

УДК 621.397

СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ГЕТЕРОГЕННОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ xWDM



[Д.В. АГЕЕВ,](#)

[ХАЙДАРА АБДАЛЛА](#)

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Запропоновано метод структурного синтезу гетерогенної оптичної мережі з кільцевою топологією магістрального сегмента з використанням моделі еластичної мережі. Застосування даної моделі дозволило скоротити часові витрати на розв'язання задачі.

Heterogeneous optical network with ring topology on backbone segment structural synthesis method was proposed, which use model of elastic network. Application of this model has reduced the time required for solving this problem.

Предложен метод структурного синтеза гетерогенной оптической сети с кольцевой топологией магистрального сегмента с использованием модели эластичной сети. Применение данной модели позволило сократить временные затраты на решение задачи.

Введение

В современном обществе информационные технологии занимают очень важное место и играют заметную роль в ее дальнейшем развитии. Именно от технологий обработки информации и ее предоставления в необходимой форме пользователям информационных систем зависит эффективность принятия управленческих решений. Также следует отметить, что информационные технологии играют немаловажную роль (образовательную, коммуникационную, развлекательную и др.) и получили широкое распространение в жизни людей.

Большую, системообразующую роль при этом играют телекоммуникационные системы, которые обеспечивают обмен информацией между всеми территориально удаленными элементами информационной системы и именно от эффективности телекоммуникационных систем в значительной степени зависит эффективность информационных систем. В качестве базовой концепции построения современных телекоммуникационных систем принята концепция NGN, которая позволяет строить мультисервисные сети с гарантированным качеством обслуживания.

Важной составляющей сетей NGN являются транспортные сети. Наиболее перспективными и эффективными являются оптические сети, которые позволяют обеспечить высокие скорости передачи данных. Наиболее часто для построения оптических транспортных сетей используется технология xWDM, которая позволяет

более полно использовать пропускную способность волоконно-оптического кабеля и может использоваться самостоятельно или как базовая для наложенных на нее сетей. В оптических сетях xWDM информационные потоки передаются с использованием оптических несущих и вдоль всего пути передачи потока через сеть он не обрабатывается и не меняется его содержимое. Кроме того, в большинстве случаев неизменной остается и сама длина волны, используемая для передачи потока. По этой причине при назначении длин волн в сети может возникать ситуация, когда в сети на различных ее участках есть незанятые длины волн (есть незадействованные пропускные способности каналов связи), но произвести выбор маршрута и длины волны для обеспечения передачи информационного потока между оконечными узлами невозможно. Следовательно, методы структурного и параметрического синтеза используемые при проектировании оптических сетей, отличаются от методов, применяемых для сетей с коммутацией пакетов.

В качестве топологии оптической сети могут использоваться различные ее виды: такие как «звезда», шина, «дерево» и др., но большую популярность получила топология «кольцо», которая позволяет с минимальным количеством связей получить двухсвязную структуру. Построение сетей, имеющих различную топологию на разных участках (гетерогенных сетей), позволяет использовать преимущества каждой из них для повышения эффективности системы в целом.

В данной статье рассматривается метод структурного синтеза гетерогенной оптической сети с мультиплексированием по длине волны.

I. Анализ публикаций

Применение технологий оптической сети при построении транспортных сетей доказала на практике свою эффективность, что достигается в первую очередь за счет большой пропускной способности оптических волокон. В то же время методы проектирования сетей xWDM отличаются от сетей с коммутацией пакетов. В статьях, посвященных задаче синтеза данного класса сетей, в качестве ограничений при решении приведенных выше задач используются требования:

- существование пути между любой парой отправитель-адресат, использующего одну и ту же длину волны;
 - запрет на использование в одном канале связи одинаковых длин волн для передачи информационных потоков разных пар отправитель-адресат;
 - ограничение на количество длин волн, используемых в каналах связи.
- При синтезе сетей xWDM используются различные критерии, такие как:
- минимум уровня блокировки соединений [1];
 - минимум числа используемых длин волн [2];
 - минимум вероятности перегрузки сети [3];
 - минимум нагрузки на сеть [3].

