

适用于波长交换光网络的波长旋转图模型设计

赵继军¹, 张曙光¹, 赵文玉²

(1. 河北工程大学 信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 工业和信息化部 电信传输研究所, 北京 100045)

摘 要: 将网络虚拓扑链路及关联波长均匀分布到旋转球体的表面, 建立了新型的波长交换光网络 (WSO) 的波长旋转图模型, 并基于旋转图模型提出了路由波长分配 (RWA) 新策略及算法。仿真结果表明, 每条链路的总波长数分别为 4 和 8 时, 新策略算法的阻塞率平均降低 5.03% 和 9.71%, 资源利用率平均提高 3.3% 和 1.54%。该模型用于解决具有波长转换能力的 RWA 问题效果明显。

关键词: 波长交换光网络; 波长转换; 波长分层图; 波长旋转图

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)05-0044-07

Design of wavelength rotation graph model applied in wavelength switching optical network

ZHAO Ji-jun¹, ZHANG Shu-guang¹, ZHAO Wen-yu²

(1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2. Research Institute of Telecommunication & Transmission, MIIT, Beijing 100045, China)

Abstract: Based on distributing uniformly virtual network topology links and associated wavelengths to the surface of rotating sphere, a new wavelength rotation graph model of wavelength switching optical network (WSO) was constructed, and a creative method to solve the routing and wavelength assignment (RWA) problems was proposed. The simulation results show that if the wavelength number of each link is set separately to 4 and 8, the average blocking probability of the RWA based on the rotation graph model reduces by 5.03% and 9.71%, and the average resource utilization increases by 3.3% and 1.54% respectively, as compared with the existing model. This method would be useful for solving the problem of optical network RWA which has wavelength conversion capabilities.

Key words: WSO; wavelength conversion; wavelength layered graph; wavelength rotation graph

1 引言

在解决波长交换光网络 (WSO) 的路由与波长分配 (RWA) 问题时, 无论是把 RWA 问题拆分为路由和波长分配 2 个子问题, 还是利用启发式算

法解决 RWA 问题都需要考虑波长分配问题^[1-4], 目前在解决波长分配子问题时一般是基于分层图的思想, 分层图对于解决具有波长一致性限制的 RWA 问题十分有效^[5,6], 但解决具有波长智能调度的 RWA 问题时, 就显得不是十分有效^[7-9], 主要存在

收稿日期: 2010-01-08; 修回日期: 2010-04-14

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) 基金资助项目 (2008AA01A329); 河北省自然科学基金资助项目 (F2010001045); 河北省教育厅科学研究计划资助项目 (2008110)

Foundation Items: The National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2008AA01A329); The Natural Science Foundation of Hebei Province (F2010001045); The Scientific Research Fund of Hebei Province Education Department (2008110)

波长转换的次数选择、波长转换节点确定、波长分配繁琐等多种限制。本文根据波长智能调度的需要提出了一种基于波长转换旋转图模型解决 RWA 问题的思想，并构建了波长转换旋转图模型和提出基于新模型的路由波长分配新策略。仿真结果表明，基于波长旋转模型的波长分配策略可以有效降低网络的阻塞率，提高全网资源利用率。

2 波长旋转图模型设计

2.1 波长分层图模型分析

利用分层图模型解决具有波长一致性限制的 RWA 问题是有效的，因此，近年来很多文献利用分层图模型解决 RWA 问题，文献[6]提出了一种基于分层图的最大边不相关 RWA 算法；文献[7]利用分层图方法来记录 WDM 网络状态，提出了一种链路状态描述模型；文献[8]基于分层图模型提出了一种解决 WDM 网络的动态路由和波长分配问题的算法；文献[9]基于分层图提出了一种在 WDM 网状网中支持多种可靠要求的业务量疏导算法，但是文献[6~9]利用分层图模型解决的都是具有波长一致性约束限制的 RWA 问题，如果利用现有的分层图模型解决具有波长转换能力的 WDM 网络 RWA 问题，就需要考虑层与层之间的倒换，具体分析如下。

波长路由光网络的物理拓扑以无向图 $G(V,E,W)$ 表示，其中 V 、 E 、 W 分别表示网络的节点集合、双向链路集合(每个链路由 2 根方向相反的单向光纤构成)和每个链路的波长集合(每根光纤所支持的波长数相同)。波长分层图模型的物理拓扑是利用分层图 $LG(V^*,E^*)$ 来描述，分层图 $LG(V^*,E^*)$ 是把网络拓扑中的物理拓扑复制成相同的 $|W|$ 份，每一份为一层，对应波长集 W 中的一个波长 λ_i (其中 $i=1,2,\dots, |W|$)。

