

NGI 中一种混合智能预防式容错 QoS 单播路由模式^{*}

王兴伟 蔡淑降 于 洋 黄 敏

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘 要 IP/DWDM(IP over Dense Wavelength Division Multiplexing)光 Internet 是下一代互联网 NGI(Next Generation Internet)主干网的主要组网技术之一。在 IP/DWDM 光 Internet 中,如何提高其容错能力同时改善其 QoS(Quality of Service)是需要解决的主要问题,容错 QoS 路由是行之有效的解决方法之一。本文采用预防式容错策略,基于蚁群算法和遗传算法相结合的混合智能算法,设计了一种容错 QoS 单播路由模式。仿真研究表明,该模式是可行和有效的,具有较好的性能。

关键词 NGI, IP/DWDM 光 Internet, QoS 单播路由,预防式容错,混合智能,蚁群算法,遗传算法

A Hybrid Intelligent Preventive Fault-tolerant QoS Unicast Routing Scheme in NGI

WANG Xing-Wei CAI Shu-Xiang YU Yang HUANG Min

(School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract IP over DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) optical Internet is one of the mainstream networking techniques for NGI (Next Generation Internet) backbone, and how to improve its fault-tolerance capability and QoS provision becomes critical. Fault-tolerant QoS routing is one of the effective solutions. In this paper, a preventive fault-tolerant QoS unicast routing scheme is proposed based on a hybrid intelligent algorithm, taking advantage of both ant-colony algorithm and genetic algorithm. Simulation results have shown that the proposed scheme is both feasible and effective with better performance.

Keywords NGI, IP/DWDM optical Internet, QoS unicast routing, Preventive fault-tolerance, Ant colony algorithm, Genetic algorithm

1 引言

IP/DWDM(IP over Dense Wavelength Division Multiplexing)光 Internet 是下一代互联网 NGI(Next Generation Internet)主干网的主要组网技术之一^[1]。如何避免服务中断以及如何让服务损失降到最低已经成为一个关键问题,容错成为 IP/DWDM 光 Internet 必备的基本能力^[2,3]。网络化多媒体应用的普及客观上要求 NGI 支持服务质量 QoS(Quality of Service)。因此,在 IP/DWDM 光 Internet 中提供容错 QoS 路由是非常必要的。

根据资源是在故障发生之前预留还是在故障发生之后动态分配,可将容错路由分为预防式和反应式两类^[2,3]。预防式容错路由是在建立主光路的同时预留备份光路,以便在网络发生故障时及时切换,恢复时间短,但网络资源利用率低。反应式容错路由是在建立光路时,不为光路建立请求预留备份光路,仅在发生故障时,根据网络当时运行状况,动态寻找资源恢复光路,网络资源利用率高,但恢复时间长。另外,因为反应式容错路由事先并不预留资源,所以故障不一定能得到恢复。

已经证明,涉及两个或两个以上加性或乘性 QoS 参数优化的路由问题是 NP 完全的^[4],应该采用启发式或智能优化算法加以解决。本文基于预防式容错策略和主从复用机制^[5],引入蚁群算法和遗传算法相结合的混合智能算法^[6,7],

设计了一种预防式容错 QoS 单播路由模式,并进行了仿真实验与性能评价。仿真结果表明,该模式是可行和有效的。

2 模型描述

2.1 问题描述

首先,引入本文使用的一些术语。

链路:指在网络中用来连接两个节点的一段有向光纤。

信道:指链路上的一个波长。

路径:由从源节点到目的节点经过的链路组成。

光路:由从源节点到目的节点经过的信道组成。

连接:为光路建立请求建立的主备光路的总称。

孤儿连接:因采用主从复用机制引起。如果一条连接的备份光路中有信道被其他连接的主光路共享,则称该连接为孤儿连接。

本文要解决的问题是:在为 QoS 光路建立请求建立主备光路的同时,最小化网络中孤儿连接数。

2.2 网络模型

网络可以表示为一个有向连通图 $G(V, E)$ 。其中, V 是节点(波长路由器或 OXC)的集合, E 是边(光纤)的集合。每条边都由两根反向光纤构成,将每根有向光纤称为链路。设每一条链路上提供 W 个波长,且网络中只有部分节点配置全域波长转换器。当节点具有波长转换能力并需要进行波长转换时,可将接收到的信号或分叉后的信号输入到波长转换器

