

波长变换器均匀放置的 Mesh-Torus 的性能分析

叶 通,邱 昆,唐明光

(电子科技大学国家光纤重点实验室,四川成都 610054)

摘 要: 本文主要研究了在 WDM 的 Mesh-Torus 中,部分网络节点使用波长变换器能给网络带来的好处.文中比较了在非泊松业务下,波长变换器按二项式分布和均匀分布放置时在阻塞率、转换增益和公平性方面能带来的好处,证明了波长变换器均匀放置在链路负荷均匀的情况下的 Mesh-Torus 中是一种优化配置.

关键词: 波分复用;部分虚波长路由;阻塞概率;转换增益;公平性

中图分类号: TN929.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2001)12-1649-04

Performance Analysis of Mesh-Torus with Wavelength Conversion Uniform Placement

YE Tong, QIU Kun, TANG Ming-guang

(State Key Lab of Optical Fiber Communication, UESTC, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract: The advantages of placement wavelength converters only in some nodes of WDM Mesh-Torus are studied in this paper. The performance of binomial distributed placement and uniform placement in terms of blocking probability, conversion gain and fairness are evaluated and compared under non-Poisson traffic mode, and it is proved that the uniform placement is an optimal scheme in mesh-torus when link loads are uniform.

Key words: wavelength division multiplexing; partial virtual wavelength path; blocking probability; conversion gain; fairness

1 引言

随着通信的发展和人们对带宽的需求的增加,以 WDM 技术为基础的光传送网(OTN)的概念应运而生.在 OTN 中,使用波长路由技术取代了传统的“光-电-光”转换的节点技术,增加了光纤的带宽利用率.在最初的 WDM 的光网络中,点到点的通信需要使用同一条空闲波长建立连接,即所谓的波长通路(Wavelength Path, WP).随着技术的发展,光网络中引入了波长变换器,克服了波长连续性的限制,建立了虚波长通路(Virtual Wavelength Path, VWP)的概念.

VWP 概念在光网络中的引入,其优点是明显的^[1],主要体现在它在特定的情况下能有效地降低网络阻塞率.但是由于其昂贵的价格,人们提出了只在部分节点使用波长变换器以降低网络成本,即部分虚波长通路(Partial Virtual Wavelength Path, PVWP).

本文讨论在非泊松业务下,将 PVWP 应用于 Mesh-Torus 时,波长变换器的放置方案.文章的第二部分将讨论 Mesh-Torus 拓扑结构的特点、波长变换器在多跳路径中的优化放置模式以及非泊松业务 Mesh-Torus 网络阻塞模型.文章的第三部分,我们将把波长变换器按二项式分布和均匀分布放置时

能带来的好处做了比较,并且将 PVWP 方案和 VWP 方案做了比较.通过比较发现均匀分布放置明显优于二项式分布放置,而且均匀放置的 PVWP 方案的性能已经非常接近 VWP 方案的性能.最后在第四部分得出结论.

2 网络结构和业务模型

2.1 Mesh-Torus 拓扑结构的优点

Mesh-Torus 网是一种主要的全光网的网络拓扑结构.首先 Mesh-Torus 是 Mesh 的一种,网中的每个节点的顶点度较大,使得网络的路由选择和自愈比一般的网络具有更高的灵活性,这点已受到人们的普遍重视;然而与一般的 Mesh 相比 Mesh-Torus 的结构显得很规则,即从网络的任意一个节点看上去,网络的结构都是一样的,这样利于网络的规划,因此很多文献都将它作为研究的例子;而且现已证明,由于 Mesh 网独有的特点,使得波长变换器在 Mesh 网中能带来的变换增益比在一般网络中带来的增益要大得多^[2],Mesh-Torus 作为一种特殊的 Mesh 同样具有这种特点.

但是如何基于 PVWP,并在 Mesh-Torus 中充分地发挥波长变换器的作用却还没有被提及,因此我们在本文中讨论了在 Mesh-Torus 中优化放置波长变换器的问题.

