

业务自相似性对光突发交换调度算法影响分析

王汝言^{①②} 吴大鹏^③ 隆克平^②

^①(重庆邮电大学通信与信息工程学院 重庆 400065)

^②(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

^③(北京邮电大学宽带通信网络实验室 北京 100876)

摘要: 使用泊松业务流模型对光突发交换网络进行性能分析不能准确地反映网络状态。该文从理论上对突发包长度进行了推导,对基于时间门限汇聚机制下突发包数据流自相似程度进行了计算机仿真测量,并利用自相似业务流模型对光突发交换网络中比较常用的 LAUC 和 LAUC-VF 调度算法进行了性能仿真。仿真结果表明:基于时间门限的汇聚机制能够有效地降低数据流自相似程度,数据流的自相似特性对 LAUC 算法的影响并不非常明显,但对 LAUC-VF 算法的性能则产生了比较严重的影响,其突发包丢失率较泊松流平均增加了近 3 个百分点。

关键词: 光突发交换; 自相似业务; 调度算法

中图分类号: TN915.63

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)08-1989-05

Performance Analysis of Scheduling Algorithm Based on Self-Similar Traffic in Optical Burst Switching Networks

Wang Ru-yan^{①②} Wu Da-peng^③ Long Ke-ping^②

^①(School of Communication and Information Engineering, Chongqing Univ. of Posts and Telecom., Chongqing 400065, China)

^②(School of Communication and Information Engineering, Univ. of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

^③(Broadband Communication Network Lab, Beijing Univ. of Posts and Telecom., Beijing 100876, China)

Abstract: Analysis on Optical Burst Switching(OBS)network performance based on the Poisson model would not be exactly. In this paper, the distribution of data burst length is researched, and it is simulated that the self-similarity of data burst traffic assembled by time-based mechanism, moreover, the performance of LAUC and LAUC-VF are shown in the simulations. Simulation and theoretical results show that the assembly mechanism based on time threshold can decrease the traffic's self-similarity, on the other hand, the influence of self-similarity on LAUC is small, but much greater on LAUC-VF whose burst drop probability will be decreased by 3 percent than Poisson stream.

Key words: Optical Burst Switching (OBS); Self-similar traffic; Scheduling algorithm

1 引言

光突发交换(Optical Burst Switching, OBS)^[1,2]结合了较大粒度的光电路交换和较细粒度的光分组交换两者的优点,并克服了两种交换方式的不足,因而受到业界的广泛关注^[3]。在 OBS 网络中,主要包括两种类型的节点,分别是边缘节点和核心节点,其中边缘节点主要完成突发包的汇聚、解汇聚相关功能,而核心节点则完成数据包的转发。边缘节点将来自传统 IP 网络的数据包按照目的地址和 QoS 参数进

行缓冲处理,然后根据不同的汇聚机制来完成突发包的汇聚过程,随后边缘节点将根据完成汇聚的突发包相关参数产生对应的控制分组,并立即沿信令链路将其转发到突发包对应的目的地,信令在链路上进行传输的同时,完成在整个信令链路上核心节点的资源预留;边缘节点在发送控制分组之后,再将突发包延迟偏移时间,最后在各节点根据控制分组建立的数据链路上发送突发包。显然,突发包长度的分布以及突发包之间的间隔分布等数据流特性将对 OBS 网络的阻塞概率、吞吐量以及延迟等方面产生重大的影响。

近来,研究人员通过对互联网数据流进行实际监测,揭示了网络中数据流的自相似特性。数据流呈现自相似特性主要是指无论按照任何时间尺度对数据流过程进行观察,数据流过程依然保持某种相同的特性^[4]。自相似过程的相关函数

2006-12-26 收到, 2007-07-06 改回

国家杰出青年科学基金项目(NSFDYS-60725104), 国家 973 计划项目(2007CB310706), 国家 863 计划项目(2007AA01Z246), 新世纪优秀人才支持计划, 重庆市科委项目(2005AC2089)和重庆市教委项目(KJ060508, KJ060513, KJ070513)资助课题

