

自相似业务下共享通道保护 WDM 网络性能分析

葛晨晖 黄晋竹 孙小菡 张明德

(东南大学电子工程系 南京 210096)

摘要 该文利用随机中点置换-分形高斯噪声(RMD-FGN)方法生成自相似业务,并且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。对自相似业务下5×5 Mesh_Torus共享通道保护WDM网络性能进行了仿真。结果表明:当业务的自相似系数或方差变大时,也就是说业务的突发程度变大时,阻塞率变大,网络的性能下降。增加单纤波长数,可以降低阻塞率,提高网络性能。

关键词 波分复用,共享通道保护,自相似业务,分层图

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)11-2148-04

Performance of WDM Network with Shared-Path Protection Under Self-Similar Traffic

Ge Chen-hui Huang Jin-zhu Sun Xiao-han Zhang Ming-de

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract A method of Random Midpoint Displacement-Fractional Gaussian Noise (RMD-FGN) is applied to generate self-similar traffic. A link state model is presented and used to describe the wavelength usage of Wavelength Division Multiplexing (WDM) network with layered-graph model. The performance of a 5×5 Mesh_Torus WDM network with shared-path protection under self-similar traffic is simulated. The result shows that when the self-similar coefficient or the variance of traffic increases, that is, the burst of traffic rises, the block probability goes up and the performance of network decreases. The block probability falls as the number of wavelength per fiber grows.

Key words Wavelength Division Multiplexing (WDM), Shared-path protection, Self-similar traffic, Layered-graph

1 引言

在波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)光网络中,每条光通道往往都承载着大量的高速业务,一旦网元失效将给用户带来巨大的损失。保护机制是提高网络可靠性的有效手段。由于有较高的资源利用率和较快的保护速度,共享通道保护一直是研究的热点^[1-5]。实现共享通道保护的关键是为连接请求寻找不相关的工作和保护路由并分配波长,即路由和波长分配(Routing and Wavelength Assignment, RWA)问题。根据业务模型来分,RWA问题可以分为静态RWA和动态RWA。由于网络业务越来越呈现出动态的特性,尤其是IP/WDM网络模型的引入,要求WDM网络具备快速响应动态业务的能力^[6],所以本文研究共享通道保护WDM网络的动态RWA性能分析。

对于动态RWA问题,它的性能受到许多因素的影响,业务模型是其中一个很重要的因素^[6]。由于缺乏真实有效的WDM网络业务模型,所以WDM网络的动态性能分析大都假设网络中连接请求的到达速率服从泊松分布^[1,5-7]。虽然电话网络中业务量近似满足泊松分布,但是近几年来研究发现,实际数据网络中的业务量流量可以用自相似过程描述。并且

与传统的泊松业务模型相比,在网络性能分析时,由自相似业务模型得到的结果更接近于实际值^[8-10]。文献[11,12]对基于自相似业务的WDM光网络的动态阻塞性能进行了分析,得出了有参考意义的结论,但是目前缺少自相似业务下共享通道保护光网络的性能分析,需要进一步深入研究。

本文主要研究自相似业务对共享通道保护WDM网络动态性能的影响。首先介绍自相似业务模型;接着给出基于分层图模型的共享通道保护的动态RWA算法;然后对5×5 Mesh_Torus网络拓扑进行仿真并分析结果;最后是结束语。

2 自相似过程及业务模型

对于平稳时间序列 $X = \{X_i, i=1,2,3,\dots\}$,其 m 重聚集时间序列 $X^{(m)} = \{X_k^{(m)}, k=1,2,3,\dots\}$ 定义如下:

$$X_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km-(m-1)}^{km} X_i \quad (1)$$

记 $D(X)$ 为 X 的方差, $R_X(k)$ 为 X 的自相关函数,如果 $0 < \beta < 1$ 且对于任意的 $m=1,2,\dots$ 有

$$D(X^{(m)}) = \frac{D(X)}{m^\beta}, \quad R_{X^{(m)}}(k) = R_X(k) \quad (2)$$

则序列 X 被称为参数为 β 的精确自相似过程,其自相关系数 $H=1-\beta/2$ ($0.5 < H < 1$), H 值越接近于1,过程 X 的

自相似性越大。

自相似过程的最重要的特征之一是长程依赖性(long-range dependence), 从直观上看就是由不同的取样频率获得的时间序列在视觉上和统计上非常相似。这意味着变化的程度在不同的时间尺度上是相同的, 结团和突发特性在所有的时间尺度上都存在。

