

# 应用于全光网络恢复优化的自适应免疫算法

韩一石<sup>1</sup> 敖湛斌<sup>1</sup> 王宇飞<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006; <sup>2</sup> 龙岩学院物理与机电工程学院, 福建 龙岩 364012)

**摘要** 针对全光网的网络恢复问题,提出了一种基于免疫进化算法的恢复路由优化算法。算法以全光网络的虚拓扑为主要研究对象,通过对网络虚拓扑的全局优化,完成网络受损业务恢复。算法在优化过程中引用自适应参数进行调节,避免了传统进化算法中可能出现的早熟或局部收敛等现象。同时,算法中还着重考虑了网络资源的利用率问题,使网络资源利用率最大化,尽量减少失效造成的业务阻塞。仿真计算结果表明,该算法在 MESH 结构全光网络的业务恢复中体现良好的性能优越性。

**关键词** 光通信;全光网络;自适应免疫算法;恢复优化;网络生存性

**中图分类号** TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0157

## An Adaptive Immune Evolutionary Algorithm Using in Restoration Optimization of All-Optical Network

Han Yishi<sup>1</sup> Ao Zhanbin<sup>1</sup> Wang Yufei<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *Guangdong University of Technology, Information Engineering College, Guangzhou, Guangdong 510006, China*)  
(<sup>2</sup> *School of Physics and Electromechanical Engineering, Longyan University, Longyan, Fujian 364012, China*)

**Abstract** This paper introduced a new evolutionary algorithm — adaptive immune evolutionary algorithm (AIEA) for restoration optimization of all-optical network (AON), aim to design the virtual topology, globally optimize re-routing and throughput in the AON. By introducing adjusting parameters, the process of the algorithm can be adapted to the AON dynamically, so as to improve throughput and avoid premature or local convergence. Besides, the algorithm considers optimization of resource utilization in AON at the same time so as to decrease the blocking probability when failures happen in the networks. The results show AIEA has the best optimized performance in performance of optimization restoration in AON of MESH topology networks.

**Key words** optical communications; all-optical network; adaptive immune algorithm; restoration optimization; network survivability

## 1 引 言

随着 Internet 业务高速发展,终端用户对光传送网络的扩容性、灵活性以及速率等要求越来越高,基于波分复用技术的全光网络(AON)逐渐受到人们的关注。在全光网中,信息流的传输及交换时始终以光的形式存在,光/电转换仅存在于信源端(发送、接受端),从而保证其良好的透明性、可扩展性和波长路由特性。同时,由于全光网的光路上聚合了大量的业务流,目前商用单光纤传输业务量已达 Tb/s 数量级,光路的失效(如链路中断或网络节点失效)将会引起承载的所有业务流中断,造成巨大损失。因此,全光网络研究的一个关键问题是保证它具有强壮的生存性<sup>[1,2]</sup>。

一般光网络的生存性有两种实现机制:一是基于专用路由的保护,另一种是针对工作路由的恢复机制。目前,针对全光网的生存性研究主要采用路由的恢复机制,归纳起来有基于链路的恢复策略,基于通路的恢复策略,以及基于全局优化计算的路由恢复算法等。其中,基于链路恢复策略是指当工作路由的某一条链路(Link)发生故障时,首先记录故障链路,并采用开放式最短路径优先原则(Open Shortest Path First, OSPF)为故障链路选择保护链路,例如典型的最短路径(Dijkstra)算法等。基于通路的恢复策略是指当网络发生故障时,网管根据受影响的通路的情况不同设置故障通路及工作路由的权重,并据此重新安排新的可用通路。而基于全局优化计算的路由恢复算法多采用各种启发式算法、

进化算法等为网络中的路由进行重分配,最终获得全局最优化的恢复路由<sup>[3~6]</sup>。文献[3]以最大化网络吞吐量作为目标,提出一个线性规划模型,并在此基础上提出两种启发式算法:最大化单跳业务量(Maximizing Single-hop Traffic, MST)和最大化资源利用(Maximizing Resource Utilization, MRU),其特点是最大化网络吞吐量,波长分配采用 First-Fit 原则,路由采用自适应算法进行多跳业务量疏导和路由分配。文献[5]提出多重约束的条件下,采用遗传算法进行恢复路由的优化算法。