假设 $W = 3$ ，图 1 所示的物理拓扑图就变成分层图(如图 2 所示)，在波长分层图模型中形成了 3 层，自上而下对应的波长依次为 λ_1 、 λ_2 和 λ_3 。当模型中源一目的节点对之间满足波长连续性限制时，形成的光通路在同一个波长分层内。对于一个连接请求，应用分层图模型实现了路由和波长分配的并行计算，它所经过的光路径，就是该光连接在物理拓扑上经过的路径，光连接所在的波长分层就是光连接所占用的波长。图 1 中的光连接请求 (V_1, V_4) 在图 2 中建立的光路径是 $V_1^1 \rightarrow V_2^1 \rightarrow V_3^1 \rightarrow$

V_4^1 ，即该光连接请求在物理拓扑中的路径为 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ ，且该光连接请求被分配的波长为 λ_1 。因此，基于分层图模型的 RWA 算法非常适用于解决具有波长连续性限制的 RWA 问题。但是，若源一目的节点对之间的节点具有波长转换能力，形成的光通路就有可能在不同波长分层中，具体到分层图模型中，一个光连接请求进行路由和波长分配时，就不仅仅是在一个波长分层中进行计算，图 1 中的光连接请求 (V_1, V_4) 在图 2 中建立的光路径可能有 $V_1^1 \rightarrow V_2^1 \rightarrow V_3^1 \rightarrow V_3^2 \rightarrow V_4^2$ 、 $V_1^1 \rightarrow V_2^1 \rightarrow V_3^1 \rightarrow V_3^3 \rightarrow V_4^3$ 等，该光连接请求在物理拓扑中的路径仍然为 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ ，但是在具备波长转换能力的网络环境下，该光路径的每个链路上分配的波长就不一定完全都是 λ_1 ，某条链路上分配的波长可能是 λ_2 或 λ_3 ，不再受波长一致性的限制。

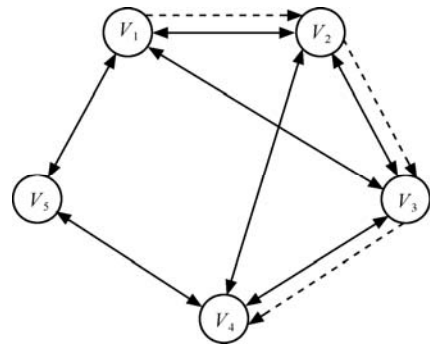


图 1 波长路由光网络的物理拓扑

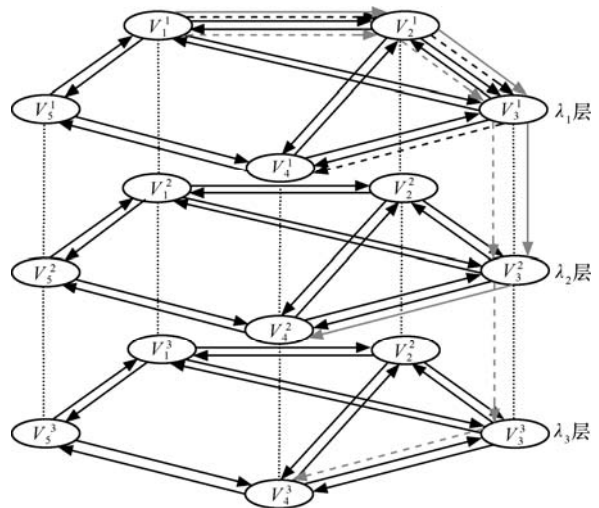


图 2 波长路由光网络波长分层图模型

通过对分层图模型的分析发现，任意的一个光连接请求从源节点到达目的节点在同一波长分

层内选择路由，并且每条链路只允许一个光连接经过，较好地满足了波长一致性约束限制下的 RWA 问题的解决。然而，基于分层图解决具有波长转换能力的 RWA 问题时，主要是在选择光通路时选择一条或几条代价为 0 的虚链路，但是如果这样就增加了选路的时间，同时还存在如下 3 个问题：1) 在哪个节点处进行波长转换？2) 用何种波长转换策略？3) 如何分配波长？因此，本文就想如何不用选择一条或几条代价为 0 的虚链路也能解决具有波长转换能力的 RWA 问题，所以在本论文中提出了一种波长旋转图模型 (WRG, wavelength rotation graph)，并构建了波长旋转图模型，在该模型上不仅可以同时解决 WDM 网络中的选路和波长分配问题，还使波长在节点处智能调度可行。