本文采用RMD-FGN方法来合成自相似业务量^[10]。首先利用随机中点置换法(Random Midpoint Displacement, RMD)来生产分形布朗运动(Fractional Brownian Motion, FBM)时间序列; 接着对FBM序列作一阶差分, 得到对应的分形高斯噪声(Fractional Gaussian Noise, FGN)序列, FGN序列是一个精确自相似过程; 最后根据网络业务量的特征参数合成自相似业务时间序列, 其实际意义代表单位时间内到达的连接数。该自相似业务模型有 3 个特征参数, 即 H , M 和 V , 其中 H 为自相似系数, M 为单位时间内到达的平均连接数, V 为单位时间内到达的连接数的方差。

分别用传统方法和RMD-FGN方法合成到达速率 $\lambda=10$ 的泊松业务序列和 $M=10, V=30, H=0.8$ 的自相似业务序列, 并对它们在不同单位时间(Unit time)采样, 如图 1 所示。图 1(a), 图 1(b)为泊松业务, 可以发现在高分辨率情况下(Unit time = 1s), 业务量具有一定的突发性, 但是当分辨率降低时(Unit time = 100s), 业务模式变得平坦起来, 直观上类似于白噪声。这是因为对于泊松业务量, 当 $m \rightarrow \infty$ 时, 其 m 重聚集时间序列的自相关函数 $R^{(m)}(k) \rightarrow 0$, 从而有白噪声一样的特征。图 1(c), 图 1(d)为自相似业务, 与泊松业务量不同, 业务量在不同的时间尺度都含有一定量的突发性, 结团不仅在短时间内存在, 而且在长时间内也没有平滑掉。这与式(2)不同时间尺度都有相同统计特性的含义是一致的, 表现出了自相似性。

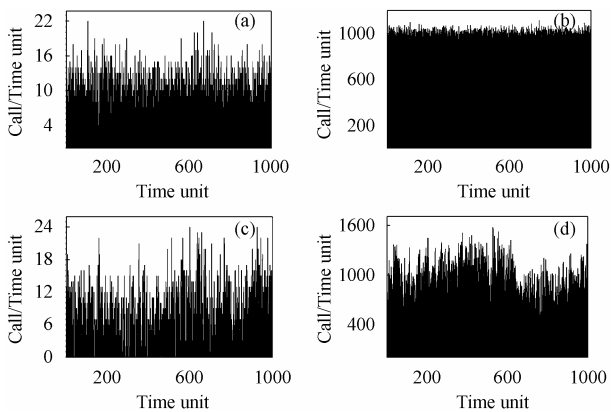


图 1 泊松和自相似业务量比较

- (a)泊松业务(Unit time=1s) (b)泊松业务(Unit time=100s)
(c)自相似业务(Unit time=1s) (d)自相似业务(Unit time=100s)

Fig.1 Comparison of Poisson traffic and Self-similar traffic

- (a) Poisson traffic (Unit time=1s)
(b) Poisson traffic (Unit time=100s)
(c) Self-similar traffic (Unit time=1s)
(d) Self-similar traffic (Unit time=100s)

图 2 为 $H=0.6, 0.8, 0.9$ 时利用 RMD-FGN 方法合成的自相似业务量的采样图($M=10, V=30, \text{Unit time}=1\text{s}$), 从图中可知, 随着 H 值增大, 业务量的波动频率变低。这是由于当 $0.5 < H < 1$ 时, 业务量具有正相关性, 当 H 变大时, 短时间内业务量增减方向不变的倾向增大, 自相似性也变大。由于图 1 和图 2 可知, 利用 RMD-FGN 方法合成的业务量具有很好的自相似性, 可以用于网络仿真。但是生成的自相似业务业务量只是业务轨迹, 即单位时间内到达的连接请求数, 而动态 RWA 仿真模型是基于事件驱动的, 故本文假设在单位时间内(Unit time = 1s)连接请求均匀到达, 从而生成仿真时所需要的连接请求到达间隔时间序列。