通常需要满足两个条件, 分别为: $r(k) = k^{-\beta} \times \text{const}$ 和 $r^m(k) = r(k)$, 式中 $0 < \beta < 1$, $k = 1, 2, \dots$, 其中 const 为一个常数。通常使用单一的数值 $H(0.5 < H < 1)$ 来描述数据流的自相似程度, 这个数值也称为 Hurst 参数, 其中参数 H 和 β 满足关系式 $H = 1 - \beta/2$ 。 H 数值越大表明自相似程度越高; 而传统的网络模型大多数是基于马尔可夫模型对流量到达过程和服务时间分布的假设, 分组和连接到达过程经常被假设为泊松过程, 这些都导致数据流模型呈现出短相关性。多个文献[3-5]表明数据流的自相似特性使得基于传统的泊松数据流模型分析的结果与实际网络情况相比出现较大的偏差, 但是这些研究都是针对传统 IP 网络进行, 而 OBS 网络中的基本交换单位是数据突发(Data Burst, DB), DB 由具有相同地址, 以及相同服务质量要求的 IP 分组组成。在 OBS 网络出口处, OBS 交换节点再将这些 DB 拆分成 IP 分组, 显然, OBS 网络的数据流特性与 IP 网络的数据流特性并不相同。本文将以前述 OBS 网络为研究对象, 考察数据流自相似特性对光突发交换网络核心节点调度算法的影响。

本文第 2 节在介绍常用汇聚机制基础上, 分析汇聚机制对数据流自相似特性的影响, 并且对突发包的统计特性进行推导, 以便从理论上对汇聚机制所产生的影响进行分析; 在第 3 节, 采用自相似数据流作为 OBS 网络的输入数据流, 利用计算机仿真的方式对核心节点的调度算法性能进行模拟。最后是结束语。

2 突发包统计特性分析

2.1 突发包汇聚机制

在光突发交换网络中, 由于突发包的汇聚机制决定了经过汇聚过程之后的突发包数据流特性, 所以突发包汇聚机制在 OBS 网络中显得十分重要。

如前所述, 边缘节点汇聚模块负责将传统 IP 网络的数据包聚合为突发包。当汇聚过程开始的时候, 边缘节点根据预先设定的规则对当前进行汇聚的突发包进行条件检测, 如果当前汇聚的突发包达到了预先设定的某个类型的门限值, 例如: 突发包长度、汇聚时间等, 则边缘节点首先将该突发包对应的控制分组按照下一跳地址转发到核心网络用以配置核心节点交换矩阵, 进而为突发包预留资源, 在偏移适当的时间(offset time)之后, 边缘节点再将突发包转发到核心网络进行传输。

根据边缘节点使用的不同规则, 所产生的突发包长度分布和突发包时间间隔分布都不相同。当前使用的比较广泛的汇聚机制主要有 3 种^[6-9], 他们分别为基于时间门限的汇聚机制、基于突发包长度门限的汇聚机制和混合门限汇聚机制, 其中前面两种汇聚机制在一定程度上可以近似为混合门限汇聚机制的特殊情况, 当混合门限汇聚机制中的时间门限值比较大的时候, 混合门限汇聚机制相当于基于突发包长度门限汇聚机制; 同样地, 当混合门限汇聚机制中的分组长度

门限设置的比较大的时候, 混合门限汇聚机制相当于基于时间门限汇聚机制。

2.2 突发包长度分布

文献[10,11]已经从不同的角度表明, 基于时间的汇聚机制能够有效地降低输出 OBS 网络数据流的自相似程度, 也就是说降低数据流的 H 值。本文只对基于时间门限汇聚机制下的突发包长度分布进行讨论。在基于时间门限的汇聚机制中, 当第一个来自传统网络的 IP 数据包到达边缘节点的时候, 突发包汇聚过程则随之启动。假设时间门限设定为 T 个时间单位, 这样当汇聚过程持续 T 个时间单位之后, 边缘节点将进行突发包处理等控制过程, 按照上面的步骤对到达边缘节点的数据包循环处理。