^{*} 本课题得到国家自然科学基金(60673159)、新世纪优秀人才支持计划、高等学校博士学科点专项科研基金、辽宁省自然科学基金(20062022)和国家发改委 CNGI 示范工程项目(CNGI-04-13-2T, CNGI-04-6-2T 和 CNGI-04-15-7A)资助。王兴伟 教授,博士生导师,主要研究领域为下一代互联网、移动无线 Internet 及 IP/DWDM 光 Internet;蔡淑降 硕士研究生,主要研究领域为容错路由机制。于 洋 硕士,主要研究领域为容错路由机制。黄 敏 教授,博士生导师,主要研究领域为算法设计与优化。

进行波长转换,且任意两波长之间的转换延迟相等。

每一条链路 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ 具有如下参数:

波长使用情况描述集: $\Lambda(e_{ij}) = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_W\}$, 其中, W 是每条链路支持的波长数, Q_x 是所有经过链路 e_{ij} 中的第 x 条信道的光路的集合, x 是波长编号, $x=1, 2, \dots, W$;

延迟: $d(e_{ij}), d(e_{ij}) = d(e_{ji})$;

链路故障率: $l(e_{ij})$ 。

每一节点 $v_i \in V$ 具有如下参数:

波长转换标志: $s(v_i)$ 。当节点 v_i 具有波长转换能力时, $s(v_i) = 1$, 否则 $s(v_i) = 0$;

波长转换延迟: $t(v_i)$ 。当节点 v_i 具有波长转换能力并需要进行波长转换时, $t(v_i) = t$, 否则 $t(v_i) = 0$;

延迟抖动: $dj(v_i)$ 。

2.3 数学模型

首先,定义一些记号。

$R = \{R_{sd} \mid \text{从 } V_s \text{ 到 } V_d \text{ 的光路连接请求}, \forall V_s, V_d \in V\}$;
QoS 光路建立请求集, v_s 为源节点, v_d 为目的节点。

Op : 网络中孤儿连接数。

la_{ijk} : 如果链路 e_{ij} 上的波长 λ 为空闲信道, 则 $la_{ijk} = 1$, 否则 $la_{ijk} = 0, \forall e_{ij} \in E$ 。

$lb_{ijk}^{R_{sd}}$: 如果链路 e_{ij} 上的波长 λ 已被 R_{sd} 用作备份信道, 则 $lb_{ijk}^{R_{sd}} = 1$, 否则 $lb_{ijk}^{R_{sd}} = 0, \forall e_{ij} \in E, \forall R_{sd} \in R$ 。

$lp_{ijk}^{R_{sd}}$: 如果链路 e_{ij} 上的波长 λ 已被 R_{sd} 用作主信道, 则 $lp_{ijk}^{R_{sd}} = 1$, 否则 $lp_{ijk}^{R_{sd}} = 0, \forall e_{ij} \in E, \forall R_{sd} \in R$ 。

ld_{ijk} : 如果 $lb_{ijk}^{R_{sd}} = 1$ 且 $lp_{ijk}^{R_{sd}} = 1$, 则 $ld_{ijk} = 1$, 否则 $ld_{ijk} = 0$ 。

$P_{-R_{sd}}$: R_{sd} 的主光路向量, $\forall R_{sd} \in R$ 。

$B_{-R_{sd}}$: R_{sd} 的备份光路向量, $\forall R_{sd} \in R$ 。

n_{ija} : 链路 e_{ij} 上空闲波长数, $\forall e_{ij} \in E$ 。

n_{ijc} : 链路 e_{ij} 支持的波长数, $n_{ijc} = W, \forall e_{ij} \in E$ 。

n_{ijb} : 链路 e_{ij} 上用作备份信道的波长数, $\forall e_{ij} \in E$ 。

n_{ijp} : 链路 e_{ij} 上用作主信道的波长数, $\forall e_{ij} \in E$ 。

$dl_{R_{sd}}$: R_{sd} 的延迟需求, $\forall R_{sd} \in R$ 。

$jt_{R_{sd}}$: R_{sd} 的延迟抖动需求, $\forall R_{sd} \in R$ 。

$ls_{R_{sd}}$: R_{sd} 的故障率需求, $\forall R_{sd} \in R$ 。

本文设计的容错 QoS 单播路由模式的数学模型如下:

目标:

$$\text{minimize}(Op) \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{e_{ij} \in P_{-R_{sd}}} d(e_{ij}) + \sum_{v_i \in P_{-R_{sd}}} t(v_i) \leq dl_{R_{sd}} \quad (2)$$

$$\sum_{e_{ij} \in B_{-R_{sd}}} d(e_{ij}) + \sum_{v_i \in B_{-R_{sd}}} t(v_i) \leq dl_{R_{sd}} \quad (3)$$

$$\sum_{v_i \in P_{-R_{sd}}} dj(v_i) \leq jt_{R_{sd}} \quad (4)$$

$$\sum_{v_i \in B_{-R_{sd}}} dj(v_i) \leq jt_{R_{sd}} \quad (5)$$

$$1 - \prod_{e_{ij} \in P_{-R_{sd}}} (1 - l(e_{ij})) \leq ls_{R_{sd}} \quad (6)$$

$$1 - \sum_{e_{ij} \in B_{-R_{sd}}} (1 - l(e_{ij})) \leq ls_{R_{sd}} \quad (7)$$

其中,

$$Op = \sum_{e_{ij} \in P_{-R_{sd}}} \sum_{e_{ij} \in B_{-R_{sd}}} \sum_{R_{sd} \in R} ld_{ijk} \cdot lb_{ijk}^{R_{sd}} \quad (8)$$

3 模式设计

本文采用蚁群算法和遗传算法相结合的混合智能算法, 在蚁群算法的基础上, 引入遗传算法的交叉操作。由于交叉

操作能对已有解进行重组, 因此有助于跳出局部最优, 提高全局寻优能力。同时, 由于采用预防式容错策略, 因此将蚂蚁分为主光路蚂蚁和备份光路蚂蚁两类。

3.1 QoS 光路建立请求描述

对每个 R_{sd} 采用五元组描述如下: $\langle v_s, v_d, dl_{R_{sd}}, jt_{R_{sd}}, ls_{R_{sd}} \rangle$ 。

3.2 蚂蚁描述

为每个 R_{sd} 都生成 n 对蚂蚁, n 是一正整数。其中, 每对蚂蚁都由主光路蚂蚁和备份光路蚂蚁组成, 分别用于建立主备光路。每只蚂蚁都有记忆功能, 采用八元组表示如下: $\langle at, ID, at, tp, at, dl, at, jt, at, ls, at, A_{sd}, at, A_d, at, dt \rangle$, 元组各元素分别对应蚂蚁标识符、蚂蚁种类、所走过路径的延迟、延迟抖动、故障率、节点集合、信道集合和要到达的目的节点。

3.3 信息素表达与更新

信息素分为由主光路蚂蚁和备份光路蚂蚁分泌的两种, 分别用 Ψ^p 和 Ψ^b 表示。设 Ψ^p 和 Ψ^b 两种信息素的浓度取值范围均为 $[\Psi_{\min}, \Psi_{\max}]$, 且在每条信道上下两者初始浓度均为 $\Psi_{\max}$; 当信息素浓度值不在该范围时, 将其强制设为 $\Psi_{\min}$ 或 $\Psi_{\max}$ 。用 $\Psi_{ij}^p(t)$ 和 $\Psi_{ij}^b(t)$ 分别表示 t 时刻在链路 e_{ij} 中的信道 λ 上 Ψ^p 和 Ψ^b 的浓度, 用 $\Delta\Psi_{ij}^p(t, t+1)$ 和 $\Delta\Psi_{ij}^b(t, t+1)$ 分别表示 $[t, t+1]$ 时间内在链路 e_{ij} 中的信道 λ 上由主光路蚂蚁和备份光路蚂蚁所分泌的信息素浓度的变化量。

