

doi:10.3788/gzxb20124112.1400

基于蚁群优化的 IP over WDM 光网络动态生存性映射算法

蔡庭, 黄善国, 李新, 尹珊, 张杰, 顾婉仪

(北京邮电大学 信息光子学与光通信国家重点实验室, 北京 100876)

摘 要:随着光网络规模的不断扩大以及网络体系结构的扁平化过程加速,网络传输的可靠性和实时性以及生存性路面算法本身面临新的挑战.本文在单点割集的松弛生存性约束条件下,结合动态业务下的 IP over WDM 光网络的特点,借助蚁群优化算法的强鲁棒性和记忆能力,通过改变与调整蚁群优化算法结构中的信息素结构与其更新机制,在动态路由选择过程中,引入网络可生存性约束信息改进路由选择概率计算机制,来实现 IP over WDM 光网络动态生存性映射的路由策略.与其他同类算法相比,该算法不再存储网络备用路由集和物理拓扑自身庞大的割集关系,在保证网络生存性效果的前提下,通过割集松弛条件有效降低了计算的时间复杂度,提高算法收敛速度,适应网络实时性要求.仿真结果表明:与传统最短路算法比较,该算法能有效提高动态光网络的可生存性映射性能和网络的资源利用效率,并降低业务阻塞率.

关键词:IP over WDM; 蚁群优化; 光网络; 生存性

中图分类号:TN91; TP30

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2012)12-1400-5

0 引言

光网络生存性是网络研究的一个重要方面.网络的生存性(Survivability)指网络对故障引起的业务中断和干扰的抵抗能力,即在物理故障发生后,网络对现有业务服务质量、连接性的保障程度^[1].当前随着 IP over WDM 光网络的不断演进,IP over WDM 网络的生存性已成为光网络研究的一个重要方面.考虑到光层保护方式对故障恢复的透明性以及 IP 恢复方式的资源利用的高效性和恢复的灵活性,光层波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)的保护与 IP 层的恢复成为主要的光网络生存性保障手段.光层保护机制对 IP 层的故障透明,即对所有层面的故障只能通过光层分配资源不相关的路径来完成保护倒换,保护粒度相对单一.相反地,IP 层的恢复机制能够灵活地处理光层和 IP 层的故障,但 IP 层的恢复依赖于 IP 层拓扑的连通性.因此,在物理拓扑 WDM 层链路故障导致的故障蔓延效应下,保证 IP 层拓扑的连通性成为实现 IP 恢复的关键问题.由此,光网络可生存性映射定义为:为 IP(逻辑)拓扑映射到物理拓扑寻找

一个能够保证在物理拓扑链路故障导致的故障蔓延效应情况下,依然保持 IP 拓扑连通性的方法^[1].

文献[1]对可生存性映射问题给出了正式的定义及其 ILP 问题的描述,证明该问题属于 NP 完备问题,并给出了对于给定的逻辑拓扑与物理拓扑实现可生存性映射的充要条件——对于逻辑拓扑中的每一个割集所包含的一组边,它们的物理路径不能经过公共的物理链路.

文献[2]提出了 SMART 算法来判断给定的逻辑拓扑与物理拓扑是否存在可生存的映射,尤其在环形网络拓扑中得到了充分的研究,并给出相应的复杂度分析,为下一步的工作奠定了良好的基础.具体地,该文献提出了部分可生存映射理论,即对于一个存在可生存映射的逻辑拓扑,如果其某一子图可以实现可生存的映射,那么对该逻辑拓扑进行基于该子图的图收缩操作后剩余的图,仍然可实现可生存性映射.基于该理论,通过对逻辑拓扑中的环逐步实现可生存映射,最终检验了逻辑拓扑的可生存映射的存在性.