假设汇聚过程在第一个数据包到来之后的 T 个时间单位内共有 $N-1$ 个数据包到达, 可以将除了第一个 IP 数据包之外的其他数据包到达过程假设为二项分布。由于非负整数离散型随机变量的概率母函数可以确定该变量的概率分布, 在这里, 我们利用二项分布的概率母函数可以得到突发包内的 IP 数据包数量, 其中 p 为该 IP 分组的到达概率, $q = 1 - p$ 表示在该时刻没有 IP 分组到达的概率

$$G(s) = \sum_{k=1}^n C_{n-1}^{k-1} \times p^{k-1} \times q^{n-k} \times s^k \quad (1)$$

令 $t = k - 1$, 这样, 式(1)为

$$\begin{aligned} G(s) &= \sum_{t=0}^{n-1} C_{n-1}^t \times p^t \times q^{n-t-1} \times s^{t+1} \\ &= s \sum_{t=0}^{n-1} C_{n-1}^t \times p^t \times q^{n-t-1} \times s^t \\ &= s(q + s \times p)^{n-1} \end{aligned} \quad (2)$$

由上述推导可知, 在 T 个时间单位的汇聚过程持续期间, 每个突发包中所包含的 IP 数据包数量的概率母函数为:

$$N(s) = s(q + s \times p)^T = s(1 - p + s \times p)^T \quad (3)$$

另外, 假设到达边缘节点的数据包之间长度分布独立并且相同, 这样, 就可以从上面的公式得到突发包长度的概率母函数:

$$B(s) = N(P(s)) = P(s)(1 - p + p \times P(s))^T \quad (4)$$

其中 $P(s)$ 为 IP 分组长度的概率母函数, 可以表示为

$$P(s) = E[s^{P_k}] = \sum_{n=1}^K s^n P_r[P_k = n]。$$

在 $P(s)$ 的表达式中, $P_r[P_k = n]$ 为 IP 分组长度的分布函数。

根据突发包长度的概率母函数我们可以得到突发包长度的均值:

$$E[B] = E[P(s)] \times E[N(s)] = E[P] \times (1 + p \times T) \quad (5)$$

从上面的关于突发包长度的一阶矩公式中可以清楚地看出, 当汇聚时间门限 T 增加的时候, 突发包长度的均值也随之增加; 但是突发包长度同时还受到 IP 数据包的长度均值的影响, 然而在采用泊松数据流模型的时候, 突发包长度

的分布并不会随着 IP 数据包长度的变化而变化, 这样当使用泊松数据流模型对网络性能进行评估的时候, 所得到的结果并不能够真实的反映网络状态。

为了能够更加明确突发包长度对网络性能的影响, 将突发包按照两个长度门限(40kB, 80kB)范围划分为 3 个类别, 分别为小长度分组(Small Size Burst, SSB), 中等长度分组(Medium Size Burst, MSB)以及大长度分组(Large Size Burst, LSB)。本文采用 ON/OFF 数据源模型产生自相似数据流, 用来模拟到达 OBS 网络边缘节点的传统 IP 网络数据流。由于计算机硬件的条件限制, 将 ON/OFF 数据源的数量设置为 30, 同时设定到达 OBS 网络边缘节点的数据流 H 参数为 0.9。