2.2 波长旋转图模型定义

波长旋转图模型的物理拓扑利用旋转图 $RG(V^*, E^*)$ 来描述，旋转图模型是将物理拓扑中节点 V_i 到节点 V_j 的物理链路 e_{ij} 依据平均分配的原则分成 W 个波长链路，每一个虚链路可以逻辑依附在旋转椭球体的表面，分别为 $e_{ij}^1, e_{ij}^2, \dots, e_{ij}^W$ ，如图 3 所示，形成波长旋转图中的 W 条链路，即物理拓扑中节点 V_i 到节点 V_j 的链路 e_{ij} 对应 $\{e_{ij}^1, e_{ij}^2, \dots, e_{ij}^W\}$ ，并且原来的双向链路变成方向相反的 2 条有向链路， $V_i, V_j \in V, e_{ij} \in E$ 。这样，旋转图 $RG(V^*, E^*)$ 的每一链路都代表一个波长，按顺序对每一链路所对应的波长进行编号，依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_W$ 。

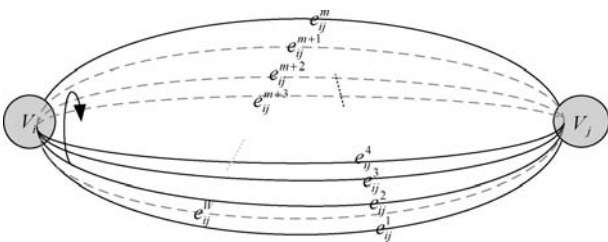


图 3 波长旋转图模型链路分解

假设 $W = 3$ ，波长旋转图的每一链路所对应的波长依次为 λ_1, λ_2 和 λ_3 ，则图 1 中所示的物理拓扑利用旋转图就转变为图 4 所示。

分析可知，在波长分层图模型中，光路从源节点到目的节点必须受波长一致性约束限制。对于波长旋转图模型，一个连接请求，可在波长旋转图上进行选路，它所经过的路径，就是该光连接在物理

拓扑上经过的路径，光连接的各个链路对应的波长就是虚链路所对应的波长，较好地适应了波长转换条件下的选路要求。

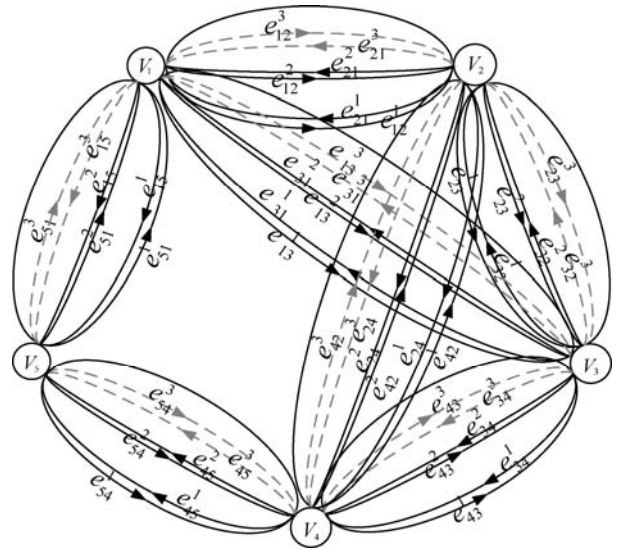


图 4 波长旋转图模型网络链路分解

2.3 基于波长旋转角的波长分配策略

基于波长旋转图模型利用 RWA 算法进行选路和波长分配，通过 OSPF 算法能够直观地找到光连接在物理拓扑上经过的链路，但光连接所经过的链路上波长分配就需要根据网络波长资源求解，首先需要解决波长分配问题，为了有效解决这一问题，在波长旋转图模型的基础上提出了波长旋转角的概念。

波长旋转图的旋转角定义为：把节点 V_i 到节点 V_j 的链路 e_{ij} 分解成虚链路 $e_{ij}^1, e_{ij}^2, \dots, e_{ij}^W$ ，并且都依次依附在旋转球体的表面，任意虚链路之间夹角称为波长旋转图的旋转角，记为 α_{ij}^{mn} 。

$$\text{当 } n = \begin{cases} m+1, & m = 1, 2, \dots, W-1 \\ 1, & m = W \end{cases} \text{ 时, 虚链路 } e_{ij}^m \text{ 和 } e_{ij}^n \text{ 之间的夹角 } \alpha_{ij}^{mn} \text{ 均为 } 360^\circ / W, \text{ 其中 } W \text{ 是链路 } e_{ij} \text{ 上的波长数。}$$

