
В.Л. Стерин, А.С. Еременко, Тарики Надия

**ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИНТЕЗА ОВЕРЛЕЙНОЙ ВИРТУАЛЬНОЙ
ЧАСТНОЙ СЕТИ**

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

Ключевые слова: модель, очередь, маршрутизатор, перегрузка, поток, пакеты.

Предложена динамическая модель синтеза оверлейных виртуальных частных сетей. Использование модели позволяет обеспечить эффективное управление ресурсами сети провайдера при создании оверлейных виртуальных частных сетей за счет более полного учета динамики процессов информационного обмена, протекающих в ней. Предложенные решения адаптированы как под модель изолированного канала (pipe-модель), так и под распределенную модель (hose-модель), которые поддерживаются в решениях, основанных на MPLS-технологии.

V.L. Sterin, O.S. Yeremenko, Tariki Nadia

DYNAMIC MODEL OF OVERLAY VIRTUAL PRIVATE NETWORK SYNTHESIS

Kharkiv National University of Radio Electronics

Keywords: model, queue, router, overload, flow, packets.

The dynamic model of overlay virtual private networks synthesis proposed. Using the model allows efficient provider's network resource management when creating overlay virtual private networks due to better reflection of the information interchange process dynamics within it. The proposed solutions are adapted as a model of an isolated channel (pipe-model) and a distributed model (hose-model) that are supported in the solutions based on the MPLS.

Эффективное обеспечение высокой (заданной) производительности создаваемых виртуальных частных сетей (VPN) может быть реализовано лишь на основе оптимизации во времени процесса управления (перераспределения) топологическим, канальным и буферным ресурсом сети сервис-провайдера (Р-сети) в интересах множества создаваемых на ее основе виртуальных частных сетей. К сожалению, ввиду непроработанности этих задач производительность VPN-сетей всегда оставляет желать лучшего, особенно в условиях высокой

динамики числа и характеристик клиентских потоков и связанных с ними требований к качеству обслуживания (QoS). Ввиду того, что современные телекоммуникационные сети (ТКС) по определению мультисервисные, при синтезе VPN-сетей необходимо предусмотреть комбинированную реализацию моделей изолированного канала и hose-модели [1]. Учитывая высокую динамику состояния IP/MPLS-сетей, на базе которых, как правило, и создаются VPN, математические модели, описывающие процессы создания и управления ресурсами виртуальных частных сетей, должны относиться к классу динамических [2]. Поэтому предложенные в работах [3, 4] математические модели, представленные разностными уравнениями состояния, будут в настоящей статье адаптированы под новые цели исследования, предметную область и терминологию.

Пусть структура сети провайдера описывается с помощью графа $G = (R, L)$, где $R = \{R_i, i = \overline{1, m}\}$ – множество маршрутизаторов сети провайдера, $L = \{L_{i,j}, i, j = \overline{1, m}, i \neq j\}$ – множество трактов передачи между маршрутизаторами той же Р-сети.

Тогда мощность множества $|R| = m$ определяет общее число маршрутизаторов в Р-сети, а $|L| = n$ – число трактов передачи в ней же. Все множество маршрутизаторов (устройств) сети провайдера в соответствии с принципами построения сети VPN-сетей можно разбить на два

подмножества: $R^{pe} = \{R_i^{pe}, i = \overline{1, m_{pe}}\}$ – подмножество приграничных устройств (маршрутизаторов) сети сервис-провайдера (РЕ); $R^p = \{R_j^p, j = \overline{1, m_p}\}$ – подмножество устройств (маршрутизаторов) сети сервис-провайдера (Р). Каждой дуге $L_{i,j} \in L$ графа, моделирующей соответствующий тракт передачи в Р-сети, ставится в соответствие ее пропускная способность $c_{i,j}^P$.

Пусть общее число создаваемых VPN-сетей равно m_c , это же число определяет количество типов клиентских С-сетей, функционирующих в интересах одной и той же компании (предприятия). Тогда все множество поступающих в сеть провайдера потоков F можно декомпозицировать на подмножества $\{F_g, g = \overline{1, m_c}\}$, где F_g – множество потоков, циркулирующих в g -й VPN. Каждому потоку из множества F_g сопоставляется ряд параметров: R_s^{pe} – s -й РЕ-маршрутизатор, на который поступает поток пакетов в Р-сеть; R_d^{pe} – d -й РЕ-маршрутизатор, через который поток пакетов убывает из Р-сети; $r^{(l,g)}$ – интенсивность l -го потока, циркулирующего в g -й VPN.

