

ФОРМАЛИЗОВАННОЕ ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТА ВИРТУАЛЬНЫХ ЧАСТНЫХ СЕТЕЙ

А. Н. Грязев, и.о. генерального директора ФГУП ЦНИИС; agryazev@zniis.ru

Приведено формализованное описание технологии транспорта виртуальных частных сетей (VPN). Показано, что при построении VPN целесообразно использовать в качестве критерия оптимальности значение суммарной минимальной пропускной способности, которую требуется выделить из ресурса магистральной первичной сети связи общего пользования.

Ключевые слова: транспортная сеть связи, технология VPN, ресурс пропускной способности, отказ, авария, граф, резервирование, ограничения, условия реализации.

Введение. Существует реальная возможность [1] построения транспортных сетей (ТС) сетей связи специального назначения (ССН) [2] по технологии VPN как телекоммуникационных сетей, наложенных на сеть связи общего пользования (ССОП). Необоснованное увеличение выделяемой пропускной способности для виртуальной транспортной сети (ВТС) приводит к уменьшению коэффициента использования ресурсов ССОП и, в конечном итоге, к необоснованному увеличению цены за предоставление этих ресурсов. Немотивированное уменьшение выделяемой пропускной способности для ТС может привести к потере функциональности сетей ССН. Для достижения оптимального компромисса при решении этой актуальной задачи необходимо формализованное описание технологии транспорта VPN.

Построение ВТС — комплексная задача, являющаяся совокупностью задач построения структуры ВТС, оптимизации ресурсов ССОП для реализации ВТС, оптимальной маршрутизации трафика ВТС, нахождения кратчайших путей от одного из узлов ВТС ко всем остальным. Оптимизация ресурсов ВТС подразумевает определение минимальной необходимой пропускной способности звеньев и узлов ВТС. Задача оптимальной маршрутизации трафика в ВТС подразумевает определение набора возможных обходных маршрутов с необходимой резервной пропускной способностью.

Допущения. Необходимо ввести три допущения. Во-первых, несмотря на то, что, в принципе, отказать могут как звенья, так и узлы ВТС, будем рассматривать отказ только одного типа сетевого ресурса — звеньев ВТС. Аргументируем это тем, что неисправность узла ВТС можно интерпретировать как отказ звеньев, примыкающих к этому узлу. Во-вторых, звенья ВТС изначально будут иметь бесконечную пропускную способность. Это допустимо, поскольку пропускная способность сети провайдера, как правило, намного превышает пропускную способность ВТС. В-третьих, при анализе уязвимости звеньев ВТС будем рассчитывать на худший случай в рамках имеющейся неопределенности.

Методика построения ВТС. С учетом допущений формализацию задачи разработки методики построения ВТС можно выполнить на основе составной модели аварии и ее последствий.

Пусть имеется магистральная первичная ССОП, заданная в виде неориентированного графа $G(MN)$, без петель и контуров. Множество вершин $M = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \in G$

соответствует узлам сети (маршрутизаторы), где m — число вершин в графе $G(|M|)$. Множество ребер $N = \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \subset M \times M \in G$ соответствует звеньям сети, связывающим узлы a_i и a_j соответствующих каналов связи между этими узлами. Звеньям сети графа $G(MN)$ приписаны веса (длина звена), которые заданы матрицей $L = \|a_{ij}\|_{m \times m}$; $i, j = \overline{1, m}$, в направлении от вершины $i \in M$ к вершине $j \in M$.

Пусть на ресурсах первичной сети с графом $G(MN)$ реализуется ВТС, заданная графом $G^{ВТС}(M'N') \in G$. Каждому элементу графа $G(MN)$ поставим в соответствие элемент графа $G^{ВТС}(M'N')$, т.е. справедливо $M' \subseteq M$, $N' \subseteq N$, где $M' \in G^{ВТС}$ — множество вершин; $N' \in G^{ВТС}$ — множество ребер, соединяющих вершины. Совокупность конечных точек ВТС W определим как подмножество вершин множества M' , $W \subseteq M'$.

