

# SDH 光传送网络综合路由调度方案

魏 宏<sup>1</sup>, 刘 钢<sup>2</sup>, 陈兴渝<sup>1</sup>, 孟洛明<sup>1</sup>

(1. 北京邮电大学程控交换与通信网国家重点实验室, 北京 100876; 2. 中国电子系统工程公司通信局, 北京 100840)

**摘 要:** 本文提出一种适用于传送网络中的通道调度综合解决方案, 利用传送网络的分割思想, 在各级管理域内部建立多目标优化模型并转化为双目标模型, 通过对双向扫描算法进行改进和扩展, 可以并行搜索到距离最短和转接次数最少两个路径解集, 采用主序法和层次分析法, 得到规划模型的有效解集。

**关键词:** 光传送网; 网络管理; 路由调度算法; 多目标规划模型

**中图分类号:** TN913. 24 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 07-1008-04

## A New Integrated Routing Algorithm for SDH Transport Network

WEI Hong<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>, CHEN Xing-yu<sup>1</sup>, MENG Luo-ming<sup>1</sup>

(1. National Laboratory of Switching Technology & Telecommunication Networks, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. Telecommunication department, China Electronic System Engineering Co., Beijing 100840, China)

**Abstract:** A new integrated routing algorithm for optical transport system has been designed. Based on the idea of segmentation in transport network, a multi-objective optimum model is established in each management domain and simplified to a double-objective model. By ameliorating and extending the double-direction scanning algorithm, we can get two solution sets, one of which consists of k shortest routes and the other comprises k routes with the least relay points. Then the results above are integrated by AHP or double-order method.

**Key words:** optical transport system; network management; routing algorithm; multi-objective optimum model

### 1 引言

当前在同步数字体系 (Synchronous Digital Hierarchy, SDH) 为主的传送网络中, 通道的建立主要采用静态路由调度方式<sup>[1]</sup>. 由于网络规模的扩张, 传统的通道调度不仅需要了解下层节点的拓扑信息, 而且结果只能给出一种路由方案, 不能满足实际需求. 因为实现通道级的保护至少需要一条备选路径, 而且很可能出现通道建立失败的情况, 这时需要重新计算路由. 传统的调度策略不仅开销大, 效率低, 而且只能以传输距离或转接次数一项指标作为选路原则, 不能进行综合评价. 针对上述问题, 本文提出了综合通道调度方案, 不仅可以减轻高层网管的负担, 而且通过一次计算可以得到多条备选路径供用户选择, 运营商还可以根据自己的偏好综合评估各种指标.

### 2 总体方案

采用传统的全局路由算法, 会有以下不足: (1) 上层管理系统需要了解下层的全部节点和链路信息; (2) 不能并行处理, 始终由高层网管独立选路, 效率低; (3) 没有充分考虑实际网络配置情况. 借鉴传送网分割模型思想<sup>[2]</sup>, 各管理域负责自

身的信道调度, 由上层管理系统完成各管理域间的路由调度, 这样可以减轻上层的信息负荷. 这种调度方案与各子网间的物理链路分布有着密切关系. 子网内部的互连程度要远远高于子网间长途干线的连接, 同时子网间互连主要集中在有限的边缘节点之间. 因此可以采取分布式策略: 首先对子网间的边缘节点进行选路, 即选择通道所需经过的子网, 然后各子网实现各自内部的路由选择, 如图 1 所示. 网络层只需负责跨子网的连接, 下层子网对上层可以抽象为逻辑节点.

