

# 基于遗传算法的 WDM 光传送网恢复优化算法

霍晓莉<sup>1</sup>, 李艳和<sup>1</sup>, 戴无惧<sup>1</sup>, 张汉一<sup>1</sup>, 何永琪<sup>2</sup>

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 大唐电信, 北京 100083)

**摘 要:** 本文针对 WDM 光传送网的网络恢复问题, 提出了一种基于遗传算法的恢复路由优化算法. 在满足多重约束的条件下, 该算法可处理不同故障情况下的多种最佳恢复路由的选取问题. 通过对实际网络的计算, 验证了该算法具有较强的实用性.

**关键词:** WDM 光传送网; 格状网; 网络生存性; 通道恢复; 遗传算法

**中图分类号:** TN915.01      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2002) 04-0515-04

## Optimization Restoration Algorithm Based on Genetic Algorithm in WDM Optical Transport Network

HUO Xiao-li<sup>1</sup>, LI Yan-he<sup>1</sup>, DAI Wu-ju<sup>1</sup>, ZHANG Han-yi<sup>1</sup>, HE Yong-qi<sup>2</sup>

(1. Dept of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. DTT, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In this paper, a kind of optimization restoration routing algorithm based on the Genetic Algorithm is presented for WDM optical transport network. For multi-constraints cases, it can process the problem of optimal restoration route search for different purpose in the cases of various failure conditions. Through the numerical results of practical networks, the practicability has been proved.

**Key words:** WDM optical network; mesh network; network survivability; routing restoration; genetic algorithm

### 1 引言

当前, 波分复用 (WDM, Wavelength Division Multiplexing) 技术已成为大容量高速传输的主要手段. 由于其传输容量巨大, 任何故障都可能造成严重的业务损失. 因此要求 WDM 光传送网具有更好的网络生存性.

增强网络生存性的方式有三种: 自愈环、网络保护和网络恢复<sup>[1,3]</sup>. 对于 Mesh 网络 (本文中称为格状网), 采用网络恢复可以得到较高的资源利用率. 网络恢复的方案有两种: 通道恢复和链路恢复. 由于实际系统的大多数故障都是线缆断损, 本文主要采用基于源宿连接的通道恢复, 即放弃受损业务原配波长路由, 为其重新选路.

在格状网中, 一条业务路由可能存在多条恢复路由, 为了求得最优路由, 需要一种有效准确的优化算法. 目前, 光网络的恢复选路基本上仍然遵循开放式最短路优先原则 (OSPF: Open Shortest Path first), 并采用图论中的各种最短路算法, 如: Dijkstra 算法<sup>[5]</sup>和 Breadth First Search (BFS) 算法. 尽管这些算法已经得到了广泛的应用, 但它们仍存在着一些问题. 例如: 在包交换网络中, 大量的受阻业务信息包可能被分配到用于恢复的同一条物理路由上, 致使该路由出现拥塞, 恢复时间过长. 在 WDM 传送网中, 单一链路或节点的故障往往影响到承

载不同源宿业务的多条波长路由, 沿用传统算法很可能造成部分业务恢复的不可操作性, 这主要由于这些传统算法每次执行只能处理一条路由, 很容易导致恢复操作中先行处理业务路由挤占后续处理的业务路由的备份资源<sup>[4]</sup>. 为了解决 WDM 光传送网的恢复问题, 我们提出了一种全新的基于遗传算法<sup>[2]</sup> (GA: Genetic Algorithm) 的恢复路由优化算法.

### 2 路由恢复问题的数学建模与算法

#### 2.1 路由恢复问题的数学建模

(1) 算法实现所需数据主要有: 网络拓扑结构的数学描述; 空闲容量分布; 故障节点、链路、受损业务波长路由由连接拓扑; 受损业务波长路由的源、宿节点和信息容量, 原配波长与所经链路编号.

(2) 恢复路由应满足的约束条件包括: 新配波长应能完整承载受损业务; 新配路由必须是从源节点到宿节点的无环回通路.

(3) 可实现的最优恢复路由: 下列各式中恢复路由的标志为:

$$X_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{恢复路由占用链路 } i \text{ 的波长 } j \\ 0 & \text{恢复路由不占用链路 } i \text{ 的波长 } j \end{cases}$$

收稿日期: 2000-12-29; 修回日期: 2001-07-05

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 69990540); 863 高技术项目 (No. 863-300-01-02-99)

$$Line_l = i \quad \text{若} \quad \sum_{j=1}^{Wave} X_{ij} = 1 \quad (1 \leq l \leq k)$$

Line 中存储恢复路由占用的链路编号; Wave 为链路的复用波长数(下同); k 为恢复路由占用的链路总数.