Перечисленные критерии направлены в первую очередь на повышение эффективности использования оптических сетей и увеличение запаса неиспользуемой

пропускной способности (если поступающая нагрузка меньше пропускной способности сети) или удовлетворение максимального количества требований (если нагрузка превышает пропускную способность). Использование указанных критериев оправдано, когда топология сети известна и не подлежит изменению. В то же время при синтезе топологии сети более адекватным является использование критерия минимума стоимости.

При построении транспортных оптических сетей могут использоваться как однородные структуры, так и иерархические и гетерогенные. Решению задачи структурного синтеза иерархической сети, которая содержит IP-сеть, наложенную на оптическую сеть DWDM, посвящена статья [4]. За счет установки в части узлов оптической сети IP-маршрутизаторов появляется возможность перегруппировать потоки и произвести конвертацию используемой длины волны. Это увеличивает пропускную способность сети и уменьшает количество не используемых (заблокированных) длин волн в каналах связи оптической сети.

Один из методов, позволяющий решить задачу синтеза топологии гетерогенной сети с кольцевой топологией магистрального сегмента, описан в работе [5]. Данный метод базируется на применении методики эластичной сети, позволяет уменьшить время, необходимое для нахождения оптимальной топологии магистрального сегмента и ориентирован на применение для структурного синтеза сетей с коммутацией пакетов.

В данной статье предложен метод структурного синтеза гетерогенной полностью оптической сети с кольцевой топологией магистрального сегмента, который учитывает особенности функционирования и планирования xWDM-сетей.

II. Предметная постановка задачи проектирования транспортной сети

Проектируемая телекоммуникационная система предназначена для обеспечения передачи информационных потоков между узлами сети и базируется на применении технологии xWDM. Информационные потоки, передаваемые через сеть xWDM, используют одну и ту же длину волны вдоль всего светового пути. В промежуточных узлах оптической сети длина волны, используемая в оптическом пути, не изменяется. Сеть имеет гетерогенную топологию, содержащую кольцевую структуру на магистральном сегменте и смешанную топологию в остальной части сети.

Задано:

$$A = \{a_i\}$$

– множество узлов проектируемой сети;

$$Z = \{z_i\}$$

– множество узлов оптической xWDM – сети, которые могут быть включены в магистральное кольцо, $Z \subset A$;

$$\{z_i^x, z_i^y\}$$

– географические координаты узлов сети, которые могут быть включены в магистральное кольцо;

- K – количество узлов оптической сети, включенные в магистральное кольцо;
- $B = \{b_{ij}\}$ – множество каналов связи оптической сети нижнего уровня,
 $b_{ij} = (a_i, a_j)$;
- $D^a = \|d_{ij}^a\|$ – матрица затрат на строительство линий связи сети нижнего уровня между узлами a_i и a_j ;
- D^z – удельные затраты на строительство 1 км линии связи магистрального сегмента сети;
- $M = \{\mu_k\}$ – множество потоков, передаваемых между узлами сети источник-получатель;
- $\mu_k = (a_{ki}, a_{kj})$ – поток, передаваемый между узлами a_i и a_j ;
- $\Lambda = \{\lambda_i\}$ – множество длин волн, использование которых допустимо в рамках используемой технологии оптической сети.

Необходимо найти:

- множество узлов магистрального сегмента сети;
- топологию магистрального сегмента и остальной части сети;
- маршруты передачи световых потоков;
- распределение длин волн на световых путях волоконных каналов связи сети.

Критерием оптимальности является минимум затрат на строительство сети.

Этот критерий показывает оптимальное использование пропускной способности оптической сети, запас на резервирования потоков, что обеспечивает устойчивость работы системы при нарушении ее целостности.

III. Математическая постановка задачи

Используя предметную постановку, перейдем к ее математической постановке. Введем переменные, используемые при проектировании сети:

- $\Gamma^Z = (V^Z, E^Z)$ – граф, описывающий топологию магистрального сегмента проектируемой сети;
- $\Gamma^A = (V^A, E^A)$ – граф, описывающий исходную топологию сегмента сети нижнего уровня;
- $\Gamma'^A = (V'^A, E'^A)$ – граф, описывающий результирующую топологию сети нижнего уровня, $V'^A \subseteq V^A, E'^A \subseteq E^A$;
- $\Gamma = \Gamma^A \cup \Gamma^Z$ – граф, описывающий топологию сети, используемую при решении задачи синтеза топологии, выборе маршрутов и распределении длин волн в проектируемой оптической сети;

