. Idzikowski, W. Vereecken [and other] // *Photonic Network Communications*. – 2012. – DOI: 10.1007/s11107-011-0370-7.

Поступила в редколлегию 7.08.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.В. Лемешко, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков.

МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ МЕРЕЖІ IP-OVER-DWDM

О.Ю. Євсєєва, Є.Н. Льяшенко

Розвиток телекомунікаційних мереж, в т.ч. Internet, відбувається під впливом двох суперечливих факторів: зростаючі обсяги трафіку і підвищення вимог користувачів до якості їх обслуговування з одного боку і необхідність зниження капітальних і експлуатаційних витрат з іншого. В цьому плані ефективним є застосування технології IP-over-DWDM, яка дозволяє, крім усього іншого, знизити пов'язані з енергоспоживанням витрати. Зростаюча актуальність задачі енергозбереження обумовлює зміну критерію управління телекомунікаційною мережею. В статті пропонується математична модель мережі IP-over-DWDM, що охоплює управління оптичними несучими на рівні DWDM і потоками пакетів трафіку на рівні IP з урахуванням динаміки їх надходження і вимог щодо якості обслуговування, де в ролі критерію оптимальності прийняття рішення виступає кількість споживаної електроенергії.

Ключові слова: оптична мережа, енергозбереження, оптимальне управління ресурсами, IP-over-DWDM.

MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY-EFFICIENT RESOURCE CONTROL IN IP-OVER-DWDM NETWORK

O. Yu. Yevsyeyeva, Y. N. Ilyashenko

The development of telecommunications networks, including Internet, is affected by two contradictory factors. There are the growing volume of traffic and increasing user's requirements for the quality of services on the one hand and the need to reduce capital and operating costs on the other. In this regard, IP-over-DWDM is the effective technological way, which allows, among other things, to reduce the energy consumption. Under the increasing urgency of the energy saving problem criteria of control in telecommunication networks must be changed. In the paper the mathematical model of IP-over-DWDM network, which covers the wavelength's allocation at DWDM level and control of packet traffic flows at the IP level, is offered. The model takes into account dynamics of incoming traffic and requirements for quality of service, and amount of consumed energy is chosen as optimality criterion of control decision.

Keywords: optical network, energy efficiency, optimal resource management, IP-over-DWDM.