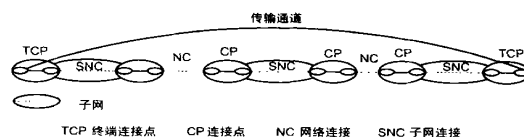


图 1 端到端传输通道路由示意图

单一选路原则会忽略其它因素, 如转接次数、恢复策略等. 这些因素可以转化为路径和节点的权值, 转化方法需根据实际情况来制定, 本文主要解决的是如何依照两个最终指标 (路径长度和转接次数) 来完成选路. 我们采用双向扫描算法, 针对选路原则的多样性, 对该算法进行改进和扩充, 交替进行

收稿日期: 2001-11-26; 修回日期: 2002-06-26

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (No. 90204002); 国家杰出青年科学基金 (No. 60025104); 国家高技术研究发展计划专项经费 (No. 2001AA121051)

正反向两个方向的扫描,同时提供多条备选方案.该算法的一个优点是对初值的要求很松,保证在有限步内得到最优解.

### 3 改进的双向扫描算法

#### 3.1 算法过程

双向扫描算法<sup>[3]</sup>可以用来同时求出  $K$  条最短路径,但这并不能满足要求,为了对结果进行多目标的综合分析,还需要跟踪比较每条路径的转接次数,计算结果以路径长度作为主序,辅序为转接次数.首先为每个顶点设置一个向量,表示从源顶点到该顶点的  $K$  个最短路径值,该算法经过有限迭代,直到得到最优值.下面给出两类特殊的向量运算定义:“广义取最小”和“广义和”运算.广义取最小:令  $A$ 、 $B$ 、 $C$  分别为有序向量,

$$\begin{cases} A = [a_1, a_2, \dots, a_k] & a_1 < \dots < a_k, a_i \in R \\ B = [b_1, b_2, \dots, b_k] & b_1 < \dots < b_k, b_i \in R \\ C = [c_1, c_2, \dots, c_k] & c_1 < \dots < c_k, c_i \in R \end{cases}$$

令  $T$  是向量  $A$ 、 $B$  中的元素构成的集合.广义取最小用符号  $\ominus$  来表示,定义

$$A \ominus B = C, C = [c_i], c_i = \min_j T(j=1, \dots, k)$$

广义和运算:令  $D$  是向量  $A$ 、 $B$  的交叉和的元素的集合,广义和用  $\oplus$  来表示  $A \oplus B = C, C = [c_i], c_i = \min_j D(j=1, \dots, k)$ .令  $A$  是任意有序向量,定义两类特殊的向量  $\bar{F} = [0$

$\dots, j]$  和  $\bar{V} = [\dots, j]$ , 总有以下三个等式成立  $A \ominus \bar{V} = A, A \oplus \bar{V} = \bar{V}, A \ominus \bar{F} = A$ . 设顶点  $i$  到  $j$  的弧长为  $d_{ij}$ , 定义以下符号:  $D_{ij} = [d_{ij}, \dots, j], D = [D_{ij}]$ , 下三角矩阵  $L = [L_{ij}]$ , 上三角矩阵  $U = [U_{ij}]$ .

$$\begin{cases} \text{当 } i > j & L_{ij} = D_{ij}, \text{ 当 } i = j & L_{ij} = \bar{V} \\ \text{当 } i \leq j & U_{ij} = D_{ij}, \text{ 当 } i < j & U_{ij} = \bar{V} \end{cases}$$

注意:上面定义的  $D$ 、 $L$  和  $U$  都是以有序向量为元素的矩阵,不同于普通的矩阵.

令  $E_m^0$  为一个有序向量,包括了从源点到节点  $m$  的  $k$  条最短路径的估计值.  $E^{(0)} = [E_1^0, E_2^0, \dots, E_p^0]$  ( $p$  为图中的节点个数),这里  $E^{(0)}$  实际上是一个有序向量,在第  $r$  次扫描时,该算法构成一个向量  $E_m^r$ ,定义  $E^{(r)} = [E_1^r, E_2^r, \dots, E_p^r]$ , 由以下的递推关系计算:

$$E^{(2r+1)} = E^{(2r)} \ominus E^{(2r+1)} \ominus L \quad (1)$$

$$E^{(2r+2)} = E^{(2r+2)} \ominus E^{(2r+1)} \ominus U \quad (2)$$

式(1)称为反向扫描,式(2)称为正向扫描,两者都要首先计算广义和运算.这两个关系式作为基本迭代的公式就  $r=0, 1, 2, \dots$  每个值进行迭代,直到迭代收敛于最优值.  $D_{ij}$  元素在运算中作为  $k$  最短路径的最后一段弧被挑选出来,并且以前一阶段运算的向量为基础,取其相应的中间点来逐步检查当前最短距离是否发生变化.例如展开  $E_j^{(1)}$  的计算式为:

$$E_j^{(1)} = E_j^{(0)} \ominus E_{j+1}^{(1)} \ominus D_{j+1,j} \ominus \dots \ominus E_p^{(1)} \ominus D_{p,j} \quad (3)$$

在式(3)中把  $D_{j+1,j}, D_{j+2,j}, \dots, D_{p,j}$  作为源点到点  $j$  的最后一段弧,以  $j+1, j+2, \dots, p$  作为中间点,进行“广义和”运算,并且与前一次的结果  $E_j^{(0)}$  进行比较.  $E_{j+1}^{(1)}, E_{j+2}^{(1)}, E_{j+3}^{(1)}, \dots, E_p^{(1)}$  则分别是该次扫描中的求得的从源点到  $j+1, j+2, \dots, p$  这

些点的最短路径的当前向量值.

当  $k$  条最短路径求出后,为了确定路径节点数,采用逆向追踪的方法,设需要寻求从源点到顶点  $i$  的第  $m$  条最短路径,令  $H_m$  为该路径的长度,令  $L_m^i$  为该路径的转接次数,令  $j$  表示与  $i$  相邻的顶点,则有:

$$H_m^i = H_m^j + d_{ij} \quad (4)$$

其中:  $d_{ij}$  是弧  $ij$  的距离;  $H_m^j$  是对应于顶点  $j$  的  $t$  最短路径长度,  $t = m$ , 这样一个过程实际上就是在顶点  $i$  进行顶点搜索,确定满足式(4)的顶点  $j$ , 当  $j$  被找到后,  $L_m^i = L_m^j + 1$ , 重复此过程直至源点,就可得到一条从源点到点  $i$  的第  $m$  条最短路径的所经路线.

#### 3.2 算法扩展

综合考虑路由选择标准,还应考虑通道转接次数.对于高层管理系统,下层节点可能是一个复杂的网络,传统的以距离为标准的算法会产生较大偏差,而通过子网的数目越少,就可以减少子网内部的调度和信道资源的占用.所以转接次数也是一个衡量路由由劣的重要指标.对上面的双向扫描算法进行扩展,使其可以搜索出转接次数最少的多条路径.将每条弧的距离都改为相同的单位值,这样就消除了边与边的传输距离的区别,此时得到的距离最短的路径实际上经过的节点也最少.简单的证明如下:

求证 当各条边长度都取单位 1 时,最短路径实际上就是经过节点最少的路径.

证明 设存在一条路径  $n$  和一条最短路径  $p$ ,  $n$  的长度为  $D_n$ ,  $D_p$  是最短路径  $p$  的长度,  $D_n > D_p$ , 且  $n$  经过节点数  $N_n$  小于路径  $p$  的节点数  $N_p$ , 因为每段路径的长度都为 1, 所以  $D_n = N_n + 1$ ;  $D_p = N_p + 1$ ; 因为  $D_n > D_p$ , 所以  $N_n > N_p$ . 与条件矛盾, 所以原命题成立. 利用双向扫描算法, 通过统一各条边的长度, 就可以轻松的求出  $k$  条转接点最少的路径, 同时这  $k$  条路径还以距离作为辅序.