- x_{ij}^A — переменная, характеризующая использование линий связи на нижнем уровне сети, $x_{ij}^A = 1$, если $(v_i, v_j) \in E^A$, иначе $x_{ij}^A = 0$;
- x_{ij}^Z — переменная, характеризующая использование линий связи в магистральном сегменте сети, $x_{ij}^Z = 1$, если $(v_i, v_j) \in E^Z$, иначе $x_{ij}^Z = 0$;
- d_{ij}^Z — затраты на строительство линии связи на магистральном сегменте сети
- $$d_{ij}^Z = D^Z \sqrt{(z_i^x - z_j^x)^2 + (z_i^y - z_j^y)^2};$$
- $\Pi_k = \{\pi_{kp}\}$ — множество допустимых путей для передачи потока μ_k в графе Γ ;
- x_{kp} — переменная, характеризующая использование пути π_{kp} для передачи потока μ_k
- $$x_{kp} = \begin{cases} 1, & \text{если путь } \pi_{kp} \text{ используется для передачи потока } \mu_k, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$
- $\xi(v_j) = \{e_i\}$ — множество ребер, инцидентных вершине v_j .

Введем переменную, описывающую использование длин волн для передачи потоков:

$$x^q = \begin{cases} 1, & \text{если длина } \lambda_q \text{ используется, } \lambda_q \in \Lambda; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Следующие переменные характеризуют использование длин волн для передачи потоков данных:

$$x_{qk} = \begin{cases} 1, & \text{если длина волны } \lambda_q \text{ использована для передачи потока } \mu_k, \\ & \text{соответствующего потоку } \mu_k \in M, \lambda_q \in \Lambda; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Переменные, характеризующие использование длин волн вдоль ребер графа, которые используются для передачи потоков:

$$x_{qks} = \begin{cases} 1, & \text{если длина волны } \lambda_q \text{ используется для передачи через ребро } e_s \text{ потока } \mu_k; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Задача минимизации стоимости строительства сети сводится к задаче целочисленного линейного программирования следующего вида:

$$D = \sum_{e=(v_i, v_j) \in E^A} d_{ij}^A x_{ij}^A + \sum_{v_i, v_j \in V^Z} d_{ij}^Z x_{ij}^Z \rightarrow \min. \quad (1)$$

При ограничениях:

$$\sum_{\lambda_q \in \Lambda} x_{qks} \leq x_{ij}^A \quad e_s = (v_i, v_j) \in E^A, \lambda_q \in \Lambda; \quad (2)$$

$$\sum_{v_j \in V^Z} x_{ij}^Z = 2, \quad \forall v_i \in V^Z, \forall v_i, v_j \in V^Z, \exists \pi_{ij} \subset E^Z; \quad (3)$$

$$\sum_{\pi_p \in \Pi_k} x_{kp} = 1, \quad \mu_k \in M; \quad (4)$$

$$x^q \geq x_{qk}, \quad \mu_k \in M, \lambda_q \in \Lambda; \quad (5)$$

$$\sum_{\lambda_q \in \Lambda} x_{qk} = 1, \quad \mu_k \in M \quad (6)$$

$$\sum_{\mu_k \in M} x_{qks} \leq x^q, \quad e_s \in E, \lambda_q \in \Lambda; \quad (7)$$

$$\sum_{e_s \in \xi(v_t)} x_{qks} = x_{qk}, \quad \lambda_q \in \Lambda, \mu_k \in M, v_t \in \{a_{ki}, a_{kj}\}; \quad (8)$$

$$\sum_{e_{s'} \in \xi(v_t), e_{s'} \neq e_s} x_{qks'} \geq x_{qks}, \quad \lambda_q \in \Lambda, \mu_k \in M, \quad (9)$$

$$\sum_{e_s \in \xi(v_t)} x_{qks} \leq 2x_{qk}, \quad \lambda_q \in \Lambda, \mu_k \in M, v_t \in V \setminus \{a_{ki}, a_{kj}\}. \quad (10)$$

Выражение (2) обеспечивает условие, что передача потоков возможна только по каналам связи, входящим в состав результирующего графа сети.

Условие (3) является условием, что магистральный сегмент имеет кольцевую топологию.