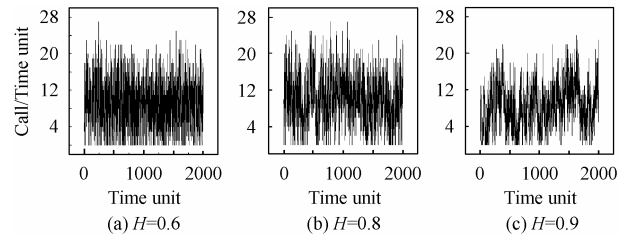


图 2 RMD-FGN 算法合成的自相似业务量(Unit time=1s)

Fig.2 Self-similar traffic based on RMD-FGN algorithm (Unit time=1s)

3 链路状态描述模型

考虑到全光波长转换器以及可调谐的光收发机技术还没成熟, 未大规模商用, 本文假设在 WDM 网络中没有配备两者。这意味着工作通道和保护通道必须使用相同的波长。

文献[3]提出了一种共享通道保护方法-完全信息恢复(Full Information Restoration, FIR)方法, 可以在较小的信令开销基础上达到较高的网络性能, 其中每条链路利用矩阵 $Failother(k)[i]$ 和 $Failself(k)[i]$ 存储链路 k 为了恢复故障链路 i 所需预留的带宽和链路 i 为了恢复经过故障链路 k 的所有工作通道所预留的带宽。但是不考虑波长变换时, WDM 网络中工作通道和其对应的保护通道中各链路工作波长必须相同, 而 $Failother(k)[i]$ 和 $Failself(k)[i]$ 仅存储链路带宽使用状态, 不记录每个带宽的工作波长, 故 RWA 时 FIR 方法不能解决波长连续性问题。为此, 本文在分层图(layered-graph)^[7]模型基础上提出了一种链路状态描述模型来记录无波长变换 WDM 网络波长使用状态。

设 WDM 光网络的拓扑为有向图 $G(V, E, W)$, 其中 V 代表网络节点集合, E 代表网络中链路集合, W 代表光纤中的可用波长数。使用分层图模型来描述网络中的波长资源: 网络拓扑 G 被复制成相同的 W 份, 每份都是一个分层图 $LG(V, E, i), 1 \leq i \leq W$ 。 $LG(V, E, i)$ 也就是波长层, 代表了波长 i 在网络各链路中的使用情况。由于各个波长层的信息是孤立的^[7], 所以增加一个公共的波长使用状态矩阵来记录每条链路的剩余空闲波长数。

对于波长为 i 的分层图 $LG(V, E, i)$, 采用基于邻接链表的有向图类数据结构。对于图中每条链路的状态, 使用以下

的 Edge 类结构记录:

```
class Edge
{
public:
    enum Color{FREE = 0, WORK, BACKUP};
    Color edgeColor;
    int sNode;
    int eNode;
    int Flag;
    double weight;
    double cost;
    set<int> flagSet;
};
```

其中 edgeColor 描述链路的使用状态, 可以是 FREE, WORK 及 BACKUP, 分别表示空闲状态、被工作通道占用及被保护通道占用; sNode 和 eNode 分别为链路的源宿节点索引; Flag 为链路不相关标记; weight 为链路的权重, 可以是跳数、链路距离等; cost 为链路的代价值, 用于在网络中寻找最短路径; flagSet 为使用该链路的保护通道各自对应的工作通道所经过的所有链路的不相关标记集合。与 FIR 方法相比, 利用分层图和链路状态描述模型可以详细记录链路中每个波长的使用情况, 当 RWA 时可以在同一个波长层寻找合适的工作和保护路由对, 从而消除了波长连续性限制条件。

为了满足共享通道保护条件, 设每个链路 e 的工作代价函数 $C_{\text{work}}(e)$ 和保护代价函数 $C_{\text{protection}}(e)$ 分别为^[5]

$$C_{\text{work}}(e) = \begin{cases} C_{\text{weight}}(e) + \varepsilon_1 \cdot (W - \lambda_{\text{free}}^e) \cdot C_{\text{weight}}(e), & \text{color}(e) = \text{FREE} \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{\text{protection}}(e) = \begin{cases} C_{\text{work}}(e), & \text{color}(e) = \text{FREE} \\ \varepsilon_2 \cdot C_{\text{weight}}(e), & \text{color}(e) = \text{BACKUP}, \\ & \text{Set}_{\text{backup}}(e) \cap \text{Set}_{\text{work}}(p) = \emptyset \\ +\infty, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)中 $C_{\text{work}}(e)$ 为链路 e 的权重, ε_1 为负载均衡系数(例如, 10^{-3}), W 为单纤波长数, λ_{free}^e 为链路 e 的剩余可用波长数, $\text{color}(e)$ 为链路 e 的状态。式(4)中 ε_2 为保护代价系数, 一般为很小的值, 例如 10^{-4} , $\text{Set}_{\text{backup}}(e)$ 代表经过链路 e 的保护通道各自所对应的工作通道经过的所有链路的不相关标记集合, $\text{Set}_{\text{work}}(p)$ 代表第一步选好的工作通道 p 经过的链路的不相关标记集合。