文献[3]提出了在一个不存在可生存性映射的

基金项目:国家重点基础研究发展计划(No. 2010CB328202, No. 2010CB328204, No. 2012CB315604)、国家自然科学基金(No. 60702005)、国家高技术研究发展计划(No. 2012AA011302)和北京市科技新星计划(No. 2011065)资助

第一作者:蔡庭(1987-),男,硕士研究生,主要研究方向为下一代光网络. Email: caitingbupt@gmail.com

责任作者/导师(通讯作者):顾婉仪(1945-),教授,主要研究方向为下一代光网络. Email: wyg@bupt.edu.cn

收稿日期:2012-06-04; **修回日期:**2012-10-10

逻辑拓扑上增加相应的链路来增强逻辑拓扑的可生存性或者减少映射的代价/成本. 该文献提出了只要在增加物理拓扑上相应链路相对应的虚链路即可实现逻辑拓扑的可生存性映射.

文献[4]提出了一种基于备选路由的蚁群优化方法. 算法先通过 K 短路算法为任意两点间计算 K 条备选路由, 则生存性映射问题转化成为给定拓扑从备选路由集合中查找可生存路由组合的组合优化问题, 而优化过程采用蚁群优化算法, 并比较了不同蚁群优化系统间的效率.

然而, 需要注意的是之前的研究主要集中在静态的映射和规划问题, 针对动态业务处于主导地位的光网络, 需要进一步分析业务的动态性给生存性映射问题的研究提出的新要求. 相对于静态映射问题, 动态的生存性映射问题呈现出更多的复杂性.

当前, 随着智能光网络、波分交换光网络、光传送网^[5-7]等新兴光网络结构的引入, 通过路由协议和信令技术给光网络带来的动态特性, 以及网络资源的重配置能力对动态业务的有效支持, 使得光网络能够高效地适配以数据业务为主的动态业务. 业务的动态拆建会导致逻辑拓扑的重构, 因此, 在讨论逻辑拓扑映射过程对 IP 层业务恢复能力的影响时, 解决逻辑拓扑的重构对该问题带来的全新的挑战也迫在眉睫, 这就是本文要讨论的动态光网络的生存性映射问题.

在动态光网络生存性研究方面, 以前的研究^[8-9]主要采用存储备用路由与拓扑割集关系的方式. 当需要重构时, 需要搜索整个备用路由集和拓扑割集关系, 这种方式在网络规模不大的情况下, 可以获得较理想的效果. 但是, 随着网络拓扑规模的增大, 网络中结点与链路数目的增长, 存储规模与路由计算时间呈指数型增长, 而变得不切实际.

本文针对光网络的动态特性提出了一种基于改进的蚁群优化算法的动态光网络可生存性映射算法. 同时在算法中, 在保证网络生存性效果的前提下, 引入单点割集的松弛条件极大地缩小了生存性的约束规模, 提高了路由搜索速度, 而且蚁群优化算法在解决组合优化问题中表现出极强的鲁棒性^[10]. 文章首先给出相关问题的数学描述; 在简单介绍蚁群算法后, 将给出动态光网络蚁群生存性算法的详细描述及相应算法流程; 并进行了仿真分析; 最后对算法进行评价, 并根据目前的研究进展, 指出该方案需要完善的地方和仍未解决的问题.

1 数学模型描述

物理拓扑 $G_p(V_p, E_p)$ 由节点集合 $V_p = \{1, 2, \dots$

$n_p\}$ 和链路集合 E_p 组成, 其中 V_p 表示物理拓扑中所有节点的集合, E_p 表示物理拓扑中所有链路的集合; 同理, 逻辑拓扑 $G_l(V_l, E_l)$ 由节点集合 $V_l = \{1, 2, \dots, n_l\}$ 和链路集合 E_l 组成, 其中 $V_l (V_l \subseteq V_p)$ 表示物理拓扑中所有节点的集合, E_l 表示物理拓扑中所有链路的集合. 这里假定 E_p 和 E_l 中的链路都是双向的, 即: $\forall i, j \in V_p, e_p(i, j) = e_p(j, i)$ 及 $\forall i, j \in V_l, e_l(i, j) = e_l(j, i)$.

f_{ij}^s 为路径标记量, 并且规定: 如果逻辑链路 $e_l(s, t)$ 路由在物理链路 $e_p(i, j)$ 上, 则 $f_{ij}^s = 1$; 否则, $f_{ij}^s = 0$. 由于链路都是双向的, 故 $f_{ij}^s = f_{ji}^s = f_{ij}^{ts} = f_{ji}^{ts}$; 在映射方式 M 下, 物理链路 $e_p(i, j)$ 承载的逻辑链路集为 $L_M(i, j) = \{e_l(s, t) | e_l(s, t) \in E_l, f_{ij}^s = 1\}$.