Для каждой конечной точки ВТС $i \in W$ задана пара значений максимального трафика на входе и выходе $C_i^{вх}$ и $C_i^{вых} \in Z_+$ (Z_+ — множество действительных положительных чисел). Обозначения $c^{вх}(i) \in C_i^{вх}$ и $c^{вых}(i) \in C_i^{вых}$ представляют собой верхнюю границу скорости передачи трафика, которую конечная точка $i \in W$ может получать от всех остальных конечных точек или отправлять всем остальным конечным точкам соответственно.

На каждом ребре $e \in G^{ВТС}$ необходимо выделить из общедоступного максимального трафика C_{ij} минимально возможную пропускную способность $c(i, j)$ в направлении от вершины i к вершине j и пропускную способность $c(j, i)$ в направлении от вершины j к вершине i для реализации ВТС с учетом гарантированной передачи информационного потока. При этом в реализуемой ВТС необходимо найти такое распределение суммарной пропускной способности с минимальным значением $C_{\min}^{ВТС}$, чтобы граф $G^{ВТС}(M'N')$ с полосами пропускания $c(i, j)$ каждого ребра $e \in G^{ВТС}$ мог обеспечить поддержку любой допустимой матрицы трафика Y с учетом занятия соответствующих выделенных полос пропускания на отдельных участках первичной сети связи.

Для графа $G(MN)$ также введем набор тяготеющих пар $H = \{v_1, v_2, \dots, v_h\}$ — вершин (a_{s_i}, a_{t_i}) графа G , являющихся истоком a_{s_i} или стоком a_{t_i} для v -й пары v_i , $i = \overline{1, h}$. Вершины $M \times M \setminus H$ являются транзитными. Каждому ребру $r_i \in N$ формально сопоставим пару противоположно направленных потоков e_i , e_{i+n} , соответственно.

При этом для любой вершины $a \in M$ множества $T(a)$ и $S(a)$ являются индексами входящих и исходящих ребер сети. Обозначим матрицу распределения потоков по ребрам сети через $f = \{f_{ij}\}$, $f_{ij} > 0$ и будем считать, что в транзитных для v_i узлах графа выполняются условия сохранения потока i -го вида по ребру e_j . На ребрах исходного графа $G(MN)$ заданы веса, определяющие целочисленные значения $C_k \in Z_+$ (Z_+ — множество действительных положительных чисел) пропускной способности ребер C_k , $k = \overline{1, n}$. Набор $C = \{C_k | k = \overline{1, n}\}$ задает ограничения на распределение ее по ребрам сети.

В случае одиночного отказа ребра необходимо найти не только множество резервных ребер $r^{pe3} = (i, j) \in R^{pe3}$ резервного пути передачи трафика конечных точек $W'(i, j)$, но и определить пропускные способности $c^{pe3}(i, j)$, $(i, j) \in R^{pe3}$, необходимо зарезервировать на ребрах резервного пути $r^{pe3} \in W'(i, j) \setminus D$ дерева $e \in D \cap \sigma_{nm}$ таким образом, чтобы для любого ребра $e(i, j) \in D$ между всеми конечными точками $G^{BHTC}(M'N')$ существовал путь $W(i, j) \in (G^{BHTC} \setminus D) \cup r^{pe3}$, на котором суммарная резервируемая пропускная способность была минимальной.

Предположим, что на магистральной первичной ССОП, заданной в виде неориентированного графа $G(MN)$, произошла авария двух и более (заранее неизвестно каких) ребер $R(x)$ сети, а множество узлов остается прежним. Для графа $G(MN)$ введем понятие дерева логического графа $D(M^hH)$, которое будет неориентированным, возможно состоящим из $j \leq h$ компонент связности, где

$M^h = \{a \in M | \exists v_i \in H : a = a_{s_i} \text{ или } a = a_{t_i}\}$ — подмножество вершин графа G , являющихся истоком или стоком для тяготеющей пары v_i , $i = \overline{1, h}$; $H = \{v_1, v_2, \dots, v_h\}$ — множество логических ребер дерева $D(M^hH)$, соединяющих исток a_{s_i} и сток a_{t_i} для i -й пары.