RWA算法采用最具代表性的两步通道选择方法^[3]: 首先在波长层中利用最短路径法(例如, Dijkstra法)计算一条工作代价最小的路径作为候选工作路径; 然后在工作路径所在的波长层选择一条保护代价最小的路径作为保护通道路径。波长选择采用首次命中。

4 仿真结果和讨论

采用上面提出的链路状态描述模型对 5×5 Mesh_Torus

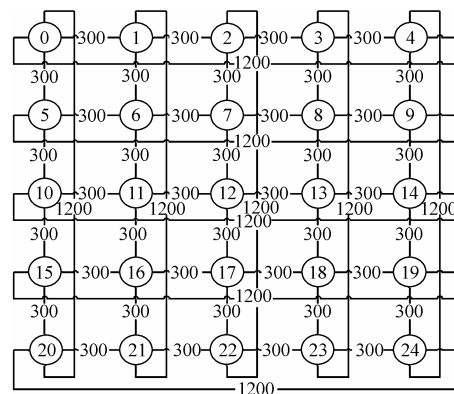


图 3 5×5 Mesh_Torus 拓扑

Fig.3 5×5 Mesh_Torus topology

网络拓扑结构(如图 3 所示)进行仿真实验。每个链路由两根相反方向的单向光纤组成。用距离作为链路权重。连接请求为由 RMD-FGN 方法生成的到达速率 $M=10$ 的自相似业务量。如果能够成功分配工作和保护通道对, 则连接的维持时间满足均值为 $1/\mu=20$ 的指数分布, 此时网络负载 ρ 为 $M/\mu=200$ 。同时假定所有的节点对间等概率地产生业务请求, 即均匀分布业务量。每次仿真都产生约 1.3×10^6 次业务请求。当业务请求到达时, 如果能够找到合适的工作和保护通道对, 则为该请求分配连接; 否则阻塞该请求。仿真实验研究不同的方差 V 、自相似系数 H 和单纤波长数 W 对连接请求阻塞率的影响。

图 4 给出了阻塞率随方差 V 和自相似系数 H 变化的曲线, 其中 $M=10$, Unit time = 1s, $W=16$ 。可以看出当方差 V 相同时, 随着 H 值的增加, 阻塞率变大。同时随方差 V 的增长, 也会提高网络的阻塞率。对于自相似业务, 它的 3 个特征参数分别有以下作用: 平均到达速率 M 决定了业务的“量”的性质, 即业务总量; 而方差 V 和自相似系数 H 则决定了业务的“质”的性质, 即业务量的突发程度, H 值越大, 业务的突发性越强, 网络的阻塞率越大, 网络的性能越差。与传统的到达速率 $\lambda=10$ 的泊松业务(此时方差 $V=\lambda=10$)相比, 当 $V=10, H=0.9$ 时, 自相似业务网络阻塞率显著变大。由图 4 可知, 传统的泊松模型不能准确地模拟网络中的真实业务量, 而 RBM-FGN 模型可以提供更详细的特征参数, 从而更加精确地评估网络性能。

图 5(a), 图 5(b)分别为当 $H=0.8$ 和 $V=30$ 时, 连接阻塞率随单纤波长数 W 变化的曲线。正如预期的那样, 随着 W 的

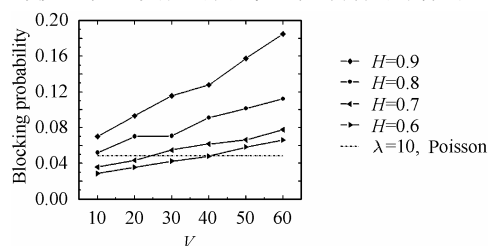
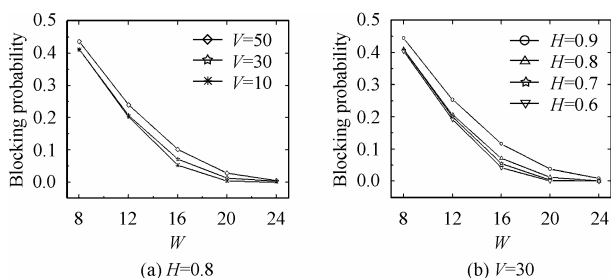