В случае моделирования процесса синтеза оверлейных VPN, основанных на туннелировании трафика, модель дополняется следующими обозначениями: $c_{i,j}^{(l,g)}(k)$ – пропускная способность (ПС) тракта передачи, который представлен дугой $L_{i,j} \in L$, выделенная для l -го туннеля (l -го для потока) g -й VPN на k -м временном интервале ($\delta t m/c$); $u_{i,j}^{(l,g)}(k)$ – доля пропускной способности $c_{i,j}^P$ тракта передачи, представленного дугой $L_{i,j} \in L$, которая берется со знаком плюс, если выделяется для наращивания ПС $c_{i,j}^{(l,g)}(k)$ g -й VPN, или со знаком минус при ее перераспределении в интересах других туннелей и (или) виртуальных частных сетей на k -м временном интервале.

Тогда система уравнений, описывающих динамику состояния (топологии и изменения пропускных способностей трактов передачи) создаваемых оверлейных VPN-сетей при распределении ресурсов сети сервис-провайдера, принимает форму:

$$c_{i,j}^{(l,g)}(k+1) = c_{i,j}^{(l,g)}(k) + u_{i,j}^{(l,g)}(k)c_{i,j}^P \quad (1)$$

На переменные состояния и управления, исходя из их физического смысла, накладываются следующие условия-ограничения:

$$0 \leq c_{i,j}^{(l,g)}(k), \quad (g = \overline{1, m_c}), \quad (2)$$

$$\sum_{g=1}^{m_c} \sum_l c_{i,j}^{(l,g)}(k) \leq c_{i,j}^P, \quad (3)$$

$$-1 \leq u_{i,j}^{(l,g)}(k) \leq 1. \quad (4)$$

При этом пропускная способность тракта передачи $L_{i,j} \in L$, выделенная для соответствующего канала $L_{i,j}^{VPN_g}$ g -й оверлейной VPN на k -м временном интервале (бит/с), может быть рассчитана следующим образом:

$$c_{i,j}^g(k) = \sum_l c_{i,j}^{(l,g)}(k) \quad (5)$$

Дополнительной управляющей переменной, вводимой для решения задач маршрутизации в рамках VPN-сетей, служит величина $x_{i,j}^{(l,g)}$, которая характеризует долю l -го потока, протекающего в канале $L_{i,j}^{VPN_g}$ g -й VPN. В соответствии с физикой решаемой задачи на переменные $x_{i,j}^{(l,g)}$ накладываются следующие ограничения

$$x_{i,j}^{(l,g)} \in \{0,1\}, \quad (6)$$

что соответствует реализации оверлейной VPN на основе туннелирования, т.к. между каждой парой РЕ-маршрутизаторов будет для l -го потока рассчитан один путь (туннель).

Условия сохранения потока на РЕ и Р-маршрутизаторах имеют вид

$$\sum_{j:(i,j)} x_{i,j}^{(l,g)}(k) = 1; \quad (7)$$

$$\sum_{j:(i,j)} x_{i,j}^{(l,g)}(k) - \sum_{j:(j,i)} x_{j,i}^{(l,g)}(k)(1 - p_{j,i}^{(l,g)}(k)) = 0; \quad (8)$$

$$\sum_{j:(i,j)} x_{j,i}^{(l,g)}(k)(1 - p_{j,i}^{(l,g)}(k)) = \varepsilon^{(l,g)}(k) \quad (9)$$

где $p_{i,j}^{(l,g)}$ – вероятность потерь пакетов l -го потока на j -м интерфейсе i -го Р-маршрутизатора g -й VPN по причине перегрузки очереди; $\varepsilon^{(l,g)}$ – доля интенсивности l -го потока пакетов, обслуженного g -й VPN.

Условия (7) должны быть справедливы для приграничного РЕ-маршрутизатора, к которому через СЕ-маршрутизатор подключена С-сеть отправитель пакетов, условия (8) – для всех транзитных Р-маршрутизаторов, а условия (9) – для приграничного РЕ-маршрутизатора, к которому через СЕ-маршрутизатор подключена С-сеть получатель пакетов. Для примера, в случае моделирования процесса обслуживания пакета системой массового обслуживания $M/M/1/N$, вероятность потерь пакетов на интерфейсе маршрутизатора (для удобства индексы опущены) может быть рассчитана как

$$p = \frac{(1-\rho)\rho^N}{1-\rho^{N+1}}, \quad (10)$$

где P – коэффициент загрузки канала; $N = \Theta_{буф} + 1$ – максимальное число пакетов, которое может находиться на интерфейсе, включая буфер ($\Theta_{буф}$) и сам канал.