如图 5 所示，图 5 是由图 3 从节点 V_i 向 V_j 投影过去形成的。

定义波长旋转图的旋转角是想通过旋转角能够在选路的同时直接分配波长，也就是利用虚链路 e_{ij}^m 和 e_{ij}^n 之间的旋转角 α_{ij}^{mn} 进行波长分配，节点 V_i 到节点 V_j 之间选择波长思路如下。

1) 置 $K=1$ ，若节点 V_i 的上一节点与节点 V_i 之间分配的波长是 λ_k ，判断节点 V_i 与节点 V_j 之间的

波长 λ_s 是否空闲，若空闲，则给链路分配波长 λ_s ，并把该链路的波长 λ_s 置为已占用；否则，转到步骤 2)。

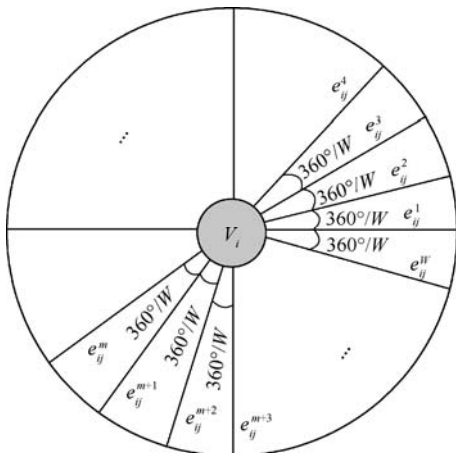


图 5 波长旋转图节点对之间虚链路投影

2) 节点 V_i 和节点 V_j 之间的旋转图以 $V_i V_j$ 为轴逆时针旋转 $360^\circ / W$ 度，判断波长 λ_{s+K} 是否空闲，若空闲，则分配波长；若已占用，则 $K+1$ ，然后重复步骤 2) 直至 $K = W$ 。其中： s 代表被分配波长的波长数； λ_s 代表节点 V_i 的上一节点与节点 V_i 之间分配的波长是第 s 个波长资源； K 是一个控制变量，它的作用就是在节点 V_i 与节点 V_j 之间选择波长时，使节点 V_i 与节点 V_j 之间没有空闲的波长资源，从而不会出现死循环； λ_{s+K} 代表分配的波长资源是第 $s+K$ 个波长。

综上所述，通过波长旋转图模型的构建，提供了一种基于波长旋转角的波长分配策略，可以同时解决具有波长转换能力的选路和波长分配问题，因此本文构建的波长旋转图模型在 WSON 网络中具有较强的适用性。

3 基于波长旋转图模型求解 RWA 问题的过程

由于 RWA 问题是一个 NP 完全问题^[3,8]，一般将其分成路由和波长分配 2 个子问题分别解决。本文提出的波长选转图模型将 RWA 问题转化为在波长旋转图上给最短路径分配波长，并没有改变 RWA 问题是一个 NP 完全问题的特性，所以基于波长旋转图的 RWA 问题仍然是 NP 问题。因此，基于波长旋转图模型的 RWA 算法仍然通过将 RWA 问题拆分为路由和波长分配 2 个子问题的思想。

构建波长旋转图模型的目的是为了能够更好地

地解决 WSON 中的 RWA 问题，在本节将对基于波长旋转图模型求解 RWA 问题的思路进行详细分析。下面通过图 4 中的波长旋转图来具体阐述基于波长旋转图的 RWA 问题求解过程，当业务连接请求 (V_1, V_4) 到达网络时，假设网络中与业务请求 (V_1, V_4) 有关的链路的状态如表 1 所示。

表 1 网络中与业务请求 (V_1, V_4) 有关的链路状态

链路	可用波长	波长旋转图模型中表达	基于 LG 的 RWA 算法可能利用的链路	基于 RG 的 RWA 算法可能利用的链路
e_{12}	λ_1	e_{12}^1		
e_{13}	$\lambda_2 \lambda_3$	$e_{13}^2 e_{13}^3$		
e_{15}	$\lambda_1 \lambda_2$	$e_{15}^1 e_{15}^2$	可利用的链路： $e_{12} e_{23} e_{34}$ ；	$e_{12}^1, e_{24}^2, e_{24}^3, e_{13}^2,$
e_{23}	$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$	$e_{23}^1 e_{23}^2 e_{23}^3$	链路 $e_{12} e_{23} e_{34}$ 使用的波长均为 λ_1	$e_{13}^3, e_{13}^4, e_{15}^1, e_{15}^2,$
e_{24}	$\lambda_2 \lambda_3$	$e_{24}^2 e_{24}^3$		e_{54}^3
e_{32}	λ_1	e_{32}^1		
e_{34}	λ_1	e_{34}^1		
e_{54}	λ_3	e_{54}^3		