Выражение (4) обеспечивает условие использования только одного пути для передачи потока между взаимодействующими абонентами.

Условия (5) и (6) гарантируют, что для передачи потока между узлами сети будет использоваться только одна длина волны из набора допустимых длин волн.

Условие (7) гарантирует, что в любом оптическом канале связи не будет использоваться одна и та же длина волны для передачи разных информационных потоков.

Условия (8) – (10) являются условиями связности сети и существования пути без циклов для передачи потоков на каждой из используемых длин волн.

IV. Метод решения задачи

Для решения поставленной задачи произведем ее декомпозицию на две подзадачи: синтез топологии магистрального сегмента сети и подзадачи одновременно синтеза топологии сети нижнего уровня, выбора маршрутов и назначения длин волн.

При решении подзадачи синтеза топологии магистрального сегмента необходимо также выбрать подмножество узлов, входящих в магистральный сегмент. Для решения данной задачи можно использовать модифицированный метод эластичной сети, который позволяет одновременно решить задачу определения множества узлов магистрального сегмента сети и синтеза ее топологии, и который показал свою эффективность при проектировании сетей с коммутацией пакетов [5, 6].

Эластичная сеть может быть представлена как некоторое количество бусинок, соединенных эластичной резиновой нитью так, чтобы образовалось кольцо. Идея метода состоит в следующем: используя итеративную процедуру, круговой замкнутый маршрут постепенно и неоднородно удлиняется до тех пор, пока, в конце концов, не будет проходить достаточно близко ко всем городам, определяя, таким образом, маршрут.

В качестве городов примем узлы-кандидаты $\{z_i\}$ магистрального сегмента сети. Обозначим города \bar{g}_i и подберем для этих городов соответствие с точками («бусинками») пути \bar{r}_a так, чтобы $\sum_a |\bar{r}_a - \bar{r}_{a+1}|$ была минимальной, и чтобы каждый \bar{g}_i соответствовал, по крайней мере, одной \bar{r}_a . Динамическое уравнение может быть записано так:

$$\Delta \bar{r}_a = -\eta' \sum_i m_i v_{ia} (\bar{g}_i - \bar{r}_a) + \gamma T_k (\bar{r}_{a+1} - 2\bar{r}_a + \bar{r}_{a-1}), \quad (5)$$

где $\Delta \bar{r}_a$ — изменение \bar{r}_a на каждом шаге эволюции;
 m_i — масса узла, под которой мы понимаем суммарное число световых путей, источниками которых являются узлы сети в зоне обслуживания данного узла магистрального сегмента;

$$\eta' = \eta / m_0;$$

η — константа;

$$m_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i \quad \text{— среднее значение массы узла;}$$

γ — относительный вес связи \bar{g}_i и \bar{r}_a по отношению к длине пути;

v_{ia} — вес, который характеризует соответствие бусинки r_a и города g_i и имеет вид:

$$v_{ia} = \frac{e^{-|\bar{g}_i - \bar{r}_a|^2 / 2T_k^2}}{\sum_j e^{-|\bar{g}_i - \bar{r}_j|^2 / 2T_k^2}}, \quad (6)$$

$$T_k = d_T T_{k-1}. \quad (7)$$

Одним из параметров, используемым в данном методе, есть m_i . Опишем методику его расчета.

1. Проинициализируем массив m_i : $m_i = 0, \forall z_i \in Z$.
2. Выбираем узел сети нижнего уровня a_j .
3. Для узла a_j найдем два ближайших к нему узла магистральной сети z_k^j и z_m^j .
4. Увеличим на единицу массу найденных узлов магистрального сегмента сети: $m_s = m_s + 1, z_s \in \{z_k^j, z_m^j\}$.
5. Если все узлы a_j перебраны, то конец алгоритма. Иначе — выбираем следующий узел a_j и переходим на шаг 3.

Алгоритм, таким образом, является процедурой последовательного пересчета положений точек в плоскости городов. Каждая точка пути двигается под влиянием двух типов сил: первая сила тянет их по направлению к ближайшим городам; вторая сила — к их соседям по пути, минимизируя полную длину пути.

