

一种全光波长路由器的设计及性能分析研究

杨春勇^① 王文珍^① 刘德明^② 何军^③

^①(中南民族大学电子信息工程学院 武汉 430074)

^②(华中科技大学光电子科学与工程学院 武汉 430074)

^③(弗吉尼亚大学电气与计算机工程系 美国弗吉尼亚州 夏落茨维尔市 22911)

摘要: 该文基于一种简单低成本的、波长转换节点共享型全光波长路由器结构, 设计了以排队理论为基础的 M/M/T/T 模型, 研究了波长路由器在波分复用波长路由网络中的阻塞特性。数值结果表明, 全光网波长路由器的阻塞特性与复用波长数目, 链路波长利用率, 节点接入光纤端口数, 有无波长转换器密切相关。尤其在受限波长转换条件下的配置优化分析, 可看出波长路由器无需可调谐器件, 也能获得灵活的波长转换能力, 不但可避免波长路由器因为精确调谐所开销的时间, 而且所有的控制均为简单的开关控制, 可降低工程实现的复杂度。

关键词: 波分复用; 光交换; 波长转换; 波长路由器

中图分类号: TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)02-0455-04

Design and Performance Analysis of an All-Optics Wavelength Router

Yang Chun-yong^① Wang Wen-zhen^① Liu De-ming^② He Jun^③

^①(Institute of Electronics Information Engineering, South-Central University for Nationalities, Wuhan 430074, China)

^②(Institute of Optoelectronics Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

^③(Department of Electrical & Computer Engineering, University of Virginia, Charlottesville, Virginia 22911, USA)

Abstract: Based on the theory of queue, a blocking probability model M/M/T/T is presented for a simple and cost-effective architecture of all optical wavelength router to investigate the blocking probability of the wavelength router in WDM wavelength routed all-optical network. It is found that the blocking probability is relevant to the number of wavelength per link and the number of access fiber link ports, and with or without wavelength conversion. Especially, more attention is paid to the blocking performance of the router with limited wavelength convertible capability. And it is seen by the numerical computing that low conversion degree of the wavelength converter is more realistic to construct a wavelength router system with accurately tunable devices not used, not only switching time is to be minished, but also the complexity of carrying out in engineering is reduced.

Key words: WDM; Optical switching; Wavelength conversion; Wavelength router

1 引言

互联网及其它数据业务的爆炸式指数增长, 促使光网络技术快速发展, 全光波长路由网络被公认为是承载 IP 业务的理想传输平台^[1]。同时随着新的光交换技术和密集波分复用传输技术的引入, 透明的波长路由光网络使得成千上万的用户可以利用有限的波长资源实现相互间多媒体实时通信及海量信息共享。

在全光波长路由网络中, 信息始终保持在贯穿整个通路的光通道中, 相当于传统的电路交换网络, 网络的管理可以按业务的需要分上下路光子通道。能实现全光互连的波长路

由/交换节点的主要支撑设备就是波长路由器(Wavelength Router, WR)。文献[2, 3]中提出了多种比较理想化的 WR 结构。其中均不同程度地使用了各种可调谐器件, 譬如可调谐波长转换器, 然而目前由于技术和价格的原因, 该器件迟迟未能完全走向商用^[4]。因此在全光网络中如何优化配置波长转换器(Wavelength Converter, WC), 引起了广泛的讨论。当前比较一致的观点是在波长路由光网络中配置 WC, 可以减少连接阻塞和实现波长重用, 达到提高光交换系统和网络性能的目的。鉴于上述原因, 文献[3]中研究了多种不同的 WC 共享方案, 但缺少定量分析。文献[5]指出 WC 节点共享的 WR 结构具有最好的适应性。以上多数文献考虑的均是配置理想的全波段可调谐 WC, 而现实情况下 WC 的波长转换能力是受限的或是固定的。因此, 本文从现实考虑, 基于 WC 节点共享原理, 讨论了一种无需可调谐 WC, 但具备灵

2006-07-17 收到, 2006-12-20 改回

武汉市科技攻关计划(2002100513004)和中南民族大学自然科学基金(Y22050091)资助课题

活的波长转换功能的新型结构,并根据排队论的方法为此结构提出了数学定量分析模型。本文所设计的波长路由器结构不但可实现波长交换,而且还避免了WR因为精确调谐所开销的时间,所有的控制都只是开关动作,便于计算机控制。