信息素更新分局部和全局两种情况。主光路蚂蚁 k 和备份光路蚂蚁 k' 经过链路 e_{ij} 中的信道 λ 时, 需要对信息素进行局部更新。局部更新规则如下:

$$\Psi_{ij}^p(t+1) = (1-\rho) \cdot \Psi_{ij}^p(t) + \phi \cdot \Delta\Psi_{ij}^p(t, t+1) \quad (9)$$

$$\Psi_{ij}^b(t+1) = (1-\rho) \cdot \Psi_{ij}^b(t) + \phi \cdot \Delta\Psi_{ij}^b(t, t+1) \quad (10)$$

$$\Delta\Psi_{ij}^p(t, t+1) = \begin{cases} n_{ija} + \sigma \cdot n_{ijb} & s(v_i) = 1 \\ \sigma \cdot (1 - lb_{ijk}^{R_{sd}}) & s(v_i) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\Delta\Psi_{ij}^b(t, t+1) = \begin{cases} n_{ija} + \sigma \cdot (n_{ijb} + n_{ijp}) & s(v_i) = 1 \\ \sigma \cdot (2 - lb_{ijk}^{R_{sd}} - lp_{ijk}^{R_{sd}}) & s(v_i) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $k, k' = 1, 2, \dots, n, \rho$ 是信息素挥发因子, ϕ 为更新系数, σ 为共享因子, $0 < \rho < 1, 0 < \sigma < 1$ 。显然, 当主光路蚂蚁 k 经过链路 e_{ij} 中的信道 λ 时, λ 上的信息素浓度的变化取决于 $\Psi_{ij}^p(t, t+1)$ 。 $\Delta\Psi_{ij}^p(t, t+1)$ 的值取决于节点 v_i 是否具有波长转换能力以及从 v_i 出发的 e_{ij} 中波长的使用情况。当 λ 上的信息素浓度值低于指定阈值时, 信息素处于挥发状态, 否则处于增强状态。备份光路蚂蚁 k' 经过链路 e_{ij} 中的信道 λ 时的情况与主光路蚂蚁 k 类似。

当主光路蚂蚁 k 和备份光路蚂蚁 k' 经过 n 个时刻到达目的节点后(设主光路蚂蚁 k 是经过 n_1 个时刻而备份光路蚂蚁 k' 是经过 n_2 个时刻到达目的节点的, 则 $n = \max\{n_1, n_2\}$), 就需要对其所选主备份光路对的好坏进行评判(详见 3.6 节): 若为好, 则进行信息素全局更新, 否则不做处理。全局更新规则如下:

$$\Psi_{ij}^p(t+n) = (1-\rho) \cdot \Psi_{ij}^p(t) + \phi \cdot \Delta\Psi_{ij}^p(t, t+n) \quad (13)$$

$$\Psi_{ij}^b(t+n) = (1-\rho) \cdot \Psi_{ij}^b(t) + \phi \cdot \Delta\Psi_{ij}^b(t, t+n) \quad (14)$$

$$\Delta\Psi_{ij}^p(t, t+n) = \begin{cases} \frac{Q}{Op_k + 1} & \text{第 } k \text{ 对蚂蚁经过信道 } e_{ij}^p \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (15)$$

其中, Q 为常数, Op_k 表示由第 k 对蚂蚁所产生的孤儿连接

数。

3.4 蚂蚁转移概率

蚂蚁在向下一跳信道转移时,既为同类蚂蚁在该信道上留下的信息素所吸引,又为异类和同类蚂蚁在该信道上留下的信息素所排斥。

定义 t 时刻信道 e_{ij}^{λ} 对主光路蚂蚁 k 的吸引力 $\alpha_{ij}^{\lambda k}(t)$ 、对备份光路蚂蚁 k' 的吸引力 $\alpha_{ij}^{\lambda k'}(t)$ 以及对它们的排斥力 $\beta_{ij}^{\lambda}(t)$ 分别如下:

$$\alpha_{ij}^{\lambda k}(t) = \Psi_{ij}^{\lambda k}(t) \quad (16)$$

$$\alpha_{ij}^{\lambda k'}(t) = \Psi_{ij}^{\lambda k'}(t) \quad (17)$$

$$\beta_{ij}^{\lambda}(t) = \Psi_{ij}^{\lambda k}(t) + \Psi_{ij}^{\lambda k'}(t) \quad (18)$$