2.2 波长转换器在单条路径中的优化放置

设在一条 H 跳的路径上, 链路负载均匀且相互独立. 每条链路中有 F 个波长, 且每条波长被占用的概率均为 ρ . 并且在该路径上依次放置了 k 个波长转换器, 于是 H 跳链路被分成了 $K+1$ 段. 设 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_{k+1}\}$ 表示每段的跳长, 则第 l_i 个分段中呼叫不被阻塞的概率为:

$$Suc(L_i) = 1 - [1 - (1 - \rho)^{l_i}]^F \quad (1)$$

因此, 在 H 跳的路径中呼叫不被阻塞的概率为:

$$Suc(L) = \prod_{i=1}^{K+1} Suc(L_i) \quad (2)$$

经验证, 当向量中所有的 $l_i = \frac{H}{K+1}$ 时, $Suc(L)$ 取得最大值^[3]. 即当 K 个波长转换器恰好平分 H 跳时, 能使单条路径的阻塞率最小, 也就是波长转换器的最优放置了. 此时的路径阻塞率可写成:

$$P_{opt} = \left[Suc\left(\frac{H}{K+1}\right) \right]^{K+1} \quad (3)$$

此时 $K+1$ 恰好能被 H 整除. 当不能整除时, 为取得近似优化, 按照上述的 L 向量优化策略, 路径应分成 $y = H - x(K+1)$ 个 $x+1$ 跳长的子段和 $k+1-y$ 个 x 跳长的子段, 其中 $x = \lfloor \frac{H}{K+1} \rfloor$.

$M \times M$ 的 Mesh-Torus 网络可以看成是由 M 个纵向环网和 M 个横向环网交错而成. 在 Mesh-Torus 中如果使波长转换器的放置满足具有波长转换功能和不具有波长转换功能的节点交错分布的特点时, 则将使网络中每一对源和目的节点间的路径符合上述优化结果. 容易知道此时的放置率为 50%.

2.3 网络阻塞率的计算

设呼叫到达服从一般分布, 并且对呼叫的服务时间服从指数分布. 又由于交叉连接节点不具有缓冲, 当到达的呼叫看到所有的波长 (设有 s 个波长) 都在忙时, 呼叫直接被阻塞 (或是被损失), 光路不能被建立起来. 因此这种动态的网络行为可以被看成是 $G/M/S/S$ 的损失制排队系统.

这里的 G 表示到达按一般分布, 需要指出的是在许多文献中, 都使用泊松流来表达 WDM 网络的业务, 然而现实的网络业务却还包括平滑和峰值的情况, 因此仅仅进行泊松分布的讨论是不够精确的. 在这里我们使用 BPP (Bernoulli-Poisson-Pascal)^[4] 模型来近似表达一般分布 G . 在文献 [4] 中定义了具有无限服务台系统在稳态时服务器忙的个数的方差和均值的比值 Z 为峰值因素, 当 $Z > 1$ 时, 峰值业务使用 Pascal 分布来表达, 这时呼叫到达服从速率 $\lambda_i = \lambda + (i-1)\mu$ 的指数分布, 即到达速率随系统服务器忙的个数增加而增加; 当 $Z = 1$ 时, 一般业务可以使用常用的 Poisson 分布来表达; 当 $Z < 1$ 时, 平滑业务使用 Bernoulli 分布来表达, 这时呼叫到达服从速率 $\lambda_i = \lambda(n-i)$ 的指数分布, 即到达速率随系统服务器忙的个数增加而减少.

设 p_i 为 $G/M/S$ 系统稳态时的分布概率, p_i 为 $G/M/S/S$ 系统稳态时的分布概率, p_i 为 $G/M/S/S$ 系统稳态下, 顾客到达时看到系统有 i 个波长在忙的概率. 则在非泊松输入下, 呼叫按到时间间隔为指数分布到达, 只是其到达速率与系统

状态有关. 因此 p_i 满足如下关系^[5]:

$$p_i = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P\{C(t, t+h) | N(t) = i\} \times p_i(t)}{P\{C(t, t+h) | N(t) = i\} \times p_k(t)}, \quad i = 1, 2, \dots, S \quad (4)$$

其中 $C(t, t+h)$ 表示 $(t, t+h)$ 内到达一个顾客, $N(t) = i$ 表示 t 时刻系统的顾客数. 于是由指数分布的性质有:

$$P\{C(t, t+h) | N(t) = i\} = \lambda h + o(h) \quad (5)$$

代入上面的式子有:

$$p_i = \lambda p_i / \sum_{k=0}^s \lambda p_k \quad (6)$$

又根据 p_i 和 p_{i-1} 的关系, 由此可得:

$$p_i = \frac{\lambda}{\mu_i} p_{i-1} \quad (7)$$

由这个关系式及所有 p_i 和为 1 的关系, 就可以求出每个 p_i 的值, 注意这时的 s 为当顾客到达时看到 s 个波长全忙时系统单位时间损失的顾客数, 它可以由下式决定:

$$sPs = \sum_{i=0}^{s-1} p_i i - \sum_{i=0}^{s-1} p_i i \quad (8)$$

由此可得到, 在没有波长转换的两跳路径中, 当第一跳和第二跳分别有 i 个和 j 个波长空闲时, 路径还有 n 个共同的空闲波长的概率为:

$$\begin{aligned} B_n^{(2)} &= P\{\text{两跳有 } n \text{ 个连续波长空闲}\} \\ &= \sum_{i=0}^F \sum_{j=0}^F P\{\text{两跳有 } n \text{ 个连续波长空闲} \\ &\quad \text{第一跳 } i \text{ 个空闲, 第二跳 } j \text{ 个空闲}\} \times \\ &\quad P\{\text{第一跳空闲 } i \text{ 个波长}\} \times \\ &\quad P\{\text{第二跳空闲 } j \text{ 个波长}\} \\ &= \sum_{i=0}^F \sum_{j=0}^F \frac{C_i^{F-n} C_j^{F-n}}{C_F^n} p_{F-i} p_{F-j} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $\max(0, i+j-F) \leq n \leq \min(i, j)$. 由此迭代, 可得 l 跳有 n 个空闲连续波长的概率为:

$$B_n^{(l)} = \sum_{i=0}^F \sum_{j=0}^F \frac{C_i^{F-n} C_j^{F-n}}{C_F^n} B_n^{(l-1)} p_{F-i} p_{F-j} \quad (10)$$

因此当 $n=0$ 时, 即可得 l 跳链路的阻塞概率 $B_0^{(l)}$.

通过上面的分析以及第二节的结果, 可以得到在 H 跳波长转换器放置服从均匀分布的路径上, 其阻塞率可如下表示:

$$B_{wc}^{(H)} = 1 - (1 - B_0^{(x+1)})^y (1 - B_0^{(x)})^{K+1-y} \quad (11)$$

为了体现均匀放置的优越性, 这里引入文 [6] 中提到的放置模型进行比较. 该模型中, 每个网络节点按概率 q 独立于其它节点获得波长变换能力 (称为二项式分布), 其 $B_{wc}^{(H)}$ 可表示为:

$$\begin{aligned} B_{wc}^{(H)} &= B_0^{(H-1)} (1-q)^{H-1} + \sum_{i=1}^{H-1} [1 - (1 - B_{wc}^{(i)}) \\ &\quad \cdot (1 - B_0^{(H-i)})] q (1-q)^{H-i-1} \end{aligned} \quad (12)$$

由上面的推导我们已经得到单条路径下部分节点具有波长转换能力的阻塞概率, 因此可以进一步得到网络的全局阻塞概率:

$$P_{total} = \sum_{H=1}^{N-1} B_{wc}^{(H)} r_H \quad (13)$$

其中 N 表示网络的节点数, r_H 表示 H 跳链路被选为某次呼叫路径的概率. 若设在 Mesh-Torus 中路由按最短路径算法进行选取, 则 r_H 可表示为:

$$r_H = \begin{cases} \frac{4H}{M^2 - 1}, & 1 \leq H \leq \frac{M}{2} - 1 \\ \frac{4H - 2}{M^2 - 1}, & H = \frac{M}{2} \\ \frac{4(M - H)}{M^2 - 1}, & \frac{M}{2} + 1 \leq H \leq M - 1 \\ \frac{1}{M^2 - 1}, & H = M \end{cases} \quad (14)$$

3 结果及分析

设每条光纤复用的波长数为 16, 根据上面提到的模型进行理论计算, 得出一组理论曲线. 通过这些理论曲线我们主要在网络的阻塞性能、波长转换增益以及网络的公平性方面对波长转换器 50% 放置率的二项式分布放置 (以下用 Bin 表示) 和均匀放置 (以下用 Uni 表示) 的两种 PVWP 方案进行了比较, 还将 PVWP 方案和 VWP 方案进行了比较. 通过比较将发现在 50% 的波长转换器放置率下, Uni 明显优于 Bin, 而且 50% 的 Uni 的性能已经很接近 VWP 方案.