当汇聚时间门限为 $100\mu\text{s}$ 的时候, 不同长度类型的突发包在所有突发包中所占的比例如图 1 所示。

从图 1 可以看出这种情况下的突发包大部分为 LSB, 当网络负载超过 0.6 之后, LSB 在所有突发包中所占的比例基本上稳定在 85% 左右。

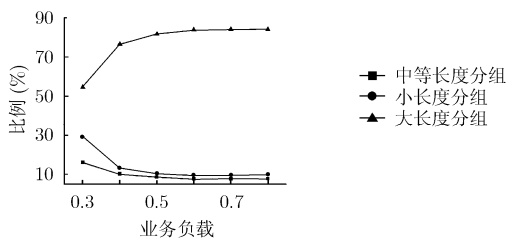


图 1 汇聚时间门限为 $100\mu\text{s}$ 时候的突发包长度分布图

假设原有的设定均不变, 将汇聚时间门限设定为 $150\mu\text{s}$ 的时候, 不同长度类型的突发包在所有突发包中所占的比例如图 2 所示。从图 2 可以看出, LSB 基本上占所有突发包的 90%, 而其它类型分组的总和仅在 10% 左右。

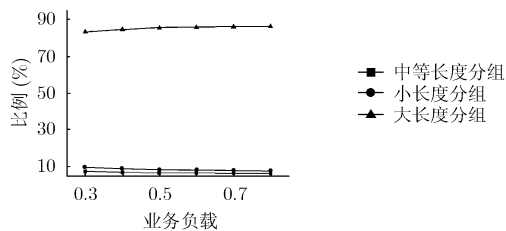


图 2 汇聚时间门限为 $150\mu\text{s}$ 时候的突发包长度分布图

通过仿真结果可知, 当汇聚时间门限上升的时候, 无论网络负载的情况如何, 突发包长度分布中, LSB 所占的比例也随之上升。根据重尾分布的相关表达式可以知道当这种情况出现的时候, 表示自相似程度的参数 β 上升, 也就是说 H 参数下降, 这就表明经过汇聚之后的突发包数据流降低了原来的 IP 数据流的自相似程度, 而且当汇聚时间门限增加的

时候, 汇聚之后的突发包数据流自相似程度也随之降低。

为了能够准确地分析基于汇聚时间门限的汇聚机制对数据流自相似特性的影响, 本文分别对网络负载为 0.3, 0.5, 0.8 3 种情况下, 网络采用两种汇聚门限情况下的突发包数据流自相似程度进行测量, 其中 $T_1=100\mu\text{s}$, $T_2=150\mu\text{s}$, 所得到的结果如表 1 所示。

表 1 基于时间门限汇聚机制性能

链路负载	汇聚前的 H 值	汇聚门限为 T_1 的 H 值	汇聚门限为 T_2 的 H 值
0.3	0.9	0.59	0.56
0.5	0.9	0.60	0.56
0.8	0.9	0.63	0.58

通过仿真所得到的结果表明, 在汇聚时间 $T_1=100\mu\text{s}$ 和 $T_2=150\mu\text{s}$ 时, 无论是低负载还是高负载情况下, 汇聚后的突发包数据流的 H 参数相对汇聚前的 H 参数有较大幅度的减小, 并且随着汇聚时间门限的提高, H 值将降低。因此基于时间门限的汇聚机制能够有效地降低数据流自相似程度, 这个结论与本文前面的理论分析结果相一致。

3 自相似数据流对调度算法的影响

这一节将对 OBS 网络中 LAUC^[12]和 LAUC-VF^[13]算法性能进行仿真分析, 以衡量自相似数据流对 OBS 网络的影响。

LAUC(Latest Available Unscheduled Channel)是典型的无空闲填充算法, 该算法是通过为每个到达的 DB 选择最快可获得空闲数据信道来最小化输出延迟。LAUC 的主要优点是只考虑每个信道的空闲时间, 操作简单; 缺点是信道的利用率不高, DB 之间的空闲间隔浪费了。LAUC-VF (Latest Available Unscheduled Channel with Void Filling)是空闲填充类调度算法的一个典型代表, 该算法除了空闲的时间间隔可以被新到达的 DB 填充外, 与 LAUC 算法基本相似。它能为新到达突发选择一个最近可用且没有被其它突发预留的数据信道, 并尽可能地减少信道上的预留空隙。LAUC-VF 保持信道上所有空闲时间间隔的信息, 它可以利用空闲的时间间隔来安排新的 DB。因此, LAUC-VF 可以比 LAUC 更有效的利用网络带宽, 同时降低了 DB 的丢失率, 但是 LAUC-VF 比 LAUC 的运行时间长, 特别是当信道的空闲时间间隔很多的时候; 此外, 当一个链路的信道数目很大时, 按照 LAUC-VF 算法为新 DB 搜索合理的空闲信道所花费的时间, 将会超出该 DB 的偏置时间, 最终导致资源预留失败。

