

# 光分组组装机对自相似流的整形效应分析\*

潘勇 叶培大

(北京邮电大学光通信中心,北京 100876)

**摘要** 通过系统仿真和数值分析,全面地分析了光分组交换网中分组组装机对自相似流的整形效应,结果表明:光分组组装机通过改善流量的关键特性,包括:自相似性、短程相关性和边缘分布,来实现自相似流量整形.而且,业务强度越小、光分组组装机门限越大、组装机时间间隔越小,光分组组装机对自相似流的整形效果越好.

**关键词** 自相似流量;光分组交换;光分组组装机;流量整形

**中图分类号** TN909.5      **文献标识码** A

## 0 引言

光分组交换技术(OPS)由于具有高速率、对数据速率和格式透明、灵活以及可重构等特点,将成为构建未来光因特网的主流技术之一.但与传统分组交换网中的情况类似,自相似流对光分组交换系统的负面影响已被证实<sup>[1]</sup>.尤其是在采用变长光分组的异步 OPS 网络中,自相似流将导致节点丢包率迅速恶化,即使大量增加光缓存也难以获得满意的排队性能<sup>[2,3]</sup>.目前,利用 OPS 网络边缘处的光分组组装机来实现流量整形被认为是消除自相似流负面影响的一种有效手段,其对异步 OPS 网络性能的改善作用已被证实<sup>[4]</sup>.在早期的工作中,人们仅限于研究光分组组装机对流量自相似性的平滑作用<sup>[5-7]</sup>.近来已有文献证实:流量的自相似性、短程相关性(short-term correlation)和边缘分布(marginal distribution)都是影响排队性能的关键因素,流量的自相似性和短程相关性越强、边缘分布曲线的拖尾越重,则排队性能越差.具体来说,对有限深度的排队系统,排队性能由短程相关性和边缘分布决定;随着队列深度的增加,流量过程的自相似性才逐渐成为决定排队性能的主要因素<sup>[8]</sup>.考虑到在 OPS 网络中,交换节点通常利用有限深度的光纤延时线(FDL)解决资源竞争,并将增加 FDL 的深度作为改善系统丢包率的主要手段,所以我们认为:流量的边缘分布、短程相关性和自相似性都是决定 OPS 网络性能的关键因素,研究光分组组装机对自相似流的整形效应必须全面地分析组装机对它们的影响.

本文引入混合门限光分组组装机算法,并通过对组装机过程的建模和仿真,全面地分析了该算法对上

述流量特性的整形作用.除用 Hurst 参数度量流量的自相似性外,我们分别采用流量到达过程的加权平均自相关函数和方差来量化自相似流的短程相关性和边缘分布.

## 1 光分组组装机过程建模

由于缺乏实用化的光逻辑器件,OPS 系统目前一般采用电控光交换的方式实现,因此设计 OPS 系统所面临的一个重要问题是如何匹配高速的光传输速率与电控单元相对较低的处理速度.在 OPS 网络边缘处的光分组组装机将多个 IP 分组组装机成为一个较大的光分组进行传送,从而有效地减轻了电控单元的处理负担,提高了网络的吞吐量.一个简化的 OPS 网络结构如图 1 所示,网络由 OPS 核心网和边缘路由器构成,边缘路由器通过 WDM 链路(Core Network)与核心网相连,为业务层提供传统接口,并实现光分组拆装机.入口处的边缘路由器首先根据输入 IP 分组的转发等价类(FEC)和 QoS 对其进行分类,然后将其送入相应的组装机队列缓存;在组装机队列中,特定的组装机算法被用来控制光分组的产生;最后,光

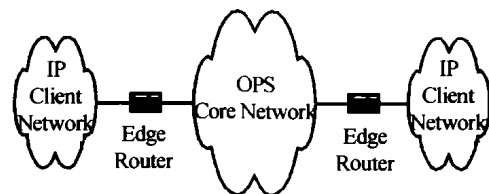


图 1 简化的 OPS 网络结构  
Fig. 1 The simplified OPS network architecture

分组将被缓存于发送队列,等候传送到核心网络.当光分组穿过 OPS 网络后,出口处的边缘路由器将执行反向的分组拆装机过程,以便取出 IP 包,将其转发到位于业务网络中的下一跳 IP 路由器.