本文第2节介绍WR结构设计。第3节引入M/M/T/T数学分析模型。第4节得出数值分析结果并进行相关讨论。第5节总结全文。

2 结构设计

本文研究的WR结构^[6]见图1所示。为了讨论问题简单和示意的需要,图中的结构具有输入/输出光纤端口的数目仅为 $N=3$,在每根光纤中复用的波长数目是 $w=4$,均为单向的光纤链路。不失一般性,把本地上下路波长信号均考虑为直通信号,实际配置中稍加修改就可以实现波长上下路。将图1中的输入光纤链路:输入1,输入2, ..., 输入 N 表示为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$,输出光纤链路输出1,输出2, ..., 输出 N 表示为 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$,假设其中每根光纤链路均可以使用 w 个波长。对应WR输入端的不同波长集合为 $X=\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{w-1}\}$,不同输出波长集合为 $X'=\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_{w-1}\}$ 。该WR理论上可以支持最大容量为 $C=N \cdot w$ 个光通道或者连接。从输入光纤链路输入1,输入2, ..., 输入 N 到来的信号根据其承载的波长分组(即波长路由),所有相同的波长通过输入端的解复用器以后都集中连接到某一个路由开关R-SW。目前能够用于R-SW的成熟商用产品主要是机械光开关和MEMS。R-SW能够将任意输入端口的信号配置到任意输出空闲端口。尽管R-SW具备强大的连接能力,然而当一个连接请求需要使用一个已经被占用的波长时,冲突依然会出现,称为竞争。为了减少竞争并提供波长交换的能力,给WR配置了一个波长转换器池,其中容纳 $w \cdot d$ 个固定WC(d 表示每个R-SW的端口能提供连接波长转换的数量,图1中 $d=1$),这些固定WC的输入端口与一个S-SW的各个输出端口相连接,于是当对应 λ_i 编组的R-SW,其输出口出来的波长需要波长转换的时候,可以利用S-SW的选择控制,能够被转换为波长 λ_j ($i=1, 2, \dots, w-1, i \neq j$),然后将转换后的光波长信号环回馈入相应于该波长编组 λ_j 的R-SW,并且重新寻路到输出。需要提及的是,WR还具备在有多多个波长空闲的情况下,多个波长同时进行转换的能力;如果因业务量的需要而增加配置固定WC的数量,亦即 d 增大,WR结构的性能将会更好。值得注意的是,图1的结构中可调控单元唯有R-SW和S-SW,这些部件均是光开关部件,能够很容易地按照“0”或者“1”的编码序列进行控制。因此本文的结构在微计算机的“11001...10”类似序列的编码控制作用下,能实现波长交换和波长路由的功能,而无须对WC进行模拟精确调谐,最终简化了波长路由器的系统结构,减少了波长交换的时间。

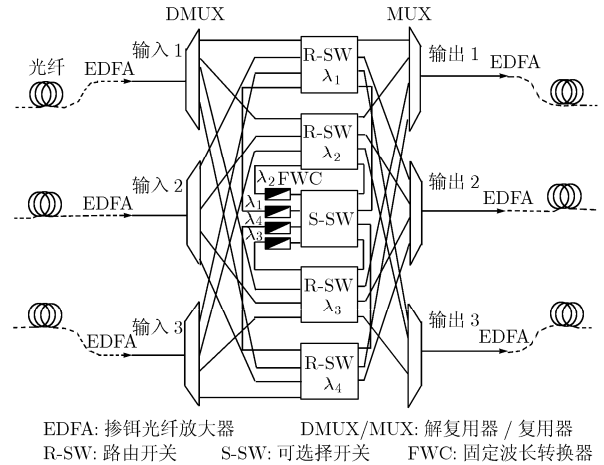


图1 全光波长路由器结构

3 性能分析数学模型

定量评价配置WR的性能要受网络拓扑结构,流量模式和路由距离等较多不同参数的影响。为了简化分析,也为了模拟根据图1所配置的路由节点在网络中的行为,现做如下条件约束:

- (1)点到点的业务流;
- (2)连接的请求无排队,如果某个光连接请求被阻塞,将被立即丢弃;
- (3)已经存在的连接不再重新分配新的波长;
- (4)业务流在输入输出光纤链路中是均匀分布的,链路中的负载相互独立;
- (5)给任意光路由通道分配的波长遵循随机均匀概率分布。

应该指出的是以上对链路和波长独立性的假设只是为了讨论问题的需要,是对现实模型的一种近似分析,至于基于该假设模型的准确性还要依赖于WR所在网络的具体拓扑和业务模式。