图 $G = (V, E)$ 中的割集 $CS \langle S, V \setminus S \rangle$, 表示图中所有符合以下条件的边的集合: 这些边的一个端点在 S 中, 而另一个端点在 $V \setminus S$ 中. 并且如果 $G = (V, E)$ 是一个连通图, 则 $CS \langle S, V \setminus S \rangle$ 指满足以下属性的边集 E^* :

- $(V, E - E^*)$ 不再连通;
- 对任意的 $T \subset E^*$, $(V, E - T)$ 依然连通;
- $G(S)$ 和 $G(V \setminus S)$ 是连通的.

定义单点割集为子图 S 中只包含一个结点的割集, 记为 $N_i = CS \langle V, V/S \rangle$, $S = \{i\}$.

在虚拓扑映射问题中, 每个割集都是一个生存性约束条件, 那么对于包含 n 个节点的给定逻辑拓扑 $G = (V, E)$, 完备的生存性约束条件数量高达 $2^{(n-1)}$. 随着网络规模的增大, 枚举所有的生存性约束条件也将是一个 NP 问题, 而且动态光网络又对实时性有苛刻的要求, 因此, 在动态光网络生存性映射中, 考虑完备的生存性约束将不切实际. 但是, 如果能引入一些松弛条件来限制生存性约束条件数量, 将使问题规模显著减小. 文献[1]中提出了一种简单的生存性松弛技术, 即生存性约束条件仅依赖于这样的割集: 在这些割集中 S 只包含一个节点, 在这种条件下, 只有 n 个生存性约束条件; 并且仿真结果表明, 这也可以得到与完备生存性约束条件下的极相似生存性映射效果^[1]. 所以, 为了简化问题的复杂性, 本文的算法将在单节点割集的生存性约束条件下, 构建虚拓扑生存性映射方式 M .

2 生存性映射算法

蚁群优化 (Ant Colony Optimization, ACO) 是由 Marco Dorigo 等学者在真实蚂蚁觅食行为的启发下提出的一种具有高度创新性的元启发式算法^[10]. 蚁群算法作为一大类别的仿生学算法, 根据信息素更新机制与约束机制的不同, 可以分为蚂蚁

系统 (Ant System)、精英蚂蚁系统 (Elitist Ant System)、蚁群系统 (Ant Colony System)、最小最大蚁群系统 (Max-Min Ant System)、基于排列的蚁群系统 (Rank-based Ant System)、超立方蚁群系统 (Hyper Cube-ACO) 等^[10].

基于蚁群优化的 IP over WDM 光网络动态生存性映射算法 DSMACO, 是将蚁群算法用于解决光网络的动态生存性路由问题. 本文以精英蚂蚁系统 (Elitist Ant System) 为基础, 改变其信息素更新机制, 蚂蚁不再单一的根据所选路径的长度来更新信息素浓度, 而是根据此次计算结果的资源利用效率来更新信息素浓度, 将信息素正相关于波分资源占用率, 这样做的目的是使网络路由尽可能实现链路负载均衡. 在启发式信息方面, 体现出本文算法的核心, 即基于生存性约束条件下的全新意义的启发值, 该值将不再是静止的常量, 而是根据动态网络生存性约束条件变化的物理量, 以便蚂蚁能够实时的学习网络的生存性信息, 并且指导蚂蚁的生存性映射的寻路过程. DSMACO 算法中的蚂蚁将不再单一的根据所选路径的长度来更新信息素浓度, 而是根据此次计算结果的可生存性情况及资源的利用效率来更新信息素浓度.