在异步 OPS 系统中,长度门限算法和计时门限算法是两类基本的光分组组装机算法.对前者而言,当某一组装机队列中缓存的字节数量达到预设门限时,一个光分组将被产生.对后者而言,当第一个

\*国家自然科学基金项目(60372100)、高校博士科研基金项目(20030013004)

Tel:010-64179074 Email:ovila@263.net

收稿日期:2003-11-06

IP 分组到达某一空队列时,该队列的计时器开始计时;当计时时间到达预设门限时,一个光分组将被产生. 本文介绍一种同时基于长度门限和计时门限的混合组装算法:我们首先为光分组设定一个最大净荷长度(MPS),一旦某队列中缓存的字节数量达到这一门限,一个光分组将被产生;同时,为了限制组装时延,我们为每一个组装队列设定一个计时门限  $T_{out}$ . 一旦计时器溢出,无论队列中的数据是否到达组装门限,组装算法都将产生一个光分组. 该算法可被描述如下:

设网络中有  $N$  个转发等价类别(FEC)和  $M$  个 QoS 等级,则每个边缘路由器均需要  $N * M$  个组装队列储存输入的 IP 分组. 令  $q(t)$  表示组装队列  $t$  ( $1 \leq t \leq N * M$ ) 当前所存储的字节数,  $t(i)$  代表队列  $t$  的计时器.

1) 当一个长度为  $b$  字节的 IP 分组进入组装队列  $i$ :

```

if ( $q(t) = 0$ )
    {  $q(t) = b$ ; // 当前队列长度为  $b$ 
       $t(i) = 0$ ; // 计时器开始计时
    }
else if ( $q(t) + b \geq MPS$ )
    { 产生一个净荷长度为  $q(t)$  的光分组;
       $q(t) = b$ ; // 当前队列长度为  $b$ 
       $t(i) = 0$ ; // 计时器开始计时
    }
else
    {  $q(t) = q(t) + b$ ;
      if ( $MPS - q(t) < 44$ ) // IP 分组的长度  $\geq 44$  bytes
        { 产生净荷长度为  $q(t)$  的光分组;
          清除组装计时器;
        }
    }

```

2) 若  $t(i)$  的值等于组装计时门限  $T_{out}$   
 { 立即产生一个光分组,其净荷长度为当前队列长度  $q(t)$ ;  
 $q(t) = 0$ ;

## 2 仿真结果和讨论

### 2.1 仿真方案

OPS 边缘路由器的仿真模型如图 2 所示,输入 IP 流首先进入光分组组装器,组装算法按如上过程产生光分组,并将其缓存在发送队列中等候送往核心网. 我们通过分析和比较输入 IP 流和输出光分组流的关键流量特性来研究混合组装算法对自相似

流的整形效应.

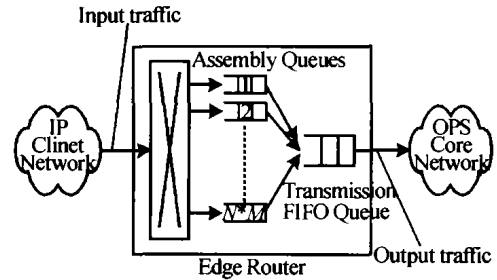


图 2 边缘路由器的仿真模型

Fig. 2 The simulation model of OPS edge router

仿真配置如下:

1) 假设 OPS 网络仅有 5 个边缘路由器 ( $N = 5$ ) 和一个 QoS 等级 ( $M = 1$ ),且 IP 分组的地址在 1~5 中满足一致性分布.

2) 边缘路由器的接收器和发送器均工作于 2.5 Gb/s. 为确定流量负荷对整形效应的影响,我们共研究边缘路由器的流量负载  $\rho = 0.8$  (重负荷)、0.5 (中等负荷) 和 0.3 (轻负荷) 等三种情况.

3) 采用 Sup-FRP (The Superposition of the Fractal Renewal Point Process) 自相似流量模型作为边缘路由器的输入流量源<sup>[9]</sup>. Sup-FRP 流量模型需要设定 3 个参数: Hurst 参数决定流量自相似性的强弱,在仿真中取值为 0.8; 无规则呈现时间 (Fractal Onset Time) 决定流量过程展现自相似性的时间规模,这里取值为 100  $\mu$ s; 平均发包率 (Average Packet Rate) 定义了单位时间内产生分组的数量,对应流量负荷  $\rho$  为 0.8、0.5 和 0.3,分别取值为 665780 packets/s、416120 packets/s 和 249670 packets/s.

4) IP 分组的长度分布借用文献[3]中的结果,这里限定 IP 分组的最大长度为 1500 bytes ( $L_{max} = 1500$  bytes).