定义 ρ 为每条光纤链路中波长的利用率(或者负载); T 为WR波长转换池中WC的数量,令 $T=Cr$, r 表示WC数量相对于WR支持最大容量的百分比。某一源-目对(S-D)的资源预留请求到达WR,请求使用某一波长的过程遵循到达率参数为 λ ,服务时间是按照参数为均值 μ 的指数分布的泊松过程。可以使用图2中M/M/T/T模型^[7]来模拟WR波长转换池的变化过程。某单一波长信号以 λ 速率被请求使用,如果在WR路由表中获知该波长在其目的输出端口已被使用(对于所有光纤输入链路该事件发生的概率是 ρ^N),将会请求波长转换,此时WR波长转换池中的某个WC被请求的速率是 $\lambda\rho^N$ 。由此可以推之,波长转换池中的变化从状态 k (k 个波长转换器被使用)到状态 $k+1$ ($k+1$ 个波长转换器被使用)的迁移概率可以近似为 $(C-k)\rho^N\lambda$ 。假设该WR中的波长转换池中有 m 个WC空闲的概率为 $P(m)$ 。则

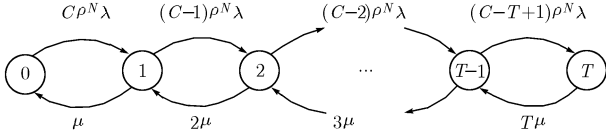


图 2 波长路由器 M/M/T/T 队列模型

$$P(m) = \begin{cases} P(0) \frac{1}{m!} \frac{C!}{(C-m)!} \rho^{m(N+1)}, & m \leq T \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $P(0)$ 是 WR 波长转换池中所有 WC 均空闲的概率，为

$$\begin{aligned} P(0) &= \left[\sum_{k=0}^T \frac{C \rho^N \lambda (C-1) \rho^N \lambda \cdots (C-k) \rho^N \lambda}{(k+1) \mu \cdot k \mu \cdots \mu} \right]^{-1} \\ &= \left[1 + \sum_{k=1}^T \frac{C(C-1) \cdots (C-k+1) \cdot \rho^{kN} \lambda^k}{(k!) \mu^k} \right]^{-1} \\ &= \left[1 + \sum_{k=1}^T \frac{C! \rho^{kN} \lambda^k}{(k!) (C-k)! \mu^k} \right]^{-1} \\ &= \left[1 + \sum_{k=1}^T \frac{C!}{(k!) (C-k)!} \rho^{k(N+1)} \right]^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

令所有 WC 均被占用的概率为 $P(T)$ ，根据式(1)和式(2)可得

$$P(T) = P(0) \frac{1}{T!} \frac{C!}{(C-T)!} \rho^{T(N+1)} \quad (3)$$

由于所有 WC 均被占用，S-D 资源预留请求将因为无资源可以分配而引起阻塞，该通信请求无法建立而被放弃。WR 的阻塞率可以根据式(4)计算得出^[8]

$$P = \left(1 - \left((1 - \rho^N) + \rho^N (1 - P(T)) (1 - \rho^{C-N}) \right)^h \right)^w \quad (4)$$

其中 h 表示 S-D 资源预留请求在端到端的网络传输中通信的距离，即跳数。对于无波长转换能力的 WR 节点，某波长请求信令到达节点时，WR 查询自身路由表，发现被请求的波长在其目的输出端口已被使用，便立刻引起阻塞，此时式(3) $P(T) = 1$ ，代入式(4)得到的值定义为 P_0 。定义一般意义情况的阻塞率 P 相对于无波长转换能力条件下的阻塞率 P_0 的比值为性能劣化因子 f ，即

$$f = \frac{1 - P_0}{1 - P} \quad (5)$$

性能劣化因子的规律是值越小，性能越好。

4 数值结果及讨论

根据式(4)，可以计算出端到端的光连接请求在各种不同网络条件下的阻塞率。如果连接请求通过跳数 $h = 15$ 的通信距离后到达目的端。沿光通路的波长路由器的配置均为总容量 $C = 32$ ，波长转换的可配置能力 $r = 25\%$ 。不同光纤端口数 N 条件下，网络的阻塞性能 P 相对于网络能提供载荷 ρ (图中的符号为 R_0) 的变化曲线如图 3 所示。从该数值结果可以看出，伴随载荷 ρ 的增加，网络阻塞的可能性必然增大。另外也不难发现，给波长路由器增加输入/输出的光纤端口数，也可以改善网络的性能。就图 3 而言，当光纤端口数

$N = 4$ 和 $N = 8$ 较为理想，因为在网络载荷达到 0.8 时，网络的阻塞率分别仅为 20.81% 和 1.29099×10^{-5} ，但是实现的系统代价并不高。为了更深入研究波长路由器中输入/输出光纤端口数对网络性能的改善程度，根据式(5)，使用前文相同的配置参数，数值结果曲线如图 4 所示。可见，式(5)的结果不但更为明显地说明了前面的结论，而且表明在网络负载量较小的情况下，增加波长路由器的光纤端口数，对网络的性能影响不大。此时发现当网络负载在 0.60~0.80 之间时，影响相对明显。图 5 的结果表明，不同通信距离 h 条件下，波长路由器所具有的波长转换能力 r 对性能劣化因子 f 的影响情况，具体配置参数为 $C = 32, N = 4, \rho = 0.7$ 。从图 5 也不难发现，该配置方案对通信距离小的应用而言，性能表现不突出，对于 10 跳以上的长距离路由能够赢得较好的性能改善，不过当通信距离达到一定程度以后，性能上的改善趋于一个定值。从图 5 还可以发现波长转换能够提高长距离通信的连通率，但不是说波长路由器配置的 WC 越多就越好，而是存在一个最佳值，譬如图 5 中参数条件下的最佳值 $r = 20\%$ ，亦即是配置 6 个 WC 就能取得最好的性价比。