### 4 最优路径的多目标规划模型

以上解决了算法问题,但是由于还需要形成最终的路由方案,就必须对规划的多种因素进行综合考虑,导致了最优路由规划的多目标性,我们建立多目标规划模型<sup>[4]</sup>来解决.数学

$$\text{模型描述为: } \begin{cases} V\text{-min} f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_p(x)]^T \\ \text{s.t. } x \in X \\ X \subseteq R^n \end{cases}$$

其中:  $V\text{-min}$  表示极小化;  $R^n$  是约束集.若一个多目标优化问题存在最优解,则这个最优解必定是 pareto 最优解,所以可以这样认为: Pareto 解是多目标问题的合理的解集合<sup>[5]</sup>. 本模型已经简化为最简单的双目标规划模型,同时可以得到  $k$  条传输距离最短路径和  $k$  条转接点最少的最优路径.解集中的路径条数  $k$  是根据用户需求设定的,目的是提供更多的备选路由方案.我们设计了两种求解策略:主次序法和层次分析法.主次序法可以用来得到 pareto 最优解集,而层次分析法可以根据实际情况动态的修改评价指标.

#### 4.1 主次序法

该解决方案以用户的侧重点作为选择依据.用户可以设

定一个等级值  $m$ , 作为区间距离. 以最短路径长度  $n$  为基准, 设立  $i$  个等级区间:  $[n, n+m], [n+m, n+2m], \dots, [n+(i-1)m, n+im]$ . 由于在改进的双向扫描算法中, 结果已经采用主辅两种次序排列, 所以只需利用上述的等级区间划分解集即可. 这样就实现了区间外以距离为主序, 而每个区间内部则是以转接次数为主序, 使得用户能够在不同的区间中寻找满意的调度方案, 如图 2 所示建立索引. 如果用户把转接次数作为主要考虑因素, 同样可以设定节点等级数  $m$  作为区间距离. 以最少节点数  $n$  为基准, 设立区间. 只需将两种索引结构进行纵横交叉, 建立双向索引, 运营商首先指定传输距离和转接次数的范围. 在传输距离容忍的程度下增加传输距离来减少转接次数, 通过对检索区间的搜索, 最终达到一个平衡的方案. 上述两部分解集的交集构成了 Pareto 子集, 如果存在最优解, 必在该交集中.

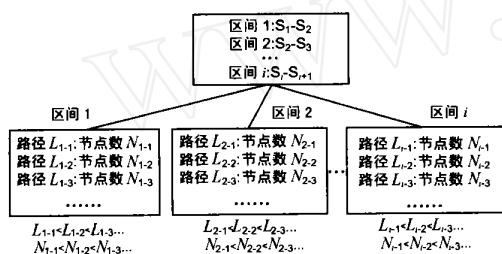


图2 路由区间索引——距离为用户主要偏好因素

#### 4.2 层次分析法

层次分析法, 又称 AHP 方法<sup>[6]</sup>, 广泛用于系统评价、资源分配等重要问题, 是一种定量与定性分析相结合的有效方法, 结合本问题的特点可以分为以下几个步骤:

第一步 明确最终解决的问题, 包括需要考虑的因素, 如传输距离、转接次数和负载均衡等;

第二步 建立层次结构模型. 对于本问题只需建立三层结构. 如图 3 所示, 最高层, 即最终的选路排序方案; 中间层, 至少包括传输距离和转接次数两个环节, 可根据具体情况补充, 如传输损耗、信道利用率等条件; 底层: 选路方案集合.