在算路过程中, DSMACO 算法以最小化网络资源占用为目标来激活蚂蚁的寻路进程, 同时动态的更新信息素浓度, 形成有效的正反馈, 最终通过迭代为新建光路请求寻找到合理的可生存性映射方式, 并始终保持资源占用最少. 假定每条物理链路的最大映射数目为 R_{\max} , 链路 $B_p(i, j)$ 的已被映射数目为 R_{ij} . DSMACO 的核心步骤包括路径选择机制、信息素更新机制以及启发式信息计算机制.

2.1 路径选择机制

在构建生存性映射的过程中, 假定蚂蚁的规模为 M , 蚂蚁集合 $\text{Ant} = \{\text{Ant}_i \mid i = 1, 2, \dots, M\}$, 蚂蚁 Ant_i 按照随机比例规则的概率行为选择规则 (赌轮法), 逐跳来决定为逻辑链路 $e_l(s, t)$ 选择路由. 特别地, 蚂蚁 Ant_i 在结点 i 处为逻辑链路 $e_l(s, t)$ 选择结点 j 作为下一跳结点概率是

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}^\alpha]^\alpha [\eta_{ij}^\beta]^\beta}{\sum_{j \in N_i, j \notin \Phi} [\tau_{ij}^\alpha]^\alpha [\eta_{ij}^\beta]^\beta}, & \text{if } j \in N_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 集合 Φ 是路由禁忌表, 避免环路产生; τ_{ij}^α 、 η_{ij}^β 分别代表蚂蚁在结点 i 处为逻辑链路选择结点 j 作下一跳结点的信息素强度和启发式信息; α 在选路过程中信息素的重要程度 ($\alpha > 0$), β 代表在选路过程中启发式信息的重要程度 ($\beta > 0$), 通过调整 α 、 β 的值可以有效地控制信息素与启发式信息在路径选

择过程中重要性的比重.

2.2 信息素更新机制

$\Delta\tau_{ij}^\alpha$ 代表在每次迭代过程中本迭代过程中蚁群 Ant 为逻辑链路 $e_l(s, t)$ 的选择路由过程中, 构建了最优解的蚂蚁 Ant_k 在物理路径 $e_p(i, j)$ 上释放的信息素增量, 则信息素更新规则为

$$\tau_{ij}^\alpha = (1 - \rho)\tau_{ij}^\alpha + \Delta\tau_{ij}^\alpha \quad (2)$$

这种信息素更新机制称为精英蚂蚁策略, 其中, ρ 为信息素挥发速率, 这是为了防止信息素增长过快, 而使算法过早收敛, 陷入局部最优中, 设定合理的 ρ 值将可以给算法带来非凡的表现^[8]. 在 ACOSMA 算法中, 信息素更新将根据本次迭代中最佳解 (路由) Route_s 的权重来决定, 即

$$\Delta\tau_{ij}^\alpha = \delta * \sum_{e_p(i, j) \in \text{Route}_s} \frac{R_{ij}}{R_{\max}} \quad (3)$$

式中调整因子 δ 为常量, 用于平衡信息素增长速度.

2.3 启发式信息更新机制

本文设定启发式信息是与生存性约束条件相关的量. 特别地, 根据第 2 部分的生存性松弛技术的结果, 对于逻辑链路 $e_l(s, t)$, 在为其计算路由的过程中, 将只需要考虑两个割集 N_s 和 N_t 所确定的约束条件, 故将按照式 (4) 和 (5) 计算 η_{ij}^β 值

$$\eta_{ij}^\beta = \begin{cases} \frac{\kappa}{K}, & \text{if } e_p(i, j) \in E_p \\ 0, & \text{if } e_p(i, j) \notin E_p \end{cases} \quad (4)$$

$$K = \left(1 + \frac{\sum_{e_l(s, k) \in N_s} f_{ij}^{\kappa}}{|N_s|}\right) * \left(1 + \frac{\sum_{e_l(s, k) \in N_t} f_{ij}^{\kappa}}{|N_t|}\right) \quad (5)$$

式中, 启发式信息将在新建光路请求到达时进行更新, 并在为该请求建立光路的后续过程中保持不变; κ 为调整因子, 而链路标记量 f_{ij}^{κ} 将被存储在信息素计算参考矩阵 $\mathbf{T} = [f_{ij}^{\kappa}]$ 中, 显然 \mathbf{T} 是一个 4 维度的存储矩阵, 其大小为 n^4 , n 为光网络结点总数.