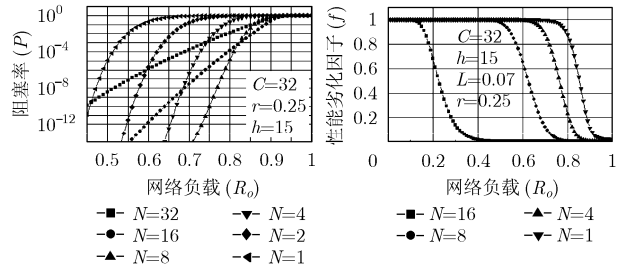


图 3 不同光纤端口数情况下，网络阻塞率与网络负载的关系

图 4 不同光纤端口数情况下，性能劣化因子与网络负载的关系

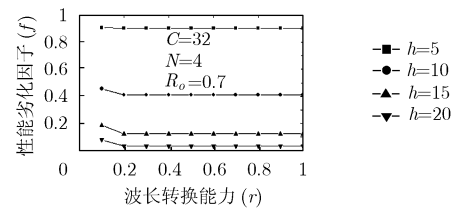


图 5 不同通信距离情况下，性能劣化因子和波长转换能力的关系

对于更一般情况而言，波长路由器系统配置参数要根据具体的网络需求而定，可以参照式(4)和式(5)计算获得。

5 结束语

基于波长转换节点共享的机理，结合当前光通信用光电子器件的实际情况，本文设计了一种新的全光波长路由器结构，并以排队论为基础，对全光波长路由器进行数学建模，从复用波长数、链路波长利用率、节点接入光纤端口数，有无波长转换器等多个参数角度，数值分析了系统的性能。结

果表明,增加波长路由器的光纤端口数和配置一定的波长转换器均能提高系统的性能;配置波长转换器对通信距离小的应用而言,性能改善不明显,对于长距离路由能赢得较好的性能改善,但是当通信距离达到一定程度以后,性能上的改善也趋于一个定值。换言之,针对一定应用要求,波长路由器中配置的 WC 数量存在一个最佳值。

综上所述,在受限波长转换条件下,本文设计的波长路由器无需可调谐器件也能获得灵活的波长转换能力,不但避免了波长路由器因为精确调谐所开销的时间,而且所有的控制均为简单的开关控制,保证了工程实现上的可操作性。

本文所设计的数学模型还存在不足,没有考虑所在网络的具体拓扑和业务模式,因此模型的准确性还值得进一步提高。

参考文献

- [1] Green P. Progress in optical networking [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2001, 39(1): 1081-1096.
- [2] Qin X D and Yang Y Y. Optical cross connect architectures for wavelength routed WDM networks [J]. *Optical Networks Magazine*, 2003, 4(4): 50-62.
- [3] Nuzman C, Leuthold J and Ryf R, *et al.* Design and implementation of wavelength-flexible network nodes [J]. *Lightwave Technology*, 2003, 21(3): 648-663.
- [4] Borella M S, Jue J P, and Banerjee D, *et al.* Optical components for WDM lightwave networks [J]. *Proc. IEEE*, 1997, 85(8): 1274-1307.
- [5] Chai Teck Yoong, Cheng Tee Hiang, and Bose S K, *et al.* Analytical model for a WDM optical cross-connect with limited conversion capability [J]. *IEEE Communications Letters*, 2000, 4(11): 369-371.
- [6] Yang Chunyong and Liu Deming. Reconfigurable wavelength router with simplicity and cost-effectivity. *Optical Fiber Technology*, 2006, 12(1): 20-28.
- [7] Sheng Youzhao. Queuing Theory and the Applications in Computer Communications[M]. Beijing: BUPT Press, 1998: 134-135.
- [8] Barry R A and Humblet P A. Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changer [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 1996, 14(6): 858-867.

杨春勇: 男, 1975年生, 讲师, 博士, 研究方向为光纤通信网络交换/路由。

王文珍: 女, 1977年生, 讲师, 博士, 研究方向为光子微波通信技术。

刘德明: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 目前主要研究方向为光纤通信网络与系统。

何军: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为光网络路由与波长分配。