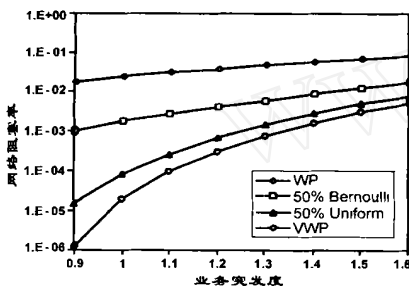


图 1 网络阻塞率随业务突发度的变化情况

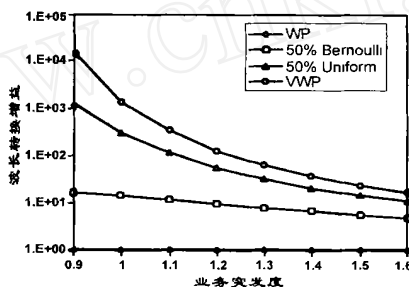


图 2 转换增益随业务突发度的变化情况

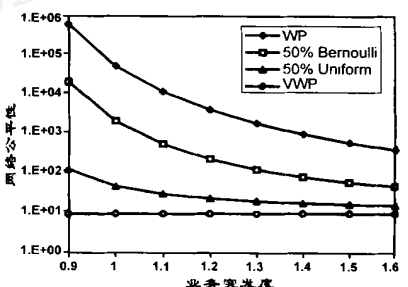


图 3 公平性随业务突发度变化情况 ($\alpha = 2$)

图 3 是关于公平性随业务突发度变化的计算结果. 图中显示当没有引入波长转换时公平性比较差, 这是由于 WP 方案建立光路时的波长一致性的限制而引起的. 由于这一限制, 呼叫被阻塞的概率随着跨越的跳数的增加而明显的增加, 使得公平性较差. 当引入波长转换之后由于克服了波长一致性的限制, 使得上述现象得以改观. 从图中可以看出 Bin 有一定的改善, 但不是很理想, 而 Uni 却带来了比较好的公平性. 当然 VWP 方案由于彻底地克服了波长一致性的限制, 因此能保持更好的公平性, 而且基本不受 Z 的影响. 从图中还可得知 Z 的增加却有利于公平性的改观.

上面的讨论说明在各项指标随 Z 变化时, Uni 都要明显优于 Bin. 下面再分析当 Z 一定时, 各项指标随节点负荷变化的规律. 图 4、图 5 分别给出了当 $Z = 1$ 时, 从 0.5 变化到 3, 阻塞性和转换增益的变化规律. 图中结果表明 Uni 已经很接近 VWP 而明显要优于 Bin. 这时阻塞性能随负荷的增加而

其中阻塞性能指标表达了在网络达到稳态时, 由于链路的空闲波长被用完, 使得呼叫被阻塞的平均概率, 我们用 B 来表示. 波长转换增益指标表达了网络在使用了波长转换设备后, 网络阻塞率被降低的比率 (即能带来的好处), 用 G 来表示:

$$G = B / B_{wc} \quad (15)$$

公平性表达了跨越不同跳长的呼叫被阻塞掉的概率的公平程度, 我们用 F 来表示:

$$F = B_{Dmax} / B_1 \quad (16)$$

其中 B_{Dmax} 为经过呼叫最大链路数 D_{max} 的阻塞概率, B_1 为呼叫只经过 1 跳的阻塞概率.

首先分析各项指标随突发度变化的规律, 并假定这时每个节点提供的负荷为 $\alpha = 2$. 图 1 和图 2 分别给出了 B 和 G 随 Z 变化的计算结果, 从中可以知道用波长转换器要明显优于不用的情况. 而对于同样的 PVWP 方案 Uni 又明显优于 Bin 的情况, 而且 Uni 的阻塞性能已经很接近 VWP 了. 但是我们也同时注意到, 不论是阻塞性能还是转换增益, 随业务的突发度的增加而明显地降低了, 换言之通过波长转换在阻塞性能方面带来的好处随突发性的增加而显著减小. 根据我们的计算, 当突发度 $Z \geq 2$ 时, 这种好处已经不明显了, 这时只能通过增加光纤中复用的波长数来改善性能.

变差, 而且由波长转换带来的阻塞增益随节点负荷的增加也显著地降低. 根据我们的计算, 当 $\alpha = 5$ 时波长转换带来的好处已经不再明显了, 这时若要改善网络的阻塞性能则需要通过增加每根光纤复用的波长数来解决.