5) 对组装算法,  $s = MPS / L_{max}$  表示归一化的组装门限,其值等于组装门限除以 IP 分组的最大长度,这里取值为 2、3 和 4;  $t = T_{out} / d$  表示归一化的组装计时门限,其值等于组装计时门限除以光分组平均组装时间,这里取值为 1、1.5、2、2.5 和 3.

### 2.2 自相似性

自相似结构具有长程相关性 (long-range dependence) 是自相似流的一个显著特征,所以一般将自相关函数满足以下表达式的流量过程称为自相似流

$$r(k) \sim k^{-(2-2H)} L_1(k), k \rightarrow +\infty \quad (1)$$

$L_1(k) > 0$  是无穷远处的慢变化函数,  $0.5 < H < 1$ .  $H$  指 Hurst 参数,是自相似性强弱的度量, Hurst 参数越大表示流量的自相关性越强.

为了准确地分析组装算法对流量自相似性的影响,我们采用小波算法 (wavelet-based Hurst

estimator) 来估计 Hurst 参数<sup>[10]</sup>. 在目前所采用的各类估计算法中,小波算法由于其特有的精确性和高效率而受到了广泛重视. 表 1 给出了在不同流量负荷下输入流量的 Hurst 参数估算值,其验证了 Sup-FRP 流量模型和 Hurst 参数估算器的可靠性.

表 1 不同负载下输入 IP 流的 Hurst 参数估算值

$\rho$	0.8	0.5	0.3
Hurst	0.807	0.801	0.794

表 2~4 是不同配置下输出流量的 Hurst 参数估算值. 由表可见,与输入流量相比,输出流量的 Hurst 参数明显减小,这证实光分组组装机制确能减小输入 IP 流的自相似性. 仿真结果同时说明:组装门限越大,光分组组装过程对自相似性的改善越好. 事实上,越大的组装门限意味着越长的平均组装时延. 因此,在实际设计光分组组装算法时,通常需要折中考虑增加组装门限带来的“增益”以及由此附加的组装时延. 另外,若组装参数一定,减小流量负荷也将有利于改善输出流量的自相似性. 这表明:在 OPS 系统中,增加交换节点的吞吐量(如增加输出波长的数量)将是消除自相似流负面效应的一个有效手段. 最后,若流量负荷和组装门限一定,则归一化计时门限  $t=1$  时输出流量的 Hurst 参数最小,但增加  $t$  值并不能进一步减小输入流量的自相似性.

表 2  $\rho=0.8$  时输出光分组流的 Hurst 参数估算值

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	0.77	0.785	0.786	0.785	0.784
3	0.73	0.76	0.759	0.76	0.76
4	0.729	0.745	0.747	0.747	0.746

表 3  $\rho=0.5$  时输出光分组流的 Hurst 参数估算值

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	0.725	0.737	0.743	0.742	0.742
3	0.711	0.725	0.729	0.727	0.726
4	0.709	0.722	0.724	0.725	0.725

表 4  $\rho=0.3$  时输出光分组流的 Hurst 参数估算值

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	0.714	0.724	0.724	0.723	0.723
3	0.685	0.713	0.714	0.715	0.715
4	0.683	0.701	0.702	0.703	0.703

### 2.3 短程相关性

由于流量过程的自相关函数  $r(k)$  不是一个量化值,所以我们采用加权平均自相关函数 WAACF (Weighted average autocorrelation correlation function) 来研究组装算法对输入流量的短程相关性的整形作用. WAACF 的定义如下

$$WAACF(n) = \frac{\sum_{k=1}^n (n-k+1) \times r(k)}{\sum_{k=1}^n K} \quad (2)$$

根据式(2),WAACF( $n$ )是自相关函数  $r(k)$  的加权平均值. 由于相关间隔  $k$  与权值呈反比,即  $k$  值越大,其对应的权值越小,因此 WAACF( $n$ ) 是  $k \in [1, n | n \rightarrow \text{finite}]$  内自相关性,即短程相关性,的量化度量. 当  $n$  一定时,WAACF 越小表示流量的短程相关性越弱. 本文中,我们取  $n=100$ .

表 5 给出了输入流量的 WAACF(100) 值,表 6~8 总结了在不同组装参数下输出流量的 WAACF(100) 值. 由此可见,输出流量均有较小的 WAACF(100) 值,这证实了光分组组装机制对自相似流量的短程相关性的平滑作用. 同样的,仿真结果揭示:减小流量负荷有利于减小流量的短程相关性.