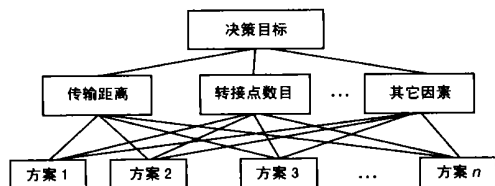


图3 层次分析法构造

第三步 构造判断矩阵, 构建两层判断矩阵, 如表 1 所示. 假定  $A$  层次中元素  $A_k$  与下一层元素  $B_1, B_2, \dots, B_n$  有联系, 则构造的判断矩阵为以下形式: 其中  $b_{ij}$  表示对于目标  $A_k$  而言,  $B_i$  比  $B_j$  的相对重要性, 显然判断矩阵有,  $b_{ii} = 1, b_{ij} = 1/b_{ji} (i, j = 1, 2, \dots, n)$  对于第一层判断矩阵而言, 主观性较强, 采用 T. Saaty 提出的构造方法<sup>[6]</sup>: 1 表示两者重要性相同, 2 表示  $B_i$  比  $B_j$  稍重要, 5 表示重要, 7 表示强烈重要, 9 表示极端重要. 第二层判断矩阵构建就可以利用求得的路径传输距离和转接次数来进行定量分析, 对于传输距离因素:  $b_{ij} = l_j / l_i$

( $i, j = 1, 2, \dots, n$ ),  $l_i, l_j$  分别表示路径  $i$  和  $j$  的路径长度. 对于转接次数因素:  $b_{ij} = 1, b_{ij} = n_j / n_i (i, j = 1, 2, \dots, n)$ ,  $n_i, n_j$  分别表示路径  $i$  和  $j$  的转接次数.

表1 构造判断矩阵

$A_k$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$\dots$	$B_n$
$B_1$	$B_{11}$	$B_{12}$	$B_{13}$	$\dots$	$B_{1n}$
$B_2$	$B_{21}$	$B_{22}$	$B_{23}$	$\dots$	$B_{2n}$
$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
$B_n$	$B_{n1}$	$B_{n2}$	$B_{n3}$	$\dots$	$B_{nn}$

第四步 层次单排序及其一致性检验. 把同一层次中各个元素对于上一层某元素相对重要性的排序权值求出来, 计算判断矩阵  $A$  的满足等式  $AW = \lambda_{\max} W$  的最大特征根  $\lambda_{\max}$  和对应的特征向量  $W$ , 这个特征向量就是单排序权值. 因为在矩阵构建时可以保证式 (4) 成立.

$$b_{ij} = b_{ik} / b_{jk} \quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

所以上述的第二层判断矩阵具有完全一致性,  $\lambda_{\max} = n$  免去了繁琐的最大特征值计算, 同时也省去了对判断矩阵的一致性检验. 如果第一层矩阵只考虑距离和转接次数两个因素, 则该判断矩阵也是完全一致矩阵, 可以省去特征值计算和矩阵一致性检验.

第五步 层次总排序. 通过以上步骤, 可以从两个不同侧重的解集中, 实现定性定量的综合分析, 权衡用户关心的各个层面. 由于对第二层判定矩阵巧妙设置, 省去了传统层次分析法中费时最多的部分, 一致性检验计算.

#### 5 实验数据及结论

以东北地区 SDH 全网的现场测试数据为原始数据, 对比

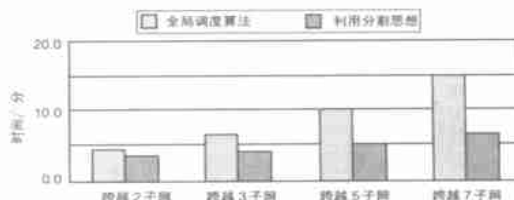


图4 全局调度与分布式调度数据分析

通道建立时间, 如图 4 所示. 采用全局调度算法不仅需要高层网管了解下层子网内部的拓扑信息和连结状况, 而且在指定信道时隙的过程中, 必须串行配置每个 ADM 转接设备, 如出入时隙交叉连接的建立等, 造成通道选路与建立过程被延缓. 随着子网数目的增加, 通道建立的时间呈线性增长. 而利用传送网络的分割思想, 在子网内独立选路可以在很大程度上减轻高层网管的负担, 特别是当子网数目较多的情况下, 通道建立时间不会出现明显的线性增长, 优越性体现的更加明显.