图 6、图 7 给出了当 $Z = 1.5$ 时 B 和 G 随 α 变化的计算结果, 可知当 $Z = 1.5$ 时网络阻塞性能明显比 $Z = 1$ 时的要降低, 而且阻塞率随负荷的增加而增加. 但是波长转换增益的变化规律却有所不同, 虽然其总体趋势是随负载的增加而降低, 但降低的趋势却比 $Z = 1$ 时要平缓得多, 而且其最大值比 $Z = 1$ 时的要小的多 (这点证明了图 2 所反映的规律). 然而值得注意的是, 此时各种方案的增益曲线分别在 $(0.7 \sim 1.2)$ 的范围内达到峰值. 这说明当业务的突发度比较大时, 波长变换能在业务量比较适中时带来最佳增益 (其中 Uni 在 $\alpha = 1$ 时取得最大值). 当然不能忽略的一点就是, 在这种情况下 Uni 要比 Bin 明显优越.

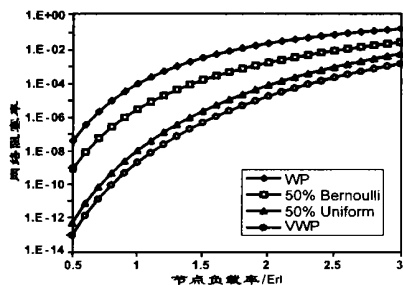


图 4 网络阻塞率随节点负载率的变化情况

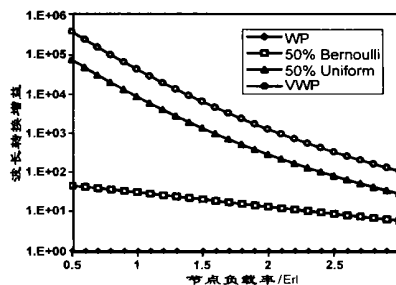


图 5 转换增益随节点负载率的变化情况

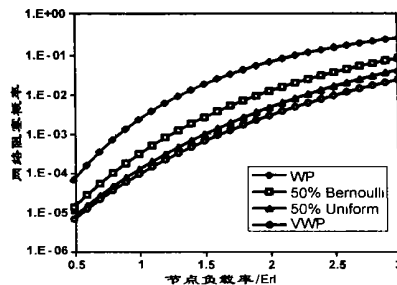


图 6 阻塞概率随节点负载率的变化情况

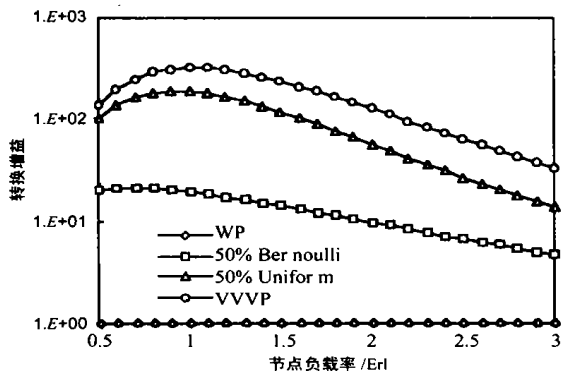


图 7 转换增益随节点负载率的变化情况 (Z=1.5)

4 结论

通过上面的讨论,发现波长转换器的引入在一定的业务突发度或节点负荷的范围内能够很好地降低 Mesh Torus 的阻塞率,增加网络的公平性.而且 Uni 方案优于 Bin 方案,它能很好的接近 VWP 方案的性能,满足网络的性能要求,证明了在 Mesh Torus 拓扑条件下在各个波长的负荷均匀时转换器均匀放置是一种优化配置方案.

参考文献:

[1] S J B Yoo. Wavelength conversion technologies for WDM network applications [J]. Lightwave Tech. , June 96, 14(6) :955 - 966.

[2] R A Barry ,P A Humblet. Models of blocking probability in all-optical networks with and without wavelength changers [J]. IEEE JSAC. / Lightwave Tech. ,1996 ,14(5) :858 - 867.

[3] S Subramaniam ,M Azizoglu ,A K Somani. On the optimal placement of wavelength converters in wavelength-routed networks [A]. Proc. of INFOCOM [C] ,1998.

[4] S Subramaniam ,M Azizoglu ,A K Somani. A performance model for wavelength translation with non-Poisson traffic [A]. Proc. of INFOCOM [C] ,1997.

[5] 盛友招. 排队论及其在计算机通信中的应用 [M]. 北京邮电大学出版社,1998.

[6] S Subramaniam ,M Azizoglu ,A K Somani. All-optical networks with sparse wavelength conversion [J]. IEEE/ ACM Trans. Networking. , 1996 ,4(4) :544 - 557.

作者简介:



叶 通 男,1976 年 10 月生于福建浦城. 2001 年获电子科技大学硕士学位. 现在上海交通大学攻读博士学位. 目前研究方向为 WDM 光传送网络.