生存性网络以满足生存性要求下的最小资源占用为目标. 新建链路 $e_l(s, t)$ 的额外资源代价 $C = (H_R - H_0)/H_0$, H_0 、 H_R 分别表示最短路径的跳数和受生存性约束下路径的跳数^[8], 生存性风险系数

$$D = \prod_{\substack{e_l(x, y) \in N_s \\ e_l(x, y) \in N_t}} \sum_{e_p(i, j) \in L_M(s, t)} f_{ij}^\alpha * f_{ij}^{\alpha\gamma} \quad (6)$$

则新建链路的评价函数 E 可表示为

$$E = C + \xi D \quad (7)$$

ξ 为常量, 通过调整 ξ 的值, 可以平衡资源占用与生存性约束之间的重要程度.

2.4 算法流程

基于上述分析, 算法将在业务建路过程中使用 DSMACO 算法实现路由计算功能, 本文采用了启发式算法的实现流程.

1) 初始化物理拓扑, 动态业务发生器.

2) 等待业务到达或拆除请求, 对于到达的业务建立请求, 基于现有逻辑拓扑的可用资源进行最短路径计算, 如果现有逻辑拓扑资源可以满足该请求的带宽需求, 则为业务建立连接并分配资源, 返回; 如果现有逻辑拓扑资源无法满足该请求的资源需求, 即需要新建光路, 确定需要建立光路的节点对, 转到第 3) 步; 否则, 业务阻塞. 如果是业务拆除消息, 释放相应的带宽资源, 然后对资源使用进行检测, 如果某条光路上没有业务, 则拆除该光路, 转到第 2) 步; 否则, 返回.

3) 针对逻辑链路建立请求, 在源节点处使用 DSMACO 算法为该请求选路, 对于拆路过程中的重路由链路, 若选路或者资源分配不足, 导致失败, 则保持原路由不变, 返回选路结果, 转到第 2) 步.

4) 对于逻辑链路拆除请求, 更新各节点上的启发式信息计算参考矩阵 T , 并检查是否存在不满足单割集生存性约束的逻辑链路集 Q , 若 Q 为空集, 转到第 2) 步; 否则, 对 Q 中的各个链路进行发起重建链路请求, 转到第三步.

DSMACO 算法的基本流程: 其中 $best$ 为 DSMACO 算法构建的最优解, $better$ 为每次迭代过程中构建的最优解, $good_i$ 为每次迭代中蚂蚁 Ant_i 找到的解.

1) 初始化迭代次数 Max , 蚁群规模 $NumberOfAnt$ 、 α 、 β 、 γ 、 δ 等参量的值, 初始化信息素浓度矩阵及启发式信息矩阵.

2) 若迭代次数大于 Max , 返回 $best$, DSMACO 算法结束; 否则, 继续下一次迭代, 转至步骤 3).

3) 若本次迭代中, 若所有蚂蚁 Ant_i ($i=1, 2, \dots, m$) 均已完成路由过程, 即 $i>m$, 转至步骤 4); 否则, 蚂蚁 Ant_i 为链路 $e_l(s, t)$ 按照概率计算式 (式 1) 计算路由的选择概率, 并应用赌轮法选择下一跳结点, 至找到目的结点 t 或者蚂蚁 Ant_i 大于蚂蚁生命周期 (定义为遍历的结点数, 即跳数), 蚂蚁 Ant_i 寻路结束, 返回路由 $good_i$; 根据评价函数 E (式 7) 比较 $good_i$ 与 $better$, 若 $good_i$ 优于 $better$, 则更新本次迭代最优解 $better=good_i$, 转至步骤 3).

4) 根据信息素更新式 (式 2) 修改信息素浓度, 根据评价函数 E (式 7), 比较 $best$ 与 $better$, 若 $better$ 优于 $best$, 更新最优解 $best=better$, 转至步骤 2).