根据上式,信道对蚂蚁的吸引力取决于同类蚂蚁的信息素浓度;信道对蚂蚁的排斥力同时依赖于异类蚂蚁和同类蚂蚁的信息素浓度,当同类信息素少时,排斥力主要来自于异类,但当同类信息素逐渐增多即信道因负载增大而逐渐变得拥挤时,来自同类蚂蚁的排斥作用逐渐加强。

定义主光路蚂蚁 k 和备份光路蚂蚁 k' 在 t 时刻选择 e_{ij}^{λ} 作为下一跳信道的概率分别为:

$$p_{ij}^{\lambda k}(t) = \begin{cases} 0 & l p_{ij}^{\lambda R_{sd}} = 0 \\ \frac{\alpha_{ij}^{\lambda k}(t) / [\beta_{ij}^{\lambda}(t)]^{\epsilon}}{\sum_{\lambda_{ij} \in A} [\alpha_{ij}^{\lambda k}(t) / [\beta_{ij}^{\lambda}(t)]^{\epsilon}]} & \text{否则} \end{cases} \quad (19)$$

$$p_{ij}^{\lambda k'}(t) = \frac{\alpha_{ij}^{\lambda k'}(t) / [\beta_{ij}^{\lambda}(t)]^{\epsilon}}{\sum_{\lambda_{ij} \in A'} [\alpha_{ij}^{\lambda k'}(t) / [\beta_{ij}^{\lambda}(t)]^{\epsilon}]} \quad (20)$$

其中, A 和 A' 分别为主光路蚂蚁 k 和备份光路蚂蚁 k' 当前可以选择作为下一跳信道的集合, ϵ 为一常数。

3.5 解的表达

采用数组形式来表示解。对 $G(V, E)$ 中的链路进行编号。数组中第 i 个元素对应第 i 段链路,如果光路经过该链路中的某条信道,则该数组元素值为对应波长的编号,否则为 -1 。

3.6 主备光路对好坏评判

当一对蚂蚁完成选路过程后,要进行主备光路对的好坏评判。为 QoS 光路建立请求分配主备光路对需同时满足如下三个条件:对同一 QoS 光路建立请求,其主备光路必须是链路不相交的;对不同 QoS 光路建立请求,其主光路不能共享同一信道;对不同 QoS 光路建立请求,仅当其主光路链路不相交时,其备份光路才可共享同一信道。这样的主备光路对是好的。

3.7 适宜函数

当蚁群完成一次循环后,从好的主备光路对中选择最好的作为当前最优解,选择标准是使网络中孤儿连接数最小。因此,适宜函数定义为:

$$f(V_i, V_d) = \sum_{e_{ij} \in E_A} \sum_{e_{jk} \in E_{R_{sd}}} \sum_{e_{kl} \in E_R} l d_{ij} \cdot l b_{ij}^{R_{sd}} \quad (21)$$

显然,适宜函数值越小,主备光路对越好。

3.8 交叉运算

当蚁群完成一次循环后,从好的主备光路对中随机选择两对进行单点交叉,交叉位置根据指定的交叉概率产生。如果交叉所得主备光路对是好的且优于当前最优解,则其取代交叉前的原主备光路对。

3.9 算法流程

混合智能预防式容错 QoS 单播路由算法流程描述如下:

STEP1:设定图 $G(V, E)$ 中节点和链路参数值、QoS 光路

建立请求集、链路信息素浓度区间与初始浓度等;令最大循环次数为 NC_{Max} 、循环计数器 NC 初值为 0、当前最优解适宜值 F 初值为 $+\infty$;获得 QoS 光路建立请求 R_{sd} 。