基于链路或通路恢复的方法只能对被恢复的路由逐一进行操作,可能导致拥塞出现,或造成部分恢复路由的不可操作性<sup>[7]</sup>。而遗传算法本身由于控制参数精确性问题,容易导致早熟或局部收敛等现象,极大地制约了算法应用的求解和进化效率<sup>[8]</sup>。针对上述问题,本文提出一种基于自适应免疫(Adaptive Immune Evolutionary Algorithm, AIEA)机制的全光网络恢复算法。AIEA 算法以全光网络的虚拓扑为主要研究对象,通过对网络虚拓扑在全局范围内的优化,完成网络中受损业务的恢复。同时, AIEA 算法在寻优过程中根据免疫个体的多样性程度对其群体的选择参数,变异半径和扩展半径进行自适应调节,避免了传统进化算法中可能出现的早熟或局部收敛等现象,获得并保留全局最优解<sup>[9~11]</sup>。此外, AIEA 算法还着重考虑了网络资源的利用率问题,使网络资源利用率最大化,尽量减少失效造成的业务阻塞。本文将 AIEA 算法与两种典型的启发式算在相同条件下进行了比较,通过模拟计算和分析表明, AIEA 算法的具有较快的全局收敛效率,在网络阻塞率、冗余度和全局恢复率等方面都具有明显的优势。

## 2 问题描述

### 2.1 网络模型及参数定义

在全光网络中,设定其物理拓扑为  $(N, L, W)$ , 其中  $N$  为节点集;  $L$  为双向链路集, 每条链路由一对方向相反的单向光纤(或一条双向光纤)组成;  $W$  为光纤上的波长集。网络节点结构如图 1 所示, 图中波长交换矩阵(Matrix of Wavelength Switch)由 OXC 或具有交换能力的 OADM 构成, 实现波长或波段级别的光信号在光层上的交叉连接, 业务疏导交换矩阵(Matrix of Traffic grooming)由 S-ADM, DXC 等组成, 一方面完成用户端业务的上下(Add/Drop), 另一方面通过业务疏导(traffic grooming)实

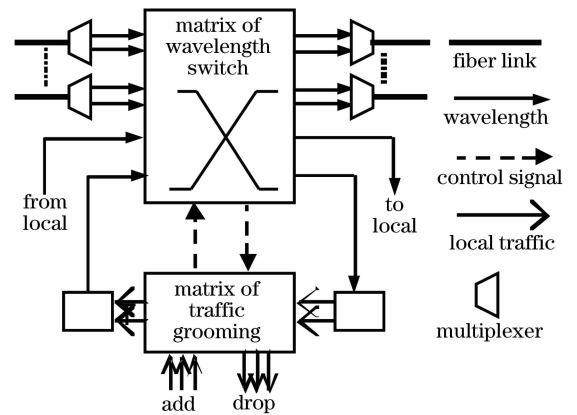


图 1 网络节点结构图

Fig. 1 Node architecture in all-optical network  
现网络中不同节点间业务交换。

由于全光网络中可用的资源是有限的,如节点的收发信机数量、波长选路开关的交换矩阵规模以及复用的波长信道数目等,不可能在所有的业务节点对之间都建立起光通路。因此在虚拓扑建立过程中需要考虑各种约束条件,归纳起来有:

- 1) 节点的逻辑输入度/输出度大小(即每个节点配备的光发射机/接收机数量)对虚拓扑结构的限制;
- 2) 可用波长数目的限制;
- 3) 光通路在物理拓扑上选路时的物理连接条件限制;
- 4) 用户业务在虚拓扑上选径时的网络流条件限制,即各节点满足流量守恒,各逻辑链路上的业务流量不能超过链路的容量;
- 5) 波长一致性要求对光通路波长分配的限制,即给每条光通路分配一个波长,给在物理拓扑上有共享边的两条光通路分配不同波长。

此外,对网络的优化设计中涉及的参数定义为:  
 $T$ : 网络每节点所需收发器(transceivers)数量;  
 $OC-y$ : 网络传输业务允许的最小颗粒度,  $y = 1, 3, 12, \dots$ ;  $d_{s,d,y}$ : 节点对  $(s, d)$  间带宽为  $OC-y$  的业务连接请求数目,  $d_{s,d,y}$  的集合组成网络业务需求矩阵  $D$ ;  $V_{s,d,y}$ : 节点对  $(s, d)$  间建立的所有光路的集合;  
 $h_{s,d}$ : 节点对  $(s, d)$  间的采用最小跳数路径的跳数;  
 $R(s, d)$ : 节点对  $(s, d)$  间建立光路/分配资源的业务流,  $R(s, d) = \sum_y (y \cdot d_{s,d,y})$ 。