Всем ребрам $v_i \in H$ логического графа приписаны числа $c_i > 0$, измеряемые в условных единицах потока, указывающие какой поток следует пропустить по i -му логическому ребру и имеющие смысл требований на величину потока для i -й тяготеющей пары. При этом пусть распределение потоков в сети после разрушения производиться исходя из лексикографически минимаксного правила.

Если $c \in Z(C)$, $c = (c_1, c_2, \dots, c_h)$, то выполняется условие, при котором сеть будет называться допустимой. Если в результате аварии, которую обозначим x , вышло из строя некоторое множество ребер $R(x)$, то $C_j = 0$ для $r_j \in R(x)$ и $C_j(x) = C_j$ для $r_j \notin R(x)$. Если масштаб аварии $S(x) < W_0$ достаточен для разрушения минимального разреза, т.е. суммарная пропускная способность вышедших из строя ребер $r_j \in R(x)$ максимальна, то необходимо найти множество $R(x')$ из не более $R(x)$ ребер, при удалении которых из сети разъединяется максимальное число тяготеющих пар. Решение задачи будем искать в виде комбинации простых разрезов R из множества $\bar{R} = \{R_i | S(R_i) \leq W_0, i = \overline{1, h}\}$.

В дальнейшем решается задача оптимального пополнения дерева логического графа, т.е. необходимо таким образом найти несократимые разрезы $R \in M^h$, что удаление рассматриваемого ребра r из R приведет к увеличению ущерба, т.е. R является несократимым при $\forall r \in R, U(R \setminus \{r\}) \subset U(R)$. Затем требуется определить множество резервных ребер $r^{pe3} = (w, c) \in R^{pe3}$ резервного пути передачи трафика конечных точек $W'(w, c)$ и пропускные способности $c^{pe3}(w, c)$, $(w, c) \in R^{pe3}$. Их необходимо зарезервировать на ребрах резервного пути $r^{pe3} \in W'(w, c) \setminus D$ дерева $e \in D \cap \sigma_{wc}$ так, чтобы для любого ребра $e(w, c) \in N'$ между всеми конечными точками $G^{BHTC}(M'N')$ существовал путь $W(w, c) \in (G^{BHTC} \setminus D) \cup r^{pe3}$ на котором суммарная резервируемая пропускная способность была минимальной $c^{pe3}(w, c) \rightarrow \min$.

Нахождение оптимального покрывающего дерева графа $G^{BHTC}(M'N') \in G$ с учетом комплексного дестабилизирующего воздействия аварий различного характера позволит так провести пополнение и распределение защитной пропускной способности, чтобы требуемая суммарная пропускная способность с учетом комплексного воздействия была минимальной.

Задача в такой постановке соответствует в теории графов расчету кратчайшего пути и поиску оптимального покрывающего дерева с последующим решением задач о максимальном потоке и минимальном разрезе, поиску наименьших общих предков и оптимальному пополнению графа. Для их решения могут применяться традиционные методы теории графов [3–10]. Таким образом, математически задача исследования может быть сформулирована в следующем виде.

Исходные данные:

- граф первичной сети $G(MN)$, $M = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \in G$, $N = \{r_1, r_2, \dots, r_n\} \subset M \times M \in G$; $L = \|a_{ij}\|_{m \times m}$, $i, j = \overline{1, m}$;
- граф ВТС $G^{BHTC}(M'N') \in G$, $M' \subseteq M$, $N' \subseteq N$, $W \subseteq M'$;
- логический граф $D(M^hH)$, $H = \{v_1, v_2, \dots, v_h\}$;

$$M \times M \setminus H, r_i(e_{i+n}) \in N;$$

$$M^h = \{a \in M | \exists v_i \in H : a = a_{s_i} \text{ или } a = a_{t_i}\}, v_i \in H, i = \overline{1, h};$$

$$C_k \in Z_+, C = \{C_k | k = \overline{1, n}\}.$$

Ограничения:

$$\min \left\{ \sum_{i \in W_i^{(i, j)}} C_{ij}^{BHTC}, \sum_{j \in W_j^{(i, j)}} C_{ij}^{BHTC} \right\}, \sum_{j \in S(a)} f_{ij} = \sum_{j \in T(a)} f_{ij} \forall a \neq a_{s_i}, a_{t_i};$$