在计算机仿真过程中, 我们使用 14 个节点 NSFNET 作为拓扑模型, 假设任意节点之间相连接的光纤数量为 2, 每

个光纤中包含 8 个波长，同时每个波长的链路速率为 10Gbps。

当采用 LAUC 调度算法的时候，交换节点只保存信道未调度时间参数，当控制分组到达交换节点的时候，交换节点将根据控制分组对应的数据突发到达时间为其选择合适的信道对突发包进行调度。其具体性能情况如图 3 所示。

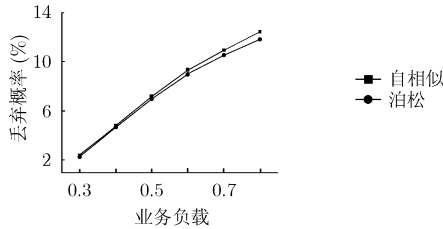


图 3 不同模型下 LAUC 调度算法突发包丢弃概率对比

从图 3 中可以看出，在网络负载比较高的时候，采用自相似数据流模型进行分析所得到的丢弃概率略高于采用泊松数据流模型分析所得到的结果，但是无论采用泊松数据流模型还是自相似数据流模型，网络丢弃概率整体上差别不大。由于 LAUC 调度算法并不对突发包长度进行衡量，所以，当网络负载比较小的时候，核心节点通常有足够的波长对这两种数据流情况下所产生的分组进行调度；随着网络负载的上升，由于突发包数据流具有突发性，这样在突发时间内，所产生的突发包数量大于泊松模型在该时间段内所产生的分组数量，这就导致，当使用自相似数据流模型对网络性能进行分析的时候，所得到的网络分组丢弃概率相比较采用泊松模型进行分析的时候略有上升，但是上升幅度非常小。

当采用 LAUC-VF 这种调度算法的时候，交换节点不但要保存信道未使用时间参数，而且还要保持信道上的空闲时间间隙。当控制分组到达的时候，交换节点根据相应的突发包长度来在不同的信道上选择合适的空隙对数据突发进行调度，通过这个方式，OBS 的信道利用率得到了提高，同时分组丢弃率也明显的下降。其具体性能情况如图 4 所示。

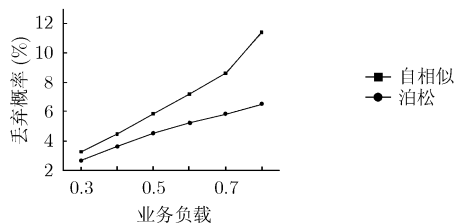


图 4 不同模型下 LAUC-VF 调度算法突发包丢弃概率

从图 4 中可以看出，当采用自相似数据流模型的时候，随着网络负载的不断上升，OBS 网络中核心节点的丢弃概率将有明显的上升。这主要是因为核心节点处的数据流为多个数据流的聚合过程，如第 2 节所述，突发包长度分布主要

由 IP 分组长度分布以及汇聚时间长度两个因素决定，显然来自不同节点的突发包的长度分布并不相同，对于不同的突发数据流来说，其突发包之间的间隙长度分布也必定不同。这样，如果当突发包长度 (L) 大于信道上的空闲长度 (L_{void}) 均值的概率比较大的时候，交换节点将对所有信道上的空隙进行遍历之后，最终无法为突发包找到合适的信道，也就导致突发包出现丢弃的情况。而当采用泊松数据流模型的时候，突发包长度分布只与汇聚时间和当前的链路负载相关，这样在汇聚时间给定，链路负载相同的时候，每个支路所得到的突发包长度分布必定为同一个分布，可以认为，使用泊松模型进行网络性能分析的时候，简化了突发包长度分布的复杂性，使得在这种数据流模型情况下的网络实际性能出现了比较大的偏差。