В результате такого процесса каждый город воздействует на каждый участок пути. Величина такого воздействия определяется зависимостью первого типа силы от расстояния от города до данного участка пути и от того, как эта сила изменяется в процессе работы алгоритма. В начале все города имеют примерно одинаковое воздействие на каждую точку пути. Но постепенно большие расстояния становятся менее предпочтительными, и каждый город приобретает большее влияние только на ближайшие к нему точки.

Используя метод эластичной сети, предлагается следующий алгоритм решения подзадачи синтеза топологии магистрального сегмента сети:

- запускаем в работу алгоритм эластичной сети;
- после некоторого количества итераций работу алгоритма останавливаем, при этом кольцо не проходит через все узлы сети, а лишь описывает общий вид пути и последовательность обхода будущих узлов доступа;
- производим выбор узлов сети, входящих в состав магистрального сегмента. В качестве таких узлов принимаем ближайший к «бусинке» узел;
- продолжаем работу алгоритма эластичной сети с сокращенным набором узлов (используется только множество узлов, выбранных на предыдущем этапе).

Используя путь, описываемый эластичной сетью, синтезируем граф $\Gamma^Z = (V^Z, E^Z)$. Синтезируем также исходный граф сети нижнего уровня $\Gamma^A = (V^A, E^A)$, где вершины графа соответствуют узлам $\{a_i\}$ проектируемой сети, а ребра — каналам связи $\{b_{ij}\}$ оптической сети.

Граф $\Gamma = (V, E)$, описывающий топологию сети, используемый при решении подзадачи синтеза топологии, выбора маршрутов и распределения длин волн в проектируемой оптической сети, получаем как результат объединения графов Γ^Z и Γ^A , $\Gamma = \Gamma^A \cup \Gamma^Z$.

Используя топологию сети, описываемую графом Γ , решаем задачу (1) – (10). Данная задача относится к задачам линейного программирования, и для ее решения мы использовали программный пакет CPLEX v.12. Полученные в результате реше-

ния задачи линейного программирования переменные x_{ij}^A позволяют определить структуру графа Γ'^A , тогда результирующая топология проектируемой сети описывается графом $\Gamma_0 = \Gamma'^A \cup \Gamma^Z$, а маршруты передачи потоков и привязка длин волн к ним — переменными x_{qks} .

Выводы

В данной статье предложен метод структурного синтеза гетерогенной оптической сети xWDM, который базируется на декомпозиции решаемой задачи на подзадачу синтеза магистрального сегмента и синтеза сегмента сети нижнего уровня с одновременным выбором маршрутов и назначения длин волн.

Применение модифицированной методики эластичной сети позволяет одновременно синтезировать топологию магистрального кольца и определить множество узлов, входящих в магистральный сегмент. Вторая подзадача может быть решена как задача линейного программирования с использованием универсальных программных пакетов, например, CPLEX v.12.

Предлагаемый метод решения задачи позволяет сократить машинное время, требуемое для решения задачи за счет уменьшения времени решения первой подзадачи. Предложенная в статье методика будет полезна на практике при проектировании гетерогенной транспортной сети современных мультисервисных телекоммуникационных систем.

Список литературы:

1. Krishnaswamy R.M., Sivaraman K.N. Algorithms for routing and wavelegth assigment based on solutions of LP-relaxation // IEEE Communication Letters — 2001. — No 5(10). — P. 435 – 437.
2. Lee K., Kang K.C., Lee T., Park S. An optimization approach to routing and wavelegth assigment in WDM all-optical mesh networks without wavelegth conversation // ETRI Jowrnal. — 2002. — No 24(2). — P. 131 – 141.
3. Zang H., Jue J. P., Mukherjee B. A review of routing and wavelegth assigment approaches for wavelegth-routed optical WDM networks // Optical Networks Magazine. — 2000. — P. 47 – 60.
4. Агеев Д.В. Переверзев А.А. Распределение потоков в транспортной сети мультисервисной телекоммуникационной системы с использованием математической модели многослойного графа // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2010. — Вып. 163. — С. 85 – 91.
5. Агеев Д.В. Синтез сети передачи данных с кольцевой структурой на магистральном участке с использованием методики эластичной нейронной сети // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. — 2002. — Вып. 125. — С. 165 – 169.
6. Агеев Д.В. Исследование условий применения методики эластичной сети при проектировании телекоммуникационных систем // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2009. — № 4. — С. 18 – 24.