注： e_{12}^1 表示节点 V_1 到节点 V_2 且波长为 λ_1 的虚链路。

根据表 1，业务请求 (V_1, V_4) 可选择路径有 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_5 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ ；在这 5 条路径中， $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_5 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ 4 条路径均无连续可用波长资源，路径 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ 有连续可用波长。若 RWA 算法基于分层图模型实现，则只能选择路径 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ ；若 RWA 算法基于波长旋转图模型，由于考虑了波长转换能力，按照跳数最少的原则可以选择 $V_1 \rightarrow V_2 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_3 \rightarrow V_4$ 、 $V_1 \rightarrow V_5 \rightarrow V_4$ ，从上面例子可以定性地得知利用波长旋转图模型不但可以解决波长智能调度问题，还可以改善波长资源利用率。

通过前面论述和分析可知，利用波长旋转图模型解决 RWA 问题是有效可行的，下面给出基于波长旋转图模型求解 RWA 问题的流程，如图 6 所示。

流程中的 T 是一个控制变量，它的作用是在选择源-目的节点对之间光路径时，使 WRG-RWA 算法不会陷入死循环，Const 是一个常量，其值通常为业务请求的最大跳数（不同网络拓扑的 Const 值不同）； s 和 K 的含义与上一节中的 s 和 K 含义相同。