4 结束语

通过计算机仿真以及理论分析，我们可知基于时间门限的汇聚机制能够有效地降低到达 OBS 网络边缘节点的数据流自相似程度以及汇聚过程对数据流特性产生这种影响的原因。当分别采用泊松数据流模型和自相似数据流模型对 OBS 网络核心节点调度算法 LAUC 进行性能分析的时候，所得到的结果基本上相同；而当对 OBS 网络中另外一个重要的调度算法 LAUC-VF 进行性能分析的时候，所得到的结果将出现比较大的偏差，并且这种偏差随着网络负载的上升而逐渐增加，可以说采用泊松数据流模型的时候所得到的结果是过于优化的结果。

参考文献

- [1] Qiao C and Yoo M. Optical burst switching—A new paradigm for an optical internet. *Journal of High Speed Networks*, 1999, 8(1): 69–84.
- [2] Yoo M, Jeong M, and Qiao C. A high speed protocol for bursty traffic in optical networks. *SPIE*, 1997, 3230: 79–90.
- [3] Pitts J M, Schormans J A, and Woolf M, *et al.* End to end performance in real time IP networks with self-similar behavior. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2002, vol.4: 4044–4047.
- [4] Paxson V and Floyd S. Wide area traffic: the failure of Poisson modeling. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1995, 3(3): 226–244.
- [5] Leland W E, Taqqu M S, and Willinger W, *et al.* On the self-similar nature of Ethernet traffic. *IEEE-ACM Trans. on Networking*, 1994, 2(1): 1–15.
- [6] Qiao C. Labeled optical burst switching for IP and WDM integration. *IEEE Communications Magazine*, 2000, 38(9): 104–114.
- [7] Cao X, Li J, and Chen Y, *et al.* Assembling TCP/IP packets in optical burst switched networks. *Proceedings of IEEE*

- GLOBECOM 2002, Taipei, Taiwan, 2002, Vol.3: 2808-2812.
- [8] Vokkarane V M, Haridoss K, and Jue J P. Threshold-based burst assembly policies for QoS support in optical burst-switched networks. *SPIE*, 2002, 4874: 125-136.
- [9] Vokkarane V M and Jue J P. Prioritized burst segmentation and composite burst-assembly techniques for QoS support in optical burst-switched networks. *IEEE JSAC*, 2003, 21(7): 1198-1209.
- [10] Hu G, Dolzer K, and Gauger C. Does burst assembly really reduce the self-similarity. Proceedings of OFC2003, Atlanta America, 2003, vol.86: 124-126.
- [11] Ge An, Callegati F, and Tamil S. On optical burst switching and self-similar traffic. *IEEE Communications Letters*, 2000, 4(3): 98-100.
- [12] Xu J, Qiao C, and Li J, *et al.* Efficient channel scheduling algorithms in optical burst switched networks. Proceedings of INFOCOMM2003, Shanghai China, 2003, Vol.3: 2268-2278.
- [13] Yang M and Zheng S Q. A QoS supporting scheduling algorithm for optical burst switching DWDM networks. Proceedings of GLOBECOM2001, San Francisco, America, 2001, Vol.1: 86-91.
- 王汝言: 男, 1969年生, 博士生, 教授, 研究方向为光突发交换技术、多媒体信息处理.
- 吴大鹏: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为宽带通信网.
- 隆克平: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为互联网服务质量(Internet QoS)实现机制及TCP性能分析、宽带网络生存性及恢复算法、下一代光互联网结构、光突发交换技术及光网络模型.