$$\sum_{j \in S(a_i)} f_{ij} = \sum_{j \in T(a_i)} f_{ij}, i = \overline{1, h}, r_j \in R(w) \rightarrow \max;$$

$$\sum_{i=1}^h (f_{ik} + f_{i(k+n)}) \leq C_k \forall r_k \in N, c \in Z(C), c = (c_1, c_2, \dots, c_h);$$

$$S(x) < W_0, \forall r \in R, U(R \setminus \{r\}) \subset U(R);$$

$$U(R) = \{i | R \text{ разделяет } v_i\};$$

$$U(R) = U(R_1) \cup U(R_2) \cup \dots \cup U(R_{m-1}), \sum_{r_j \in R(x)} C_j < W_0.$$

Условия реализации:

$$C^{BHTC} = \sum_{(i, j) \in W} c(i, j), C_{\min}^{BHTC} = C_{\text{opt}}^{BHTC};$$

$$Y : |W| \times |W| \rightarrow Z_+ : \sum_{i \in W, i \notin j} c(i, j) \leq C_j^{BHTC} \text{ и } \sum_{i \in W, i \notin j} c(i, j) \leq C_j^{\text{BHTC}}$$

для любого $j \in W$;

$$\max_{R \in N} \sum S(R), \bar{R} = \{R_i | S(R_i) \leq W_0, i = \overline{1, h}\},$$

$$\bar{R} = \{R_i | U(R_i) \leq W_0, i = \overline{1, a}\};$$

$$U(R \setminus \{r\}) \subset U(R), \forall r \in R, R \in M^h;$$

$$W(i, j) \in (G^{BHTC} \setminus D) \cup r^{pe3} = \text{истина и } \sum_{(i, j) \in R^{pe3}} c^{pe3}(i, j) \rightarrow \min.$$

Заключение. Формализовано описание технологии транспорта виртуальных частных сетей, наложенных на сеть связи общего пользования. При формировании ВТС в качестве критерия оптимальности целесообразно использовать суммарную минимальную пропускную способность, которую требуется выделить из ресурса магистральной первичной сети связи общего пользования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Грязев А. Н.** Способы организации, классификация и технологии создания виртуальных частных сетей // *Электросвязь*. — 2015. — № 5. — С. (51-55).
2. Федеральный закон Российской Федерации от 7 июля 2003 года «О связи».
3. **Басакер Р., Саати Т.** Конечные графы и сети: Перевод с англ. — М.: Наука, 1974.
4. **Берж К.** Теория графов и ее применения: Перевод с франц. — М.: ИЛ, 1962. — 319 с.
5. **Емеличев В. А., Ковалев М. М., Кравцов М. К.** Многогранники, графы, оптимизация. — М.: Наука, 1981. — 344 с.
6. **Зыков А. А.** Основы теории графов. — М.: Наука, 1987.
7. **Кристофидес Н.** Теория графов. Алгоритмический подход. — М.: Мир, 1978. — 432 с.
8. **Оре О.** Теория графов. — М.: Наука, 1980.
9. **Майника Э.** Алгоритмы оптимизации на сетях и графах: Перевод с англ. — М.: Мир, 1981.
10. **Свами М., Тхуласираман К.** Графы, сети и алгоритмы. — М.: Мир, 1984.

Получено 20.04.15

ИНФОРМАЦИЯ

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ДЕНЬ «ДЕВУШКИ В ИКТ»

23 апреля 2015 года Зональное отделение (ЗО) МСЭ для стран СНГ вместе с Московским техническим университетом связи и информатики организовало в режиме видеоконференции семинар-встречу для стран СНГ/РСС. Мероприятие посвящалось 150-летию МСЭ.

Согласно Резолюции 70 (Пересм. Гвадалахара, 2010) Полномочной конференции МСЭ, День девушек в ИКТ проводится в четвертый четверг апреля. Инициатива МСЭ рассчитана на то, что ИКТ-компании, другие организации, имеющие подразделения ИКТ, учреждения по профессиональной подготовке в сфере ИКТ, университеты, исследовательские центры будут устраивать день открытых дверей для девушек и информировать их о возможностях профессиональной реализации в сфере информационных технологий, которые сами по себе являются инструментом достижения гендерного равенства.