### 2.2 虚拓扑建立及恢复

通过自适应免疫算法实现受损业务的恢复,就是在已知全光网光路失效的前提下,对网络的虚拓扑(virtual topology)进行重新优化设计,使受损业

务得到恢复。当已知物理拓扑结构  $G$ , 网络的业务需求矩阵  $D$ , 以及单光纤最多可以复用的波长数目  $W$ , 全光网络的虚拓扑可通过波长路由分配算法 (Routing and Wavelength Assignment, RWA) 获得, 本文通过简单的 Dijkstra 算法对网络进行路由选择, 然后通过 First-Fit 算法对网络进行波长分配, 得到网络初始虚拓扑。然后进行多代的进化, 最后得到优化虚拓扑。在虚拓扑建立及恢复过程中, 首先保证受损业务达到恢复, 同时以网络资源利用率最大化, 尽量减少失效组成的业务阻塞为目的。

图 2 表示一个由 6 节点, 4 波长组成的 Mesh 全光网, 通过 AIEA 算法进行虚拓扑建立及恢复, 得到的波长路由结果。图 2(a) 表示节点 1 与节点 5 之间建立的虚拓扑, 该拓扑由 4 条虚通路组成, 占据了 4 个波长。图 2(b) 表示链路 (3—5) 发生故障后重新路由的虚拓扑。图 2(c) 表示链路 (3—5) 和 (2—5) 同时发生故障后的虚拓扑。当网络无故障发生时, AIEA 算法以最佳吞吐量为目标建立虚拓扑。当网络发生故障, 将为现有物理链路生产随机虚拓扑, 作为初始群体  $A$ 。然后, 以资源利用率最大化为目标, 进行多代的进化, 最后得到优化虚拓扑。例如, 当链路 (3—5) 断开后, 通路 (1—2—3—5) 失效, 此时另外两条通路 (1—2—5) 和 (1—4—5) 可作为备用通路保证其业务传递。再经过 AIEA 算法对虚拓扑进行优化, 得到光通路路由结果为 (1—2—3—6—5), 受损业务量恢复。当链路 (3—5), (2—5) 同时断开, 此时通路 (1—4—5) 作为备用通路保护节点 2 到节点 5 的业务流量, 并经过 AIEA 算法, 使得另外三条故障通路可以重新恢复, 而且每根光纤最多只安排两个波长的业务, 与故障发生前一样, 从而避免业务的阻塞。

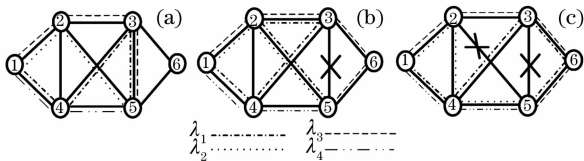


图 2 自适应免疫算法的恢复实例。(a) 正常;  
(b) 链路 (3—5) 断开; (c) 链路 (3—5) 和 (2—5) 断开  
Fig. 2 Sample of restoration optimization by AIEA. (a) no failures; (b) breaking in link (3—5); (c) breaking in link (3—5) and (2—5)

### 3 自适应免疫算法的描述

自适应免疫算法 (AIEA) 算法把求解的问题看作抗原, B 细胞及其亲和力分别看作问题的可行解

(个体) 和其评价价值, 模拟适应性免疫应答过程来求最优解。具体说, 就是把每个网络结构中的虚拓扑结构作为免疫系统中的独特受体细胞, 将网络容纳的业务量与业务矩阵的总业务量的比值作为细胞亲和力和程度 (适应度)。当故障发生时, 算法以整组虚拓扑的资源利用率为适应度函数, 对故障链路以外的新路由进行评估, 从而自动寻优, 并由多代寻优后的新的虚拓扑形成新的路由, 完成故障路由的恢复。在寻优的过程中, AIEA 能根据群体中各个虚拓扑的差异性进行动态的自适应参数调节。而这些参数的调节有利于虚拓扑的亲合度不断的提高, 从而避免了采用遗传算法时可能出现的早熟或局部收敛等现象, 以获得并保留最优解。