表 5 不同流量负载下输入 IP 流的 WAACF(100)

$\rho$	0.8	0.5	0.3
WAACF(100)	0.1406	0.1248	0.1003

表 6  $\rho=0.8$  时输出光分组流的 WAACF(100)

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	0.113	0.121	0.122	0.122	0.122
3	0.104	0.115	0.117	0.117	0.117
4	0.091	0.107	0.109	0.109	0.109

表 7  $\rho=0.5$  时输出光分组流的 WAACF(100)

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	0.081	0.084	0.086	0.086	0.086
3	0.063	0.077	0.077	0.077	0.078
4	0.059	0.065	0.067	0.067	0.068

表 8  $\rho=0.3$  时输出光分组流的 WAACF(100)

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	0.059	0.064	0.065	0.065	0.065
3	0.046	0.051	0.052	0.053	0.053
4	0.029	0.038	0.040	0.040	0.040

图 3 给出了  $\rho=0.8$  时组装参数对整形效果的影响. 如图所示,组装门限与输出流量的 WAACF(100) 值成反比,组装门限越大,输出流量的短程相关性越弱. 若组装门限一定,则当  $t=1$  时输出流量的 WAACF(100) 值最小,但增加  $t$  并不能有效改善组装过程对短程相关结构的平滑作用.

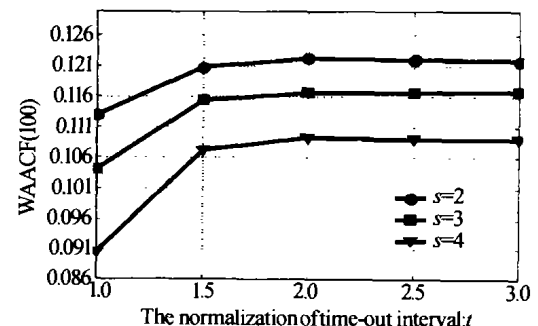


图 3  $\rho=0.8$  时组装门限对输出光分组流加权平均自相关函数的影响

Fig. 3 WAACF of the output traffic under various  $s$  for  $\rho=0.8$

### 2.4 边缘分布

根据中心极限定理 (Central Limit Theorem), Sup-FRP 自相似流的边缘分布近似于 Gaussian 函数<sup>[11]</sup>, 故采用流量过程的方差作为其边缘分布的量化度量. 图 4 给出了  $\rho=0.8$  时, 不同组装门限下输入输出流量的边缘分布曲线. 为便于比较, 我们以输入流量为基准, 对输出流量的边缘分布进行了归一化处理. 如图所示, 输出流量的边缘分布曲线的拖尾迅速减轻, 这证明了基于混合门限的光分组组装过程能够有效地平滑输入自相似流的边缘分布.

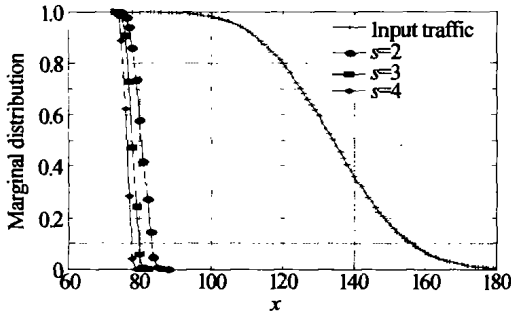


图 4  $\rho=0.8$  时组装门限对流量边缘分布的影响  
Fig. 4 The marginal distribution of input/output traffic under various  $s$  for  $\rho=0.8$

表 9 ~ 12 给出了不同参数下输入、输出流量过程的方差. 如此可见, 自相似流量的边缘分布对分组组装机制非常“敏感”, 与输入流量相比, 输出流量的方差几乎减小一个数量级. 另外, 增加组装门限能进一步平滑输出流量的边缘分布, 但减小系统负载或组装门限对边缘分布的整形效果影响较小.

表 9 不同流量负荷下输入流量过程的方差

$\rho$	0.8	0.5	0.3
$\rho$	0.8	0.5	0.3
Variance	76	60	43

表 10  $\rho=0.8$  时输出流量过程的方差

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	9	9	9.5	10	10
3	5.5	6	6	6	6
4	4.5	5	5	5	5

表 11  $\rho=0.5$  时输出流量过程的方差

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	9.5	10	11	11	11
3	7	7.5	8	8	8
4	6	6.5	6.5	6.5	6.5

表 12  $\rho=0.3$  时输出流量过程的方差

$s \backslash t$	1	1.5	2	2.5	3
2	8	8.5	9.5	9.5	9.5
3	6	6	6.5	7	7
4	4.5	4.5	4.5	5	5