В ходе расчета маршрутных переменных $x_{i,j}^{(l,g)}$ необходимо, чтобы для l -го потока вероятность потерь пакетов была не больше допустимой ($P_{доп}^{(l,g)}$), что в рамках выражений (7)-(9) может быть сформулировано как

$$1 - \varepsilon^{(l,g)} \leq P_{доп}^{(l,g)}. \quad (11)$$

Численные значения допустимой вероятности потерь пакетов для того или иного типа потока, для примера, указаны в рекомендации ITU-T Y.1541. Для каждой конкретной поддерживаемой услуги эти значений могут несколько отличаться.

При реализации распределенной модели обеспечения качества обслуживания в MPLS/VPN-сетях сумма всех интенсивностей $r^{(l,g)}$ потоков, исходящих от одного РЕ-маршрутизатора не должна превышать установленное значение согласованной входной скорости ICR. А сумма всех произведений $r^{(l,g)} \varepsilon^{(l,g)}$ для потоков, которые поступают на данный РЕ-маршрутизатор, не должна превышать значения согласованной выходной скорости ECR.

Для предотвращения перегрузки каналов создаваемых виртуальных сетей клиентскими потоками необходимо обеспечить выполнение условий:

$$\sum_l r^{(l,g)} x_{i,j}^{(l,g)}(k) \leq c_{i,j}^g(k), \quad (g = \overline{1, m_c}). \quad (12)$$

Для предотвращения перегрузки каждого конкретного туннеля в рамках создаваемых оверлейных VPN маршрутизируемыми по ним клиентскими потоками необходимо обеспечить выполнение условий:

$$r^{(l,g)} x_{i,j}^{(l,g)} \leq c_{i,j}^{(l,g)}(k), \quad (g = \overline{1, m_c}). \quad (13)$$

Подобное решение адекватно подходит под реализацию модели изолированного канала (pipe-модели) при построении MPLS/VPN-сети, где параметр $r^{(l,g)}$ определяет уровень гарантированного качества обслуживания по пропускной способности такого канала (туннеля). В технологии MPLS подобные туннели представляют собой пути коммутации по меткам с гарантированной пропускной способностью (guaranteed bandwidth LSP).

В качестве критерия оптимальности решений по созданию оверлейной VPN может служить минимум следующего функционала

$$J = \sum_{k=1}^{K^{VPN}} \left[\sum_{g=1}^{m_c} \sum_l \sum_{L_{i,j} \in L} f_{i,j}^{(l,g)}(k) x_{i,j}^{(l,g)}(k) + \sum_{g=1}^{m_c} \sum_l \sum_{L_{i,j} \in L} v_{i,j}^{(l,g)}(k) c_{i,j}^{(l,g)}(k) + \sum_{g=1}^{m_c} \sum_l \sum_{L_{i,j} \in L} \gamma_{i,j}^{(l,g)}(k) u_{i,j}^{(l,g)}(k) \right], \quad (14)$$

в котором $f_{i,j}^{(l,g)}(k)$ – маршрутная метрика канала, представленного дугой $L_{i,j}^{VPN_g}$, для l -го потока на k -м временном интервале; $v_{i,j}^{(l,g)}(k)$ – относительная стоимость использования единицы пропускной способности канала, представленного дугой $L_{i,j}^{VPN_g}$, в интересах l -го туннеля на k -м временном интервале; $\gamma_{i,j}^{(l,g)}(k)$ – условная стоимость процесса перераспределения пропускной способности трактов передачи сети сервис-провайдера между туннелями создаваемых оверлейных VPN-сетей на k -м временном интервале.

Использование критерия (14) позволяет минимизировать условные суммарные затраты на синтез оверлейных VPN-сетей (второе и третье слагаемое), представленных в виде туннелей, и на

их функционирование с точки зрения маршрутизации по ним клиентских потоков (первое слагаемое). Управление созданием оверлейных VPN-сетей организуется на некотором упреждающем временном интервале – интервале прогнозирования, что позволяет более гибко перераспределять ресурсы сети сервис-провайдера между VPN-туннелями одной или различных виртуальных частных сетей.

Литература:

1. Олвейн В. Структура и реализация современной технологии MPLS: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004, 480 с.
2. Поповский В.В., Лемешко А.В., Евсеева О.Ю. Математические модели телекоммуникационных систем. Часть 1. Математические модели функциональных свойств телекоммуникационных систем [Электронный ресурс] // Проблемы телекомунікацій, 2011, № 2 (4), с. 3-14. Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/2/1/112_popovsky_functional.pdf.
3. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС [Электронный ресурс] // Проблемы телекомунікацій, 2011, № 3 (5), с. 8-17. Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf.
4. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Оптимизация структурного и функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети // Системи обробки інформації, 2012, Вип. 9 (107), с. 186-190.