表 2 为五条路径的计算结果, 通过层次分析法, 运营商可以对传输距离和转接次数两个评价指标采用不同的权值来构造第一层判断矩阵  $\begin{bmatrix} 1 & w_{\text{传输距离}/w_{\text{转接点}}} \\ w_{\text{转接点}/w_{\text{传输距离}}} & 1 \end{bmatrix}$ , 综合评估初始解集, 计算得到最终的路由方案. 我们分别设置第

一层判断矩阵为  $\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 1 & 1/3 \\ 3 & 1 \end{bmatrix}$ 、 $\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 1/3 & 1 \end{bmatrix}$  和  $\begin{bmatrix} 1 & 2/3 \\ 3/2 & 1 \end{bmatrix}$ . 则上述解集中五条路径的最终目标权值计算结果如表 3 所示.

表 2 一组路由方案及第二层判断矩阵权值计算结果

路由 参数	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5
传输距离	40	50	60	30	20
转接次数	3	2	2	4	5
$w_{\text{距离}}$	0.1724	0.1379	0.1149	0.2299	0.3448
$w_{\text{转接点}}$	0.1869	0.2804	0.2804	0.1402	0.1121

表 3 不同比例下各路由最终目标计算权值

路由 $L:N$	路径 1	路径 2	路径 3	路径 4	路径 5
1:1	0.1797	0.2092	0.1977	0.1850	0.2285
1:3	0.1833	0.2448	0.2390	0.1626	0.1703
3:1	0.1760	0.1735	0.1563	0.2075	0.2867
2:3	0.1811	0.2234	0.2142	0.1761	0.2052

(其中  $L:N = w_{\text{传输距离}} : w_{\text{转接点}}$ )

从表 3 中可以看出,不同的第一层判断矩阵会得到不同的目标排列次序.当偏向传输距离时,路径 5 权值最高;当偏向转接次数时,路径 2 效果最好.同时可以发现路径 2 在任何情况下都比路径 3 的权值高,这是因为两者在转接点数目一致的情况下,路径 2 的传输距离更短.

在 SDH 传输系统中,传输通道的建立通常会长期固定使用,通道路由的优劣会对整个传输系统的效率产生长久的影响,所以优化的通道选路方案对网络运营和维护至关重要.本方案首先借助改进的双向扫描算法得到初始解集,然后建立多目标规划模型综合权衡各种评价指标.同时在全网选路过程中借鉴传送网络的分割思想,从计算时间和存储空间两方面面对高层网管系统进行优化.实际应用中需要根据具体情况

来设置模型参数,本方案给出的是一种通用的模型框架和算法策略.

#### 参考文献:

- [1] 孟洛明. SDH 传送网网管体系结构的研究和实验 [J]. 高技术通讯, 1999, 9(9): 28 - 31.
- [2] ITU-T Rec. G. 805, 1996. Generic Functional Architecture of Transport Networks [S].
- [3] 杜端甫. 运筹图论 (第一版) [M]. 北京市: 北京航空航天大学出版社, 1990.
- [4] 胡毓达. 实用多目标优化 (第一版) [M]. 上海市: 上海科学技术出版社, 1990.
- [5] Hu Y D. Major optimality and major efficiency in multicriteria optimization [J]. Optimization Techniques and Applications, World Scientific, 1992, 1: 368 - 374.
- [6] Satty T L, 著. 许树柏等译. 层次分析法 [M]. 北京市: 煤炭工业出版社, 1988. 22 - 70.

#### 作者简介:



魏 宏 男, 1977 年 12 月出生于河北省张家口市, 2000 年获北京邮电大学计算机通信专业工学学士学位, 同年免试推荐进入北京邮电大学程控交换与通信网国家重点实验室攻读硕士学位, 研究方向: 通信网络管理技术.

刘 钢 男, 1956 年出生于辽宁沈阳, 2002 年获武汉通信指挥学院博士学位, 现为中国电子系统工程公司通信局高级工程师, 目前研究方向为通信网及网络管理.

陈兴渝 男, 1972 年 10 月生于重庆, 1998 年获东北大学计算机应用专业硕士学位, 现为北京邮电大学讲师, 目前研究方向为网络管理及通信软件.