通过上面的介绍，基于波长分层图的 RWA 算法可以实现波长可变的路由，但是在选择光通路时

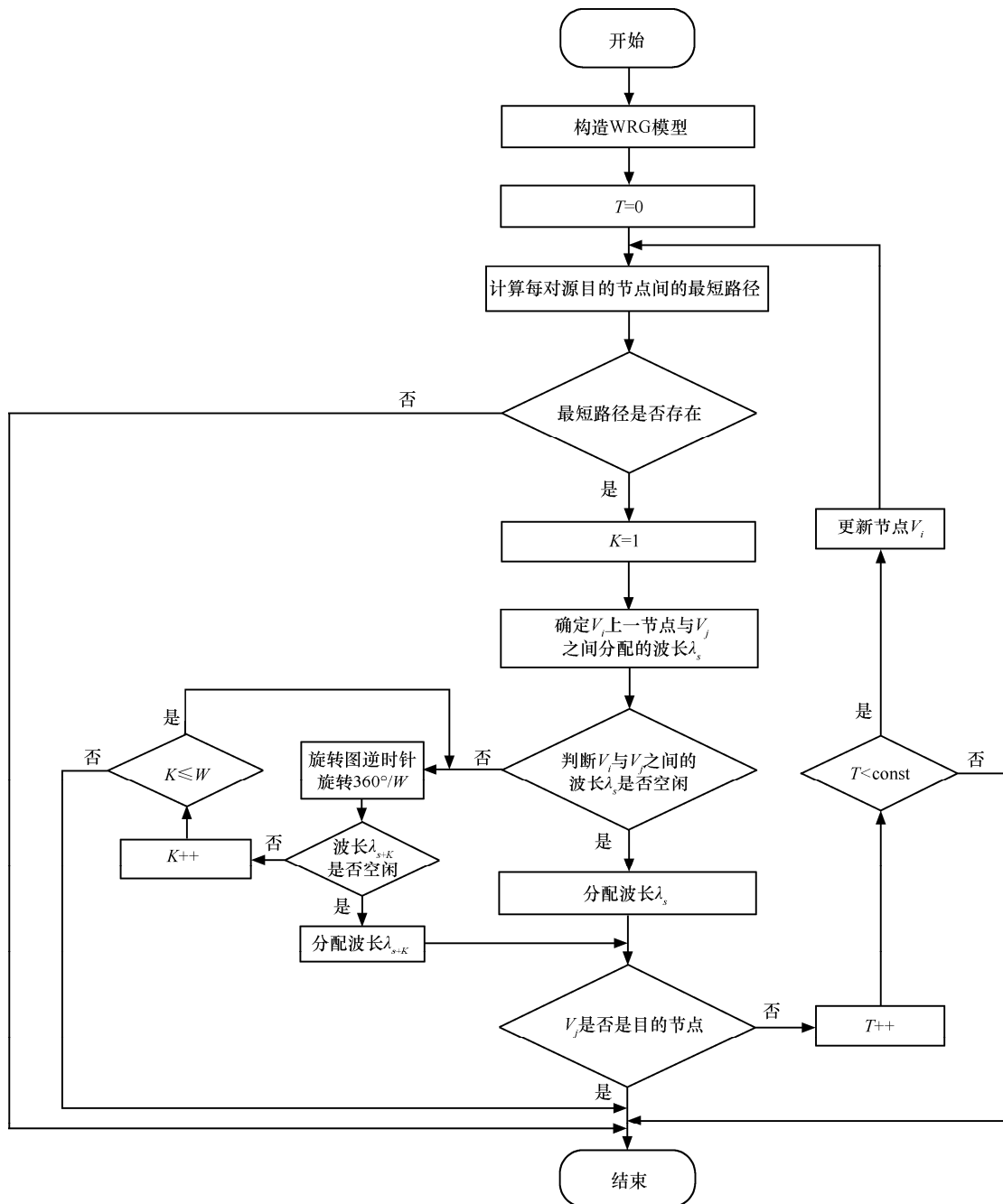


图 6 基于波长旋转图的 RWA (WRG-RWA) 算法流程

还需要选择一条代价为 0 的虚链路，若波长转换次数相对较多，则选择代价为 0 的虚链路数也就相对较多，这样就增加了选路的时间。而基于波长旋转图的 RWA 算法在选择光通路时则不需要选择一条代价为 0 的虚链路，这样就节省了选择一条代价为 0 的虚链路的时间，因此，基于波长旋转图的 RWA 算法就在一定的程度上节省了选路时间。从时间复杂度分析，基于波长分层图的 RWA 算法和基于波长旋转图的 RWA 算法的路由算法

都采用 OSPF 算法，时间复杂度相同，主要区别在波长分配上，基于波长分层图的 RWA 算法在波长分配时最坏情况下时间复杂度为 $O(H^{|W|})$ ，基于波长旋转图的 RWA 算法在波长分配时最坏情况下时间复杂度为 $O(|W|^H)$ (其中， H 是光路径的跳数， $|W|$ 是光纤链路上的波长数)。举例说明，当跳数为 3，波长数为 8 时， $3^8=6561 > 8^3=512$ ，即在最坏情况下，WLG-RWA 算法在波长分配时的时间复杂度远大于 WRG-RWA 算法在波长分

配时的时间复杂度。

4 仿真结果与分析

基于前述思路，本文对基于波长分层图的 RWA(WLG-RWA)算法和基于波长旋转图的 RWA(WRG-RWA)算法进行了对比仿真研究。WLG-RWA 算法中路由算法采用 OSPF 算法，波长分配使用首次命中 (FF) 算法；WRG-RWA 算法的仿真过程中仍然采用 OSPF 算法进行路径计算，从计算出的路径中利用旋转图的思想进行波长分配。采用美国 NSFNET 网络作为仿真网络拓扑 (如图 7 所示)，包含 14 个节点，21 条链接的网络，每条链接代表了一对双向光纤。在 NSFNET 中，本文假设最大波长数分别为 4 和 8，并且每个光节点的信息处理速率相同，业务连接请求是动态业务，服从平均分布，并且网络具有完全波长转换能力。通过仿真，主要进行网络的阻塞率、全网波长资源利用率和算法运行时间 3 个指标参数的分析。

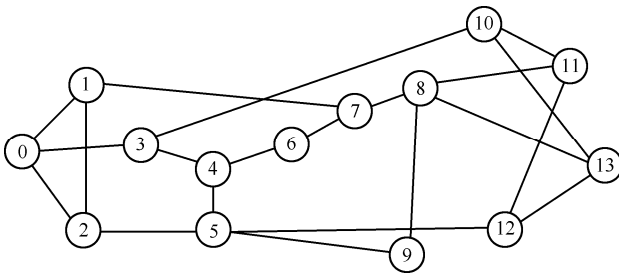


图 7 仿真中使用的 NSFNET 网络拓扑结构

当每根光纤中最大传输波长数为 4 时，使用 WLG-RWA 算法和 WRG-RWA 算法对比的仿真结果如图 8 所示；当每根光纤中最大传输波长数为 8 时，使用 WLG-RWA 算法和 WRG-RWA 算法对比的仿真结果如图 9 所示。仿真结果表明，每条链路的总波长数为 4 或 8，WRG-RWA 算法的阻塞率都有效降低。当每条链路的总波长数为 4 时，使用 WRG-RWA 算法比使用 WLG-RWA 算法的阻塞率平均降低 5.03%，当每条链路的总波长数为 8 时，使用 WRG-RWA 算法比使用 WLG-RWA 算法的阻塞率平均降低 9.71%，可以看出在波长数较多时，连接请求阻塞率性能提升较为显著，这是因为随着波长数的增加，在利用旋转图进行波长分配时可以利用的波长增加了，使业务连接请求被阻塞的概率大大降低，这样，很自然地使连接请求阻塞率性能提升较为显著。