3 仿真分析

本文使用 NSFNET 来验证所提算法的有效性, 并规定所有链路都为包含 10 波道数, 每波速率

为 λ 的 WDM 链路, 以网络阻塞率 (Blocking Probability, BP)、资源利用率 (Resource Utilization, RU)、随机故障恢复率 (Restoration Rate under Physical Failure, RR) 等参量与业务强度 (Traffic Intensity, TI) 之间的关系作为指标对算法的具体性能进行了验证. 其中, 随机故障恢复率由故障下的虚拓扑连通性来体现, 并以最短路径算法作为参照算法. 实验选定 DSMACO 算法相关参量 $\alpha=1, \beta=2, \rho=0.3, \sigma=0.5, \xi=2, \kappa=2.5$, 采用泊松业务模型, (并设定所有业务粒度均为 $rate=\lambda/4$), 作相关仿真试验. 对于每个到达的业务请求, 一旦建路过程失败 (阻塞), 则该业务被丢弃, 即无等待队列.

图 1 和图 2 分别给出了 DSMACO 算法与最短路径 (SP) 算法在业务阻塞率和资源利用率的比较, 图 1 指出 DSMACO 算法的业务阻塞率普遍低于最短路径 (SP) 算法路由结果, 这可以由蚁群选路过程的多样性而最短路径算法不具有这一特点得到解释; 图 2 表明 DSMACO 算法能够有效提高网络的资源利用率, 并随着业务强度增加其效果越明显, 这正是 DSMACO 算法目标函数 (最小化网络资源占用) 的预期结果.

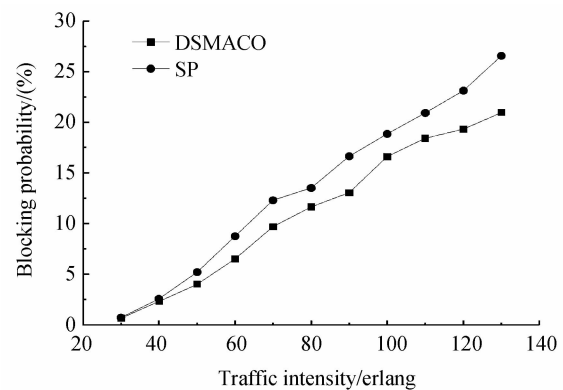


图 1 阻塞率 (%) VS. 业务强度 (爱尔兰)
Fig. 1 BP (%) VS. TI (Erlang)

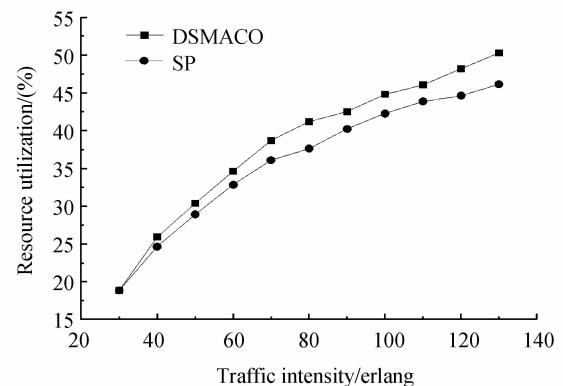


图 2 资源利用率 (%) VS. 业务强度 (爱尔兰)
Fig. 2 RU (%) VS. TI (Erlang)

为了验证 DSMACO 算法的可生存性性能, 本

文在 NSFNET 物理拓扑上, 随机生成连通度 (Connectivity) 分别为 3、4、5 的虚拓扑各 100 个, 然后并考虑在单物理链路故障模型下, 比较在最短路径算法 (Shortest Path Algorithm, SP) 与 DSMACO 算法进行路由, 得到的平均可生存拓扑数 N 如表 1 所示. 表 1 结果表明, 算法在高连通度复杂性网络中效果更加明显, 在网络可生存性方面几乎可以达到与 ILP(整型线性规划) 等同的效果^[1].