图 4 阻塞率与 H 、 V 关系

Fig.4 Blocking probability vs. H and V

图 5 阻塞率与 W 关系Fig.5 Blocking probability vs. W

增加, 阻塞率持续下降, 并且当 V 或 H 增大时, 连接的突发性增强, 阻塞率也变大。值得注意的是, 当 $W=24$ 时, 无论 V 或 H 增大, 阻塞率变化不大, 即突发度对网络性能影响并不明显, 这可能是因为此时阻塞率低于 0.01, 网络处于轻载状态, 阻塞的主要原因是找不到与工作通道匹配的保护通道, 即存在“保护陷阱”: 由于最短路径方法倾向于寻找代价最短的链路, 造成过度使用某些链路, 从而形成瓶颈。而如果工作路径能够避开这些链路, 反而可以更加容易地找到链路不相关的保护路径。

5 结束语

本文研究了自相似业务对共享通道保护 WDM 网络性能的影响。利用 RMD-FGN 方法合成自相似业务序列, 生成具有自相似性的连接请求到达间隔时间序列。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。对 5×5 Mesh_Torus 网络拓扑进行仿真。结果表明: 当自相似系数 H 或方差 V 变大时, 也就是说业务的突发程度变大时, 阻塞率变大, 网络的性能下降。增加单纤波长数 W , 也可以降低阻塞率, 提高网络性能。但是当波长数 W 较大, 阻塞率低于 0.01 时, 即使自相似系数 H 或方差 V 变大, 阻塞率变化也不大, 网络性能受业务量突发程度的影响不明显。

参 考 文 献

- [1] Xin C, Ye Y, Dixit S, et al.. A joint lightpath routing approach in survivable optical networks. *SPIE Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 13-20.
- [2] Yan S, Jue J P. Shared protection routing algorithm for optical networks. *SPIE Optical Networks Magazine*, 2002, 3(3): 32-39.

- [3] Li G, Wang D, Kalmanek C, et al.. Efficient distributed pathselection for shared restoration connections. *IEEE INFOCOM*, New York, 2002, 1: 140-149.
- [4] Ramamurthy S, Sahasrabudde L, Mukherjee B. Survivable WDM mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(4): 870-883.
- [5] Ou C, Zhang J, Zang H, et al.. New and improved approaches for shared-path protection in WDM mesh networks. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1223-1232.
- [6] Spath Jan. Dynamic routing and resource allocation in WDM transport networks. *Computer Networks*, 2000, 32(5): 519-538.
- [7] Chen Chien, Banerjee Subrata. A new model for optimal routing and wavelength assignment in wavelength division multiplexed optical networks. *IEEE INFOCOM*, San Francisco, 1996, 1: 164-171.
- [8] Stallings William. High-Speed Networks: TCP/IP and ATM Design Principles. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall Inc, 1998: 181-207.
- [9] Leland W E, Taqqu M S, Willinger W, et al.. On the self-similar nature of ethernet traffic (extend version). *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 1994, 2(1): 1-15.
- [10] Lau W C, Erramilli A, Wang J L, et al.. Self-similar traffic generation: The random midpoint displacement algorithm and its roperties. *IEEE International Conference on Communications*, Seattle, 1995, 1: 466-472.
- [11] Wang Yun, Zeng Qingji, Zhao Huandong. Dynamic blocking performance in WDM optical networks under self-similar traffic. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8): 933-935.
- [12] 薄明霞, 谢懿, 黄善国, 顾晓仪. 基于自相似业务的波长变换光网络性能分析. *光通信技术*, 2004, 28(11): 14-16.

葛晨晖: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为光网络的生存性技术.

黄晋竹: 男, 1981 年生, 硕士生, 研究方向为自动交换光网络.

孙小菡: 女, 1955 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光波电子学与光纤通讯.

张明德: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为光波电子学与光纤通讯.