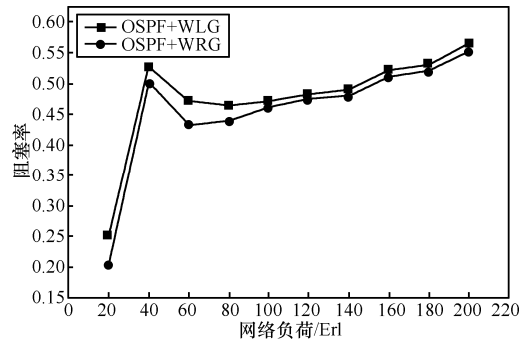


图 8 阻塞率对比 (4 个波长)

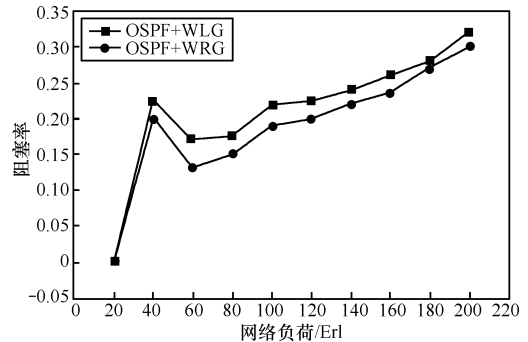


图 9 阻塞率对比 (8 个波长)

图 10 和图 11 给出了 WLG-RWA 算法和 WRG-RWA 算法的资源利用率对比图，分别使用 4、8 作为每条链路的总波长数。仿真结果表明，每条链路的总波长数为 4 或 8，WRG-RWA 算法的资源利用率均有显著提高。当每条链路的总波长数为 4 时，使用 WRG-RWA 算法的阻塞率比使用 WLG-RWA 算法的资源利用率平均提高 3.3%，当每条链路的总波长数为 8 时，使用 WRG-RWA 算法的比使用 WLG-RWA 算法的资源利用率平均提高 1.54%。从图 10 和图 11 可以看出在波长数较多时，全网的资源利用率明显下降，这是因为总波长数增加，使利用旋转图选择波长时被分配的波长的使用频率降低，这样，很自然地使全网的资源利用率明显下降。

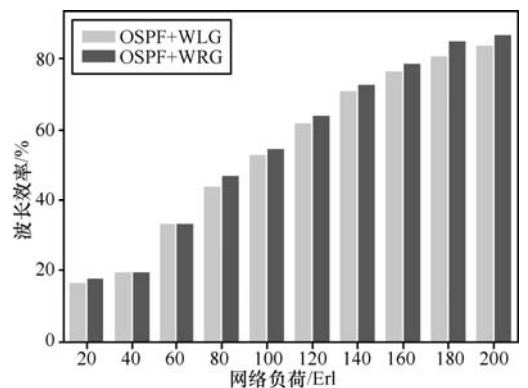


图 10 资源利用率对比 (4 个波长)

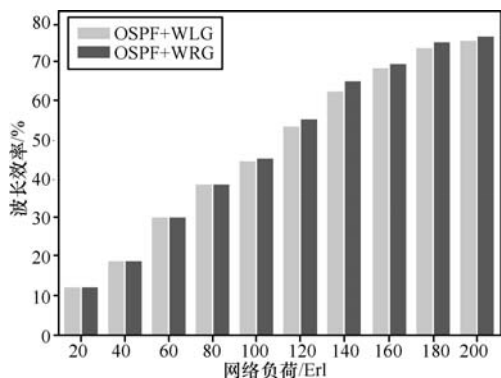


图 11 资源利用率对比 (8 个波长)

图 12 和图 13 给出了 WLG-RWA 算法和 WRG-RWA 算法的运行时间对比, 分别使用 4、8 作为每条链路的总波长数。从图中可以看出, 每条链路的总波长数为 4 或 8 时, WRG-RWA 算法的运行时间均明显降低, 这恰恰说明了在最坏情况下, WLG-RWA 算法在波长分配时的时间复杂度远大于 WRG-RWA 算法在波长分配时的时间复杂度。