(a) 最短距离 (D) 路由:

$$D = \min_i [Distance_i]$$

式中  $Distance_i$  为第  $i$  条链路的长度.

(b) 经过节点数 (N) 最少路由:

$$N = \min (k - 1)$$

(c) 经历波长转换或再生次数 (M) 最少路由:

$$M = \min_{i, l} [k - \sum_{j=1}^{Wave} \text{int} [X_{ij} + X_{ij}/2]]$$

$$(IN-OUT)_{i1} = (IN-OUT)_{i2}$$

式中  $IN-OUT_{i1}$ ,  $IN-OUT_{i2}$  分别为第  $i$  条链路的起点和终点.

(d) 占用空闲容量 (Va) 最少的路由:

$$Va = \min_{i=1}^{Number} (\sum_{j=1}^{Wave} Vacancy_{ij} \times X_{ij})$$

式中  $Vacancy_{ij}$  为第  $i$  条链路第  $j$  个波长的空闲容量, Number 为链路总数(下同).

(e) 涉及动作节点 (L) 最少的路由:

$$L = \min (k - 1 - \sum_{i, Li, j, wa} X_{ij})$$

式中  $Li$  和  $wa$  中分别存储业务原先占用的链路编号和波长编号.

前 4 种情况都建立于通道恢复的基础之上, 所以它们可分别考虑, 也可综合考虑, 应视网络的具体情况而定. 综合考虑时待优目标函数 (O. F.) 的数学表达式为:

$$O. F. = \min_{i=1}^{Number} [D / Distance_i + N / Node + M + Va / (k \times V)]$$

式中 Node 为节点总数.

第 5 种情况是指在对某一对节点进行恢复时, 应尽量保留初始的路由状态, 使尽量少的节点改变初始状态. 这样可节省恢复过程时间, 加快恢复速度. 在这里需说明一点, 以上各式中的参数由网管系统数据库提供.

### 2.2 路由恢复优化算法的描述

(1) 遗传算法编码: 采用十进制整数编码. 每一个体代表一种可行的恢复路由方案, 每一个体有 Number 个基因. 每个基因是 0 到  $2^{Wave} - 1$  之间的十进制数, 表示每条链路上的波长占有情况. 如下所示:

0	0	0	0	0	0	1	1
---	---	---	---	---	---	---	---

表示此链路的  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  被占用.

(2) 遗传算法主要参数:

(a) 个体数量 (PopSize): 从 2 开始逐代以 2 的倍数增加直到 64.

(b) 交叉概率 ( $P_c$ )、变异概率 ( $P_m$ ) 和最大进化代数 (MaxGeneration): 由于路由恢复优化算法应适用于实时恢复, 所以其运算时间是衡量参数优劣的重要指标. 在最大进化代数为 10 的前提下, 调整  $P_c$  和  $P_m$  计算中国网(图 3)中一条从

1 节点到 39 节点的恢复路由, 得到了一组测试结果, 结果见图 1(图中纵坐标为计算 1000 次达到最优值的时间在 100ms 以内的次数百分比). 从测试结果可知较好参数如表 1 所示.