表 1. 可生存性: DSMACO VS. SP
Table 1 Survivability: DSMACO VS. SP

Connectivity \ Algorithms	3	4	5	6
SP	27	41	69	77
DSMACO	89	97	99	100

4 结论

本文对 IP over WDM 光网络下虚拓扑构建网络的动态生存性映射问题的研究, 提出了基于改进的蚁群优化的启发式算法 (DSMACO), 并通过仿真验证了算法的可靠性与有效性. 算法在降低业务阻塞率及提高网络资源利用率方面的性能都优于传统的最短路 (SP) 算法. 仿真实验表明算法能够有效地对虚拓扑进行可生存性路由, 并且采用单割点松弛技术后, 有效地降低了算法的复杂度, 提高了算法的收敛速度, 适应了动态拓扑的实时性特点.

当然 DSMACO 算法还存在不理想之处, 如算法本身的参量过多, 对参量的设定与选取是一个棘手的问题, 这将是今后算法改进的方向之一. 本文改进了精英蚂蚁系统的结构, 而蚁群优化作为一大类

不同结构算法的集合, 验证其他蚁群算法在 IP over WDM 光网络动态生存性映射中的效果也是今后研究的重要方面.

参考文献

- [1] MODIANO E, NARULA-TAM A. Survivable lightpath routing: a new approach to the design of WDM-based networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2002, **20**(4): 800-809.
- [2] KURANT M, THIRAN P. Survivable mapping algorithm by ring trimming (SMART) for large IP over WDM networks [C]. *Proceedings of the BroadNets*, 2004: 44-53.
- [3] LIU C, RUAN L. A new survivable mapping problem in IP over WDM networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2007, **25**(3): 25-34.
- [4] KALDIRIM E. Ant colony optimization for survivable virtual topology mapping in optical WDM networks[C]. *Computer and Information Sciences*, 14-16 Sept. 2009: 334-339.
- [5] WEI Le-ping. Generic architecture and standards frame for automatic switched optical network[J]. *Telecommunications Science*, 2001, **17**(5): 3-7.
韦乐平. 自动交换光网络的总体结构与标准框架[J]. *电信科学*, 2001, **17**(5): 3-7.
- [6] JINNO M, TAKARA H, KOZICKI B, *et al.* Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2009, **47**(11): 66-73.
- [7] LAM C F. Optical network technologies for datacenter networks[C]. *Optical Fiber Communication(OFC)*, collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010: 1-3.
- [8] GUO B L, HUANG S G, LUO P, *et al.* Dynamic survivable mapping in IP over WDM network[J]. *Journal of Light-wave Technology*, 2011, **29**(9): 1274-1284.
- [9] XU S Z, LI L M, WANG S. Dynamic routing and assignment of wavelength algorithms in multifiber wavelength division multiplexing networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2000, **18**(10): 2130-2137.
- [10] DORIGO M, STUTZLE T. 蚁群优化[M]. 张军, 译. 北京: 清华大学出版社, 2007.

Dynamic Survivable Mapping Algorithm Based on Ant Colony Optimization in IP over WDM Networks

CAI Ting, HUANG Shan-guo, LI Xin, YIN Shan, ZHANG Jie, GU Wan-yi

(State Key Laboratory of Information Photonics and Optical Communications, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: With the constant expansion of the optical networking and network architecture flattening process accelerated, network transmission reliability and timeliness are facing new challenges, which brought a new challenge to the survivability routing algorithm. In order to realize dynamic survivable mapping of IP routing to WDM based optical networks, with strong robustness and memory capacity of the ant colony optimization algorithm, a novel pheromone structure and pheromone update mechanism is proposed and survivable constraint information is also introduced to improve the probability mechanism of routing selection. The survivable mapping considers the cut sets of all single node and the dynamic characteristics of the IP over WDM network. Compared with other similar algorithm, the algorithm is no longer an alternate route set and the physical topology of the storage network itself huge cut-set relationship, under the premise of ensuring network survivability effect by cut-set relaxation conditions effectively reduce the computation time complexity to improve the convergence rate to adapt to the real-time requirements of the network. Simulation results show that the proposed algorithm can effectively improve the performance of survivable mapping, network resource utilization efficiency and the blocking rate compared with the shortest path algorithm.

Key words: IP over WDM; Ant colony optimization (ACO); Optical network; Survivability