利用自适应免疫算法, 如果扩展和突变选取范围较大, 可保持群体的多样性, 但群体进化缓慢; 如果扩展和突变选取范围较小, 算法可快速收敛, 但群体多样性减少很快, 算法容易陷入局部最优, 因此算法快速收敛和保持群体多样性具有矛盾性。如果算法参数根据群体的多样性适当变化, 则算法不仅能快速收敛, 而且能保持群体多样性以避免陷入局部最优解。在本文中, 群体的多样度由网络中所有虚拓扑建立的光路差异来定义, 采用参数调节方法<sup>[10]</sup>, 我们引用欧几里德距离 (Euclidean distance) 表示群体中所有个体间建立光路的平均差异度  $\delta^{(k)}$ :

$$\delta^{(k)} = \sqrt{\sum_{i,j,y} \|V_{i,j,y}^{(k)}\|^2}, \quad (i,j) \in N, y = 1, 3, 12, \dots \quad (1)$$

同时引入一个常量  $K$ , 通过平均差异度  $\delta^{(k)}$  与常量  $K$  的比较来确定群体多样性程度  $\nabla$ :

$$\nabla^{(k)} = \begin{cases} \delta^{(k)}/K, & \delta^{(k)} < K \\ 1, & \delta^{(k)} \geq K \end{cases} \quad (2)$$

(1), (2) 式中,  $k$  表示算法进行的第  $k$  次迭代。

在确定了群体的多样性后, 就可以对 AIEA 算法中的操作参数进行自适应调节, 其中涉及的调节参数包括: 个体的选择率 ( $A^{(k)}$ )、扩展半径 ( $R_e^{(k)}$ )、突变半径 ( $R_m^{(k)}$ ) 等, 每次迭代循环中  $A^{(k)}$ ,  $R_e^{(k)}$ ,  $R_m^{(k)}$  的大小由  $\nabla^{(k)}$ 、参数调节范围以及第  $(k-1)$  次迭代形成的调节参数确定, AIEA 算法主要操作包括选择操作/突变操作/突变操作/和替换操作, 具体实现步骤如下:

Step 1: 通过 Dijkstra 算法对网络进行路由选择, 然后通过 First-Fit 算法对网络进行波长分配。

Step 2: 将 Step1 产生的虚拓扑作为初始群体  $A_k$ , 根据群体中虚拓扑的适应度进行排序, 并保存

本代适应度最优个体。

Step 3: 参数调整, 根据群体的多样性  $\delta^{(k)}$  和  $A^{(k-1)}$ ,  $R_e^{(k-1)}$ ,  $R_m^{(k-1)}$  大小重新计算调节系数。

Step 3.1: 选择操作, 根据每个个体的适应度选择最优的若干虚拓扑组成群体  $B_k$ , 并对  $B_k$  的个体进行新的随机波长路由分配。

Step 3.2: 扩展操作, 根据群体  $B_k$ , 在其单个虚拓扑的扩展半径  $R_e^{(k)}$  内进行突变产生群体  $C_k$ 。

Step 3.3: 突变操作, 将群体  $C_k$  中评价价值最低的若干个虚拓扑在突变半径  $R_m^{(k)}$  内进行突变产生群体  $D_k$ 。

Step 3.4: 替换操作, 群体  $D_k$  中评价价值最低的若干个体替换为随机个体形成群体  $E_k$ 。替换操作模拟骨髓产生新 B 细胞过程以增加群体多样性。

Step 4: 最优个体保留, 为保证算法收敛, 避免当前群体中最优个体被扩展操作破坏, 将群体  $E_k$  中评价价值最低的个体替换为  $A_k$  中评价价值最高的个体, 形成下一代群体  $A_{k+1}$ 。

Step 5: 根据每一链路的适应度对链路进行监视。当某一链路  $B(s, d)$  出现故障时, 转到 Step 1。

Step 6: 如果群体的吞吐量满足了规定的要求, 或迭代次数满足了规定要求, 输出的就是多次迭代后的最优虚拓扑结构。否则, 转到 Step 2。

## 4 仿真结果及分析

为了方便比较, 我们选取典型的 NSFNET 网络作为研究对象, 共 14 个节点, 21 条链路, 如图 3 所示。假定 NSFNET 网络中每个节点在正常工作情况下均具有业务量疏导能力, 每个虚拓扑对应的链路波长数相同, 每个波长所支持的最大带宽为 OC-192。业务需求矩阵随机产生, 任何节点间业务连接请求可以是 OC-1, OC-3 和 OC-12 中的任意一个。同时, 为了正确评价本文提出的恢复优化算法, 引入三个性能评价指标:

1) 阻塞率 (Blocking Probability), 在给定的网

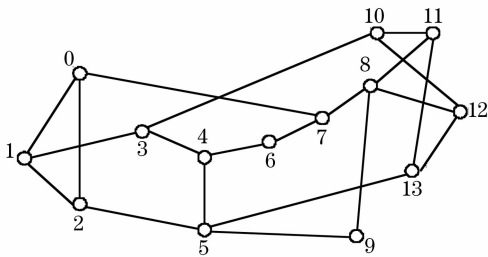


图 3 14 节点 NSFNET 网络拓扑结构

Fig. 3 14-node NSFNET network topology

络拓扑和业务量需求情况下, 没有成功建立的业务连接请求数与总的业务连接请求数之比, 阻塞率表征各算法进行网络的波长路由选择时性能优异程度。需要指出的是, 在一定网络资源情况下, 网络是否出现拥塞, 与网络拓扑结构和业务矩阵大小相关。

2) 冗余度 (Redundancy), 在网络故障链路恢复过程中, 可以使用网络的冗余量为工作容量提供保护, 使受损链路经过冗余波长再选路, 维持网络的正常运转。冗余度大小为空闲波长链路总数与网络总波长链路总数的比值)。

3) 故障业务恢复率 (Restoration Ratio), 在网络物理链路发生故障时, 网络经过重路由后所容纳的业务量与故障前的网络总业务量之比。如果网络有足够的冗余度, 恢复可达到 100%。

在 AIEA 算法中, 我们定义群体的规模为 50, 进化代数为 100。算法其他参数根据收发器和波长的不同而采用不同值。这里我们随机产生一个网络业务总量为 OC-5724 的业务矩阵, 将 AIEA 算法与 MST、MRU 算法在给定网络资源条件下进行阻塞率比较, 结果如图 4 所示。

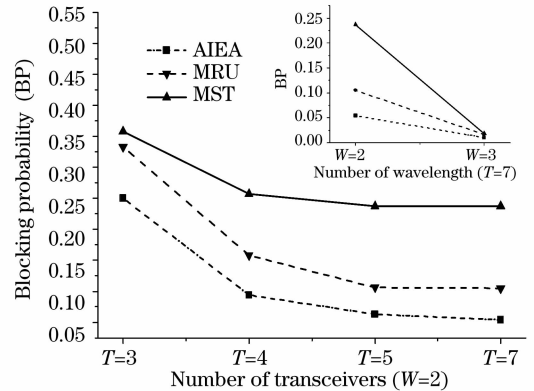


图 4 三种算法基于 NSFNET 网络的阻塞率比较

Fig. 4 Comparison of blocking probability among AIEA, MST and MRU in NSFNET

由图 4 我们发现, 在网络资源受限条件下, 三种算法均有受阻路由出现。但明显的, AIEA 算法在减少网络阻塞率方面具有更强优势, 这是因为 AIEA 是在全局范围内进行虚拓扑优化, 而且在寻优过程中可根据情况的不同进行自适应调节, 以获得更多的工作光路, 使网络资源的利用率达到最大化。由图 4 我们还发现, 在波长数不变的情况下 ( $W = 2$ ), 随着每节点收发器数量  $T$  增加, 阻塞率均有下降。这是因为收发器数量增加, 可建立更多的光路, 满足更多的业务连接请求。当收发器数量  $T$  达到一定程度后 (例如  $T = 5$ ), 对阻塞率的影响将逐渐减

弱,此时网络的业务路由主要受到波长数( $W$ )的影响。当网络资源达到一定程度(例如  $T = 7, W = 3$ )后,各算法对应的阻塞率趋向于 0。

图 5 是通过计算机仿真得到的 AIEA, MST, MRU 三种算法的冗余度计算结果,由图 5 可以看到,随着接入业务量的增大,三种算法的冗余度都出现逐步下降趋势。这是由于接入的业务增多,可容纳业务的波长数要相应增多,以满足业务量的吞吐量需求。其中,AIEA 算法的冗余度始终比 MST 和 MRU 要高,这说明了一旦发生链路故障,AIEA 算法中可用于恢复的波长数比 MST 和 MRU 要多。这主要是因为 AIEA 以网络的资源利用率和吞吐量作为群体每一代的寻优目标,经过多代的寻优后得到冗余度较高的虚拓扑。而且,AIEA 算法的冗余度变化趋势始终保持在 40%~50%之间。这说明了 AIEA 始终有稳定的空闲备用波长以供故障链路使用,空闲波长不会因业务量的增多而急剧减少。