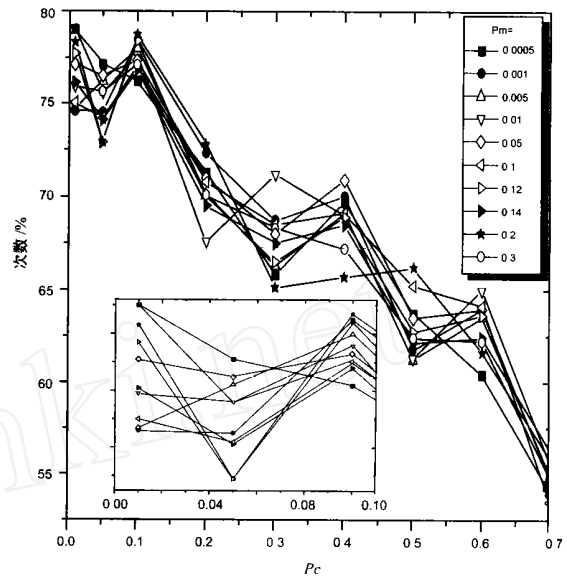


图 1 参数测定结果

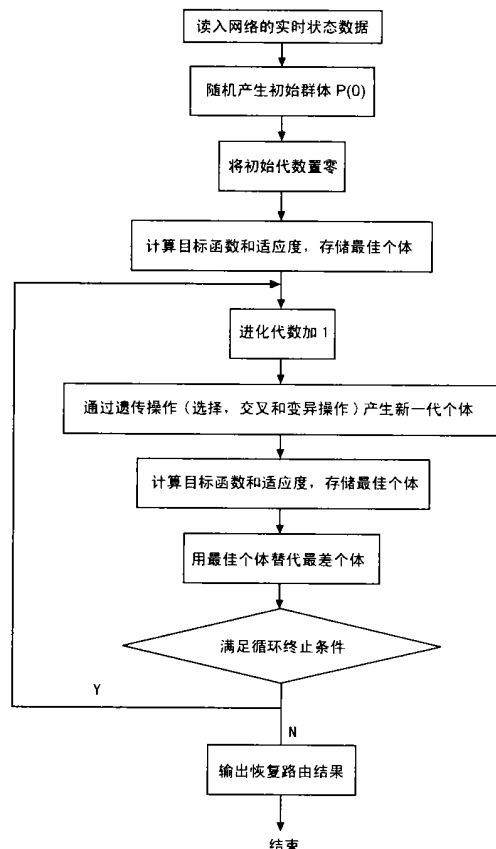


图 2 主体流程图

但是前两组 10 代以内的准确率是 98%，而第三组的准确率是 99%。所以本文选用第三组参数。

表 1 参数测定

$P_c$	$P_m$	次数百分比
0.01	0.0005	79 %
0.01	0.3	79 %
0.1	0.2	78.7 %

2.3 总体流程

路由恢复的主流程框图为图 2 所示。

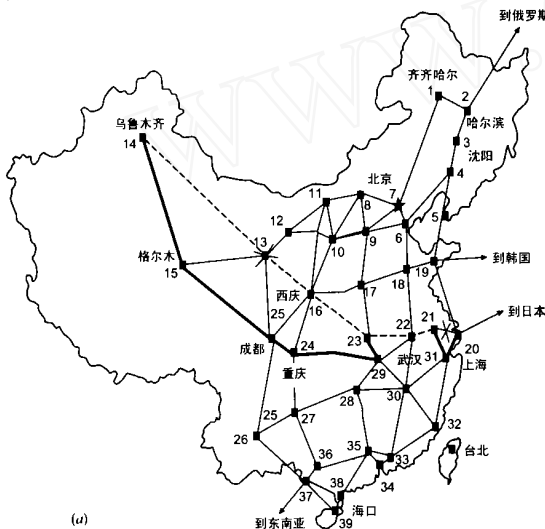
3 计算实例及算法对比结果

3.1 本文算法与 Dijkstra 算法的比较

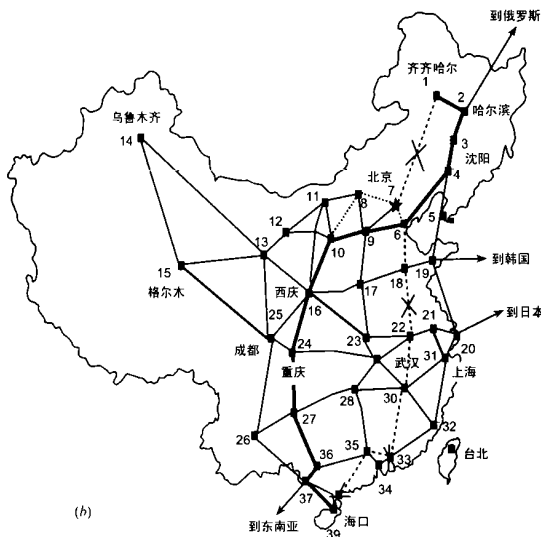
Dijkstra 算法是一种最短路经典算法。在此利用该算法的结果与本文所提出的基于遗传算法的恢复路由优化算法所计算的最短路结果进行比较，以验证本文算法的正确性。