Открывая заседание, руководитель ЗО **О. Кайыков** поздравил всех, кто принял участие в семинаре: и присутствующих в офисе ЗО в Москве, и тех, кто собрался в учебных аудиториях в Одессе, Бишкеке, Астане, Кишиневе, Баку. Его доклад был посвящен 150-летней истории и достижениям МСЭ в продвижении ИКТ.

Гендерная политика МСЭ и роль женщины в секторе ИКТ были представлены в презентации специалиста

ЗО МСЭ для стран СНГ **В. Соловьевой**. Положительные примеры в области карьерного роста среди женщин, задействованных в секторе ИКТ развивающихся стран, конечно, оказывают сильное эмоциональное воздействие, хотя за основу сообщения интереснее было бы взять аналитику, имеющую отношение к реалиям стран СНГ. И таким действенным примером стало видеосообщение студентки Евразийского национального университета им. Л. Н. Гумилева **М. Торыбай** и **М. Тулепкалиевой** о практико-ориентированном обучении информационным технологиям. А студентки Одесской национальной академии связи им. А. С. Попова (ОНАС) порадовали статистикой: практически 100% выпускников имеют возможность трудоустроиться. И опять же гендерное равенство соблюдено: на факультете социологии девушек 95%, на экономическом — 70% и только на радиотехническом, что, впрочем, не удивляет, всего треть.

Поздравляя собравшихся с праздником, президент Международной академии связи **А. Оситис** поделилась опытом гармонизации профессионального успеха и личной жизни. Пройдя все ступени мастерства классического связиста, сегодня Анастасия Петровна возглавляет самое авторитетное телеком-сообщество в России.

О широких возможностях, которые открывает перед слабым полом владение ИКТ, рассказали специалист Департамента регулирования радиочастот Минкомсвязи России **О. Навернова**, директор Центра статистики и мониторинга информационного общества Института статистических исследований и экономики знаний НИУ-ВШЭ **Г. Абдрахманова**, главный специалист сектора экономики и административно-хозяйственной деятельности Исполкома РСС **Н. Сычугова**, сотрудники Учебного центра МТУСИ **Р. Елисеева** и **С. Угарова**, специалист компании «Интервэйл» **Д. Мухитдинова**. Уже два

вклада (по онлайн-защите детей и энергоэффективности) подготовила за время сотрудничества с Сектором стандартизации МСЭ-Т **Е. Фомичева**, начавшая карьеру в Администрации связи России, а сегодня — эксперт международного департамента «Ростелекома».

Одна из задач семинара — упрощение доступа к высоким технологиям всем категориям жителей Земли. Этой цели, в частности, служат авторизованные центры ИТ-компаний. Руководитель Центра поддержки академий Cisco **Г. Вальчевская** выступила с предложением организовывать центры тестирования, имеющие право на выдачу промышленных сертификатов, на базе образовательных учреждений.

Сегодня, как известно, для выпускников Сетевой академии Cisco существует два вида сертификатов — об окончании курсов Cisco и индустриальный сертификат, действующий три года, так как он подтверждает актуальные знания и квалификацию, и имеющий индивидуальный номер, который заносится в базу данных Cisco, благодаря чему работодатель может его проверить. Экзамен на индустриальный сертификат слушатели должны сдавать в авторизованном центре тестирования Pearson VUE, который имеет договор с Cisco. В то же время и для инструкторов, и для студентов академий Cisco было бы удобнее, чтобы такие квалификационные центры действовали в самих образовательных учреждениях, особенно в вузах.

К итогам встречи, посвященной Международному дню «Девушки в ИКТ», можно также отнести предложения о необходимости «реанимировать» институт наставничества для молодых специалистов, организовать работу по статистике занятости женщин в российской отрасли ИКТ, инициировать программы утилизации электронных отходов и обучения детей с младшего школьного возраста азам кибербезопасности.