STEP2:如果 $NC < NC_{Max}$,则转 STEP3;否则,输出当前最优解,算法结束。

STEP3:生成 n 对蚂蚁,令每只蚂蚁的 $at.dl=0$ 、 $at.jt=0$ 、 $at.ls=0$ 、 $at.A_{sd}=\{v_s\}$ 、 $at.A_d=\{v_d\}$ 、 $at.dt=v_d$,分配 $at.ID$,设置 $at.tp$,并将其放置 v_s 上;令时间计数器 $t=0$ 。

STEP4:选取一对蚂蚁,主光路蚂蚁和备份光路蚂蚁分别根据式(19)和式(20)选择转移概率最大的信道 e_{ij}^{λ} 作为下一跳(如果同时存在多个,则随机选择其一),从节点 v_i 转移到节点 v_j , $t=t+1$,更新有关域值如下:

$$at.dl = at.dl + d(e_{ij}) + t(v_i);$$

$$at.jt = at.jt + d_j(v_i);$$

$$at.ls = 1 - (1 - at.ls) \cdot (1 - l(e_{ij}));$$

$$at.A_{sd} = at.A_{sd} \cup \{v_j\};$$

$$at.A_d = at.A_d \cup \{e_{ij}^{\lambda}\}.$$

如果 $at.dl > dl_{R_{sd}}$ 或 $at.jt > jt_{R_{sd}}$ 或 $at.ls > ls_{R_{sd}}$,则结束该对蚂蚁生命;否则,根据式(9)和式(10)对信息素进行局部更新。

STEP5:如果 n 对蚂蚁都到达了 v_d 或生命结束,则转 STEP6;否则,转 STEP4。

STEP6:根据 3.6 节,对已建立的主备光路对进行好坏评判;如果没有好主备光路对,则转 STEP8;否则,对所有好主备光路对,根据式(13)和式(14)对信息素进行全局更新,计算适宜值,若其中的最小值小于 F ,则把与之对应的主备光路对作为当前最优解并更新 F 值。

STEP7:根据 3.8 节,从好的主备光路对中随机选取两对进行交叉运算。若交叉所得主备光路对是好的且优于当前最优解,则用其作为当前最优解并以其适宜值更新 F 。

STEP8:结束所有蚂蚁生命, $NC = NC + 1$,转 STEP2。

结论 基于 NS2 对上述模式进行了仿真实验,并在多个实际和虚拟网络拓扑(如 CERNET 和 CERNET2)上对其进行了性能评价^[7]。仿真结果表明,由于在蚁群算法中引入交叉操作,使得本文设计的模式在网络中产生的孤儿连接数显著降低,明显优于基于经典蚁群算法的模式^[7];同时,与未采用复用技术以及采用备份复用技术的模式相比,本文设计的模式由于采用主从复用机制而使 QoS 光路建立请求阻塞率明显降低^[7]。因此,该模式是可行和有效的,可以较好地解决作为 NGI 主干网主要组网方式的 IP/DWDM 光 Internet 中的容错 QoS 单播路由问题。

参考文献

- 1 Sridharan M, Salapaka M V, Soman A K. A practical approach to operating survivable WDM networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2002, 20(1): 34~46
- 2 王兴伟,李佳,林卫华,等. IP/DWDM 光因特网中容错路由选择机制的研究[J]. 东北大学学报, 2004, 25(11): 1054~1057
- 3 王兴伟,蔡淑萍,黄敏. IP/DWDM 光 Internet 中的一种反应式一体化容错 QoS 单播路由机制[J]. 东北大学学报, 已录用
- 4 Wang Z, Crowcroft J. Quality of service routing for supporting multimedia applications [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1996, 14(7): 1288~1294
- 5 Mohan G, Soman A K. Routing Dependable Connections With Specified Failure Restoration Guarantees in WDM Networks [A]. In: Proceedings of IEEE Infocom [C], 2000 (3): 1767~1770
- 6 师瑞峰,周泓,谭小卫. 递进多目标遗传算法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 12: 48~57
- 7 于洋. IP/DWDM 光因特网中基于蚂蚁算法的容错路由选择机制的研究与仿真实现[D]. 沈阳: 东北大学, 2005