所选网络为中国网(如图 3)。该网络具有 39 个节点、72 条双向链路。

(1) 现有从第 20 节点向第 14 节点传输的业务，初始路由为：



(a)



(b)

图 3 中国网

20 21 22 23 16 13 14 (图 3(a)虚线所示)

假设 20 - 21 链路,第 13 节点故障,应用两种算法可得到相同的恢复路由：

20 31 21 22 23 29 24 25 15 14(图 3(a)加重线所示)

(2) 现有从第 1 节点向第 39 节点传输的业务,初始路由为：

1 7 6 18 22 30 33 35 38 39(图 3(b)长虚线所示)

假设 1 - 7 链路和 18 - 22 链路故障,第 33 节点和第 38 节点故障,应用两种算法可得到相同的恢复路由：

1 2 3 4 6 9 10 16 24 27 36 37 39(图 3(b)加重线所示)

应用本文的恢复路由优化算法还可得到距离相同的另一条恢复路由：

1 2 3 4 6 7 8 10 16 24 27 36 37 39(图 3(b)短虚线所示)

由此可见两种算法的结果一致,而且本文算法可找到距离相同的多条恢复路由。

3.2 多种最优恢复情况

这里仍以中国网为例。试验假设:各条链路中空闲波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,容量为 10Gbit/s。假设需恢复业务的源节点为 1,宿节点为 39,信息容量 10Gbit/s,执行虚波长路由恢复。在无故障的情况下,初始波长路由为:经过节点 1 7 6 18 22 30 33 35 38 39 的一条通路,应用波长  $\lambda_3$ 。

(1) 目标函数综合考虑

$$O. F. = \min [ \sum_{i=1}^{Number} D_i / Distance_i + N / Node + M + Va / (k \times V) ]$$

当 1 - 7 链路和 18 - 22 链路,第 33 节点和第 38 节点出现故障时,各种情况下的恢复路由由见表 2。

表 2 各种恢复情况

故障	特殊说明	恢复路由
两条链路中 $\lambda_3$		1 7 6 18 22 30 33 35 38 39( $\lambda_1$ 或 $\lambda_2$ )
两条链路中所有波长		1 2 3 4 6 9 10 16 24 27 36 37 39 或 1 2 3 4 6 7 8 10 16 24 27 36 37 39( $\lambda_1$ 或 $\lambda_2$ )
两条链路中所有波长	只有 4 - 6 链路的容量为 2.5Gbit/s	1 2 3 4 5 19 20 31 30 28 35 36 37 39 ( $\lambda_1$ 或 $\lambda_2$ )
两条链路中所有波长	业务容量为 2.5Gbit/s;只有 9 - 17 链路的容量为 2.5Gbit/s	1 2 3 4 6 9 17 23 29 28 35 36 37 39 ( $\lambda_1$ 或 $\lambda_2$ )
两条链路中所有波长	业务容量为 2.5Gbit/s;9 - 10 和 9 - 17 链路的容量都为 2.5Gbit/s	1 2 3 4 6 9 10 16 24 27 36 37 39 或 1 2 3 4 6 7 8 10 16 24 27 36 37 39 ( $\lambda_1$ 或 $\lambda_2$ )

表 2 中第一行结果显示:恢复路由避开故障波长仍保持

最短距离。

表 2 中第二行与第三行结果显示:在分级网中恢复路由的容量一定要不小于需恢复的信息容量。

表 2 中第四行和第五行结果显示:在业务速率分级网中恢复路由由将尽量占用同级速率的链路,将高等级速率的链路空闲出来。

#### (2) 目标函数为涉及动作节点最少

假设 1-7 链路故障,第 33 节点故障,最短路由结果为:

1 2 3 4 6 18 22 29 28 35 38 39

(各链路占用  $\lambda_1$  或  $\lambda_2$ )

而涉及动作节点最少的结果为:

1 2 3 4 6 18 22 30 28 35 38 39

(加重链路为不变链路,占用原波长  $\lambda_3$ )

#### (3) 多业务的同时优化恢复

假设有从第 7 节点到第 20 节点和从第 7 节点到第 30 节点的两个业务,原配路由分别为:

7 6 18 22 21 20

7 6 18 22 30

当 7-6 链路出现故障时,用 Dijkstra 算法求取的最短路结果为:

7 9 6 18 22 21 20

7 9 6 18 22 30

但是如果 9-6 链路中只有一个空闲波长,那两链路就无法同时得到恢复而发生业务竞争。应用本文算法可以为两个业务求出能够同时恢复的路由,这样的路由对每个业务来说虽然不是最优的,但是从总体来看是最优的。应用该算法计算一次得到的结果为:

7 9 6 18 22 21 20

7 9 17 23 29 30

按这一路由结果进行恢复可使两个业务同时得到恢复不发生冲突,而且总距离最短。

### 3.3 讨论

Dijkstra 算法是一种遵循 OSPF 原则的计算最短路径经典算法。它有执行速度快的优点,但是对于解决实际情况下的网络路由优化问题存在着易拥塞及恢复时间长的缺陷,而且该算法对约束条件的处理有较大难度。

针对光网络恢复问题的特点,本文提出的基于遗传算法的恢复路由优化算法更为适宜。恢复路由优化问题是一种整数规划问题,而遗传算法自身的待优参数编码方式使其更易于解决这类问题;其次,在某些情况下存在着多条满足同一最优条件的恢复路由,这时采用遗传算法作为路由优化算法的优势将更加明显,因为它可以求出多个全局最优解。另外,遗传算法在得到全局最优解的同时还可以得到次优解,这就为实际的业务恢复操作提供了更多的选择和更大的便利,同时也有利于避免在恢复过程中引起新的网络阻塞。上述这些优势是传统的选路优化算法所不及的。从算法实现上看,采用遗传算法使问题建模与算法编程更加简单实用,且易于进行并行计算,尤其适合于求解多目标优化问题。

当然这种基于遗传算法的恢复路由优化算法也存在着一

些问题,主要是计算速度不如 Dijkstra 算法。在我们的测试计算中约有 78% 在 100ms 以内得到最佳值。虽然如此,由于这种基于遗传算法的最优化路由由算法更易于求解多约束多优化目标的问题,我们认为付出一定的时间代价是可以接受的。另外,与整个恢复过程的耗时(通常认为 2 秒以内可接受<sup>[6]</sup>)相比,本算法运行时间还是很小的,所以对于 WDM 光传送网的实时恢复问题是有实用前景的。

## 4 结束语

本文首次提出了一种基于遗传算法并应用于 WDM 光传送网恢复中的路由最优化算法。该算法能够在各种节点或链路故障发生时地完成优化选路操作,它既能满足多项约束条件又可实现多条最优恢复路由的同时配置。通过计算实例,充分证明了其准确性和实用性。

### 参考文献:

- [1] 韦乐平. 光同步数字传送网 [M]. 北京:人民邮电出版社,1998. 154 - 169.
- [2] 周明,孙树栋. 遗传算法原理及应用 [M]. 北京:国防工业出版社,1999. 1 - 166.
- [3] M Bischoff, M N Huber. Survivability concepts for all-optical transport networks [A]. Proceeding of IEEE ICCT '96 [C]. Beijing: publishing house of electronics industry, 1996.
- [4] Rainer R Iraschko, Wayne D Gover. A highly efficient path-restoration protocol for management of optical network transport integrity [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(5): 779 - 794.
- [5] 费培之. 图和网络及其应用 [M]. 成都:四川大学出版社,1996. 40 - 42.
- [6] Salah Aidarous, Thomas Plevyak. Communications Network Management into 21st Century: Techniques, Standards, Technologies, and Applications [M]. New York: IEEE Press, 1994. 337 - 340.

### 作者简介:



霍晓莉 女,1977 年生于北京,1999 年在清华大学电子工程系获学士学位,同年秋季开始在清华大学电子工程系物理电子学专业攻读硕士学位,研究兴趣主要在 WDM 网络生存性和网络规划等方面。



李艳和 男,1956 年生于辽宁,清华大学教授,博士生导师,中国电子学会高级会员、中国光学学会会员、美国光学学会会员,分别于 1983 年和 1987 年在北京清华大学电子工程系获学士学位和工学硕士学位,1994 年 10 月至 1996 年 9 月在美国加州大学 IRVINE 分校作访问学者,2001 年 7 月至 2001 年 9 月在美国斯坦福大学作高级访问学者,现从事光通信及光网络等领域的教学和研究工作。先后参加并完成了多项国家自然科学基金重点基金和国家 863 高技术项目,获教育部科技进步奖(二等奖)一项,已发表论文 50 余篇。