### 3 结论

本文重点分析了光分组组装机制对自相似流的

整形效应. 通过系统仿真和数值分析, 得到三个结论:

1) 光分组组装机制通过改善自相似流影响 OPS 系统性能的三个关键特性, 即自相似性、短程相关性和边缘分布, 来实现流量整形. 由于光分组组装过程减小了输入 IP 流的自相似性, 使其突发性得到了平滑, 所以只要采用了合适的光分组组装算法, 异步 OPS 交换节点就能够利用常规的冲突解决手段 (波长变换、偏射路由和光缓存) 来有效地解决光分组间的资源竞争, 并且可通过增加光缓存的深度来改善系统性能.

2) 当组装算法采用较大的组装门限和较小的计时门限时, 可得到更好的自相似流量整形效果. 但在实际应用中, 为了限制分组组装产生的附加延时, 一般需要折中考虑组装门限和相应的组装时延.

3) 减小边缘路由器的流量负荷将获得更好的整形效果, 这表明增加节点的吞吐量将是异步 OPS 系统克服自相似流量负面影响的一个有效手段.

### 参考文献

- 1 He J J, Simeonidou D. Contention resolution in optical packet-switching networks: under long-range dependent traffic. *Proceeding of OFC' 2000*, 2000, 3: 295 ~ 297
- 2 张帆, 叶培大. 自相似业务下光缓存设计. *光子学报*, 2002, 31(4): 425 ~ 428  
Zhang F, Ye P D. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(4): 425 ~ 428
- 3 张民, 叶培大. 光分组交换中光分组长度可变情况下的光纤延时线参数设计. *光子学报*, 2001, 30(Z1): 67 ~ 72  
Zhang M, Ye P D. *Acta Photonica Sinica*, 2001, 30(Z1): 67 ~ 72
- 4 Xue F, Yao S, Mukherjee B, et al. The performance improvement in optical packet-switched networks by traffic shaping of self-similar traffic. *Proceeding of OFC' 2002*, 2002, 3: 218 ~ 219
- 5 Yijun X, Marc V, Hakki C C, et al. Control architecture in optical burst-switched WDM networks. *IEEE JSAC*, 2002, 18(10): 1838 ~ 1851
- 6 Calisti M, Callegati F. Traffic models for an optical transparent packet network. *Proceeding of NOC' 97*, Antwerp, June 1997
- 7 Ge A, Callegati F, Tarnil L. Optical burst switching and self-similar traffic. *IEEE Communication Letter*, 2000, 4(3): 98 ~ 100
- 8 Grossglauser M, Bolot J. On the relevance of long-range dependence in network traffic. *IEEE/ACM Transaction on Networking*, 1999, 7(10): 629 ~ 640
- 9 Ryu B, Lowen S. Point-process approaches to the modeling and analysis of self-similar traffic: part 1—model

- construction. *Proceeding of IEEE INFOCOM' 96*, 1996
- 10 Abry P, Veitch D. Wavelet analysis of long-range-dependent traffic. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1998, **44**(1): 2 ~ 15
- 11 Addie R G, Zukerman M, Nearne T D. Broadband traffic modeling: simple solutions to hard problems. *IEEE Communication Magazine*, 1998, **10**(8): 88 ~ 95

## Analysis for the Effect of Optical Packet Assembly Mechanism on Self-similar Traffic Shaping

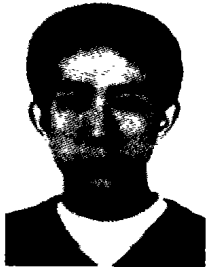
Pan Yong, Ye Peida

*The Optical Communication Center of BUPT, Beijing 100876*

Received date: 2003-11-04

**Abstract** Optical packet assembly at the edge router is expected to serve as a traffic shaper to mitigate the adverse influence of self-similar traffic in optical packet-switched networks. The paper aims to fully explore the effects of optical packet assembly on traffic shaping. Our study by simulation shows that optical packet assembly performs self-similar traffic shaping not only by significantly reducing of self-similarity, but also by improving the short-term correlation and the marginal distribution of traffic processes.

**Keywords** Self-similar traffic; Optical packet switching; Optical packet assembly; Traffic shaping



**Pan Yong** was born in Kunming. He got his M. S. in C. E. from Beijing University of Posts and Telecommunications (BUPT) in 2001. He is currently working as a Ph. D. candidate at BUPT, and research interests include IP optical internetworking, optical packet switching, and optical burst switching.