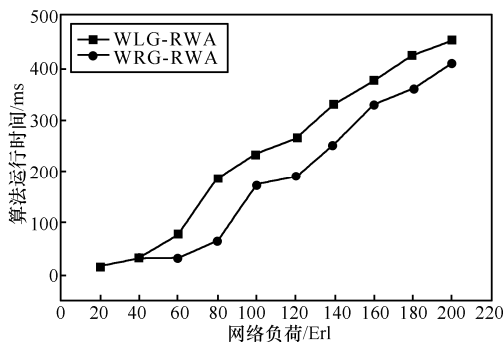


图 12 算法运行时间对比 (4 个波长)

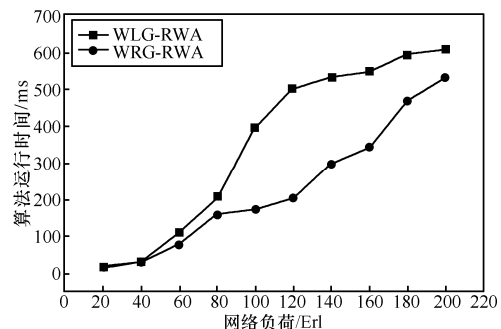


图 13 算法运行时间对比 (8 个波长)

通过对网络的阻塞率、全网波长资源利用率 2 个指标参数的对比分析, WRG-RWA 算法的阻塞率明显降低, 全网资源利用率明显提高。所以, 通过仿真和分析可以得出结论, 旋转图模型可以解决具有波长转换限制的 RWA 问题, 而且 WRG-RWA 算法比 WLG-RWA 算法更适合解决具有波长转换限

制的 RWA 问题。

5 结束语

本文提出了一种基于波长旋转图模型解决具有波长转换能力 RWA 问题的方法, 并通过将网络虚拓扑链路及关联波长均匀分布到旋转球体的表面, 构造了一种新型的波长旋转图模型, 而且提出了相应的波长分配策略和 RWA 算法。通过仿真验证和分析, 旋转图模型可以有效解决具有波长转换限制的 RWA 问题, 而且 WRG-RWA 算法比 WLG-RWA 算法更适合解决具有波长转换限制的 RWA 问题。

参考文献:

- [1] 杨春勇, 王文珍, 刘德明等. 一种全光波长路由器的设计及性能分析研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(2):455-458.
YANG C Y, WANG W Z, LIU D M, *et al.* Design and performance analysis of an all-optics wavelength router[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008, 30(2): 455-458.
- [2] AZODOLMOLKY S, KLINKOWSKI M, MARIN E, *et al.* A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks[J]. Computer Networks, 2009,53(7):926-944.
- [3] MAEKOVIC G Z, TEODOROVIC D B, ACIMOVIC-RASPOPOVIC V S. Routing and wavelength assignment in all-optical networks based on the bee colony optimization[J]. AI Communications, 2007, 20(4): 273-285.
- [4] POINTURIER Y, BRANDT-PEARCE M, SUBRAMANIAM S, *et al.* Cross-layer adaptive routing and wavelength assignment in all-optical networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(6):1-13.
- [5] BERTHOLD J, SALEH A A M, BLAIR L, *et al.* Optical networking: past, present and future[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009,29(9):1104-1117.
- [6] 王汝言, 张普钊, 隆克平等. WDM 网络中一种基于分层图模型的 RWA 算法[J]. 光通信技术, 2007, 31(10):4-6.
WANG R Y, ZHANG P Z, LONG K P, *et al.* A layered graph-based RWA algorithm in WDM networks[J]. Optical Communication Technology, 2007, 31(10):4-6.
- [7] 葛晨晖, 黄晋竹, 孙小菡等. 自相似业务下共享通道保护 WDM 网络性能分析[J]. 电子与信息学报, 2006,28(11):2148-2151.
GE C H, HUANG J Z, SUN X H, *et al.* Performance of WDM network with shared-path protection under self-similar traffic[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2006,28 (11):2148-2151.
- [8] 肖诗源, 刘贤德, 金鑫. 一种波长转换受限 WDM 网络的动态路由和波长分配算法[J]. 电子学报, 2005,33(6):1140-1142.
XIAO S Y, LIU X D, JIN X. An algorithm for dynamic routing and wavelength assignment in WDM network with limited wavelength conversion[J]. Acta Electronica Sinica, 2005,33 (6):1140-1142.

(下转第 59 页)