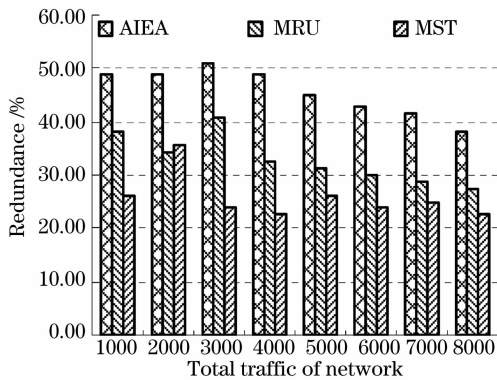


图 5 三种恢复算法基于 NSFNET 网络的冗余度比较

Fig. 5 Comparison of redundancy among AIEA, MST and MRU in NSFNET

表 1 三种算法基于 NSFNET 网络的业务恢复能力比较

Table 1 Comparison of restoration ratio among AIEA, MST and MRU in NSFNET

Link failures	Algorithms	Number of wavelength per link ( $W$ )			
		3	4	5	6
(10,12)	AIEA	99.21	99.32	100	100
	MST	95.66	96.91	100	100
	MRU	91.00	95.12	97.84	100
(10,12)	AIEA	98.52	100	100	100
	MST	93.83	97.63	100	100
	MRU	93.74	92.94	96.77	100

尽管故障不能避免,但网络的恢复能使网络更为坚固可靠。表 1 模拟计算图 3 拓扑中链路(10, 12)和(0,2)在出现故障后三种算法的恢复率比较。总体来看,在网络资源受限条件下,AIEA 具有更高的业务恢复能力,尤其在多链路同时故障情况下

更具优势。从表 1 中还可以看到,当网络每节点大于 5 时,三种算法均能达到 100%的业务恢复能力,不同的是 AIEA 算法不仅保证了业务的恢复,而且具有更多的冗余资源可供选择。也就是说,AIEA 首先保证受损业务达到恢复,同时保证全光网络资源利用率最大化。

## 5 结 论

提出基于自适应免疫机制的全光网络保护恢复算法,算法以全光网络的虚拓扑为主要研究对象,通过对网络虚拓扑在全局范围内的优化,在全网络部分故障情况下重新完成优化路由操作,实现网络中受损业务的恢复。通过计算实例,充分证明该算法在阻塞率、冗余度和总体恢复能力等方面具有良好的优越性,更适宜于 MESH 结构全光网络全局恢复优化。

## 参 考 文 献

- Han Yishi, Qiang Zhexuan, Xu Guoliang et al. Modern Optical Fiber Communication Technology [M]. Beijing: Science Press, 2005
- 韩一石,强则焯,许国良等. 现代光纤通信技术[M]. 北京:科学出版社, 2005
- Zheng Lan, Bie Zhaohong, Wang Xiuli. A fast heuristic service restoration method for distribution network [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2004, **24**(2):16~19
- K. Zhu, B. Mukherjee. Traffic grooming in an optical WDM mesh network [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2002, **20**(1): 122~133
- G. Li, B. Doverspike, C. Kalmanek. Fiber span failure protection in mesh optical networks [J]. *Opt. Net. Mag.*, 2002, **3**(3):4~5
- Huo Xiaoli, Li Yanhe. Optimization restoration algorithm based on genetic algorithm in WDM optical transport network [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(4):515~518
- 霍晓莉,李艳和. 基于遗传算法的 WDM 光传送网恢复优化算法 [J]. *电子学报*, 2002, **30**(4):515~518
- Qian Jing, Mao Peifa. Restoration and wavelength assignment for two-fiber WDM rings [J]. *J. Commun.*, 2004, **25**(1):87~91
- 钱敬,毛培法. 两纤 WDM 全光环网的保护和恢复与波长分配 [J]. *通信学报*, 2004, **25**(1):87~91
- R. Iraschko, W. Grover. A high efficient path-restoration protocol for management of optical network transport integrity [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2000, **18**(5):779~793
- H. Meng, S. Liu. ISPEA: improvement for the strength Pareto evolutionary algorithm for multi-objective optimization with immunity [C]. *ICCIMA*, 2003. 368~372
- L. D. Castro, J. Timmis. An artificial immune network for multimodal function optimization [C]. *Evolutionary Computation CEC'02 (2002)*. 699~704
- X. Zuo, S. Li. Solving function optimization problems with the immune principle [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2004, **15**(4):702~709
- Rao Xiaodong. Research on Traffic Grooming Algorithms for Optical MAN Mesh Network [D]. Dissertation of Guangdong University of Technology, 2005
- 饶晓东. 业务疏导算法在光城域网网中的研究[D]. 广东工业大学硕士学位论文, 2005