

光突发交换网络中基于突发包分片并考虑路径关联的可控重传方案

侯 睿¹ 何婷婷² 毛腾跃¹

(¹ 中南民族大学 计算机科学学院, 湖北 武汉 430074)

(² 南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210046)

摘要 提出了一种在光突发交换(OBS)网络核心节点中,基于突发包分片并考虑路径关联的可控重传方案。与以往研究相比改进之处在于,所提方法研究了在设定不同重传概率情况下,相同重传概率重传多次以及不同重传概率重传多次的情况,并对重传次数进行了限制,从而实现了重传概率和重传次数的可控性;同时,还考虑到了路径关联因素对基于分片的可控重传方法的影响,从而克服了以往研究只涉及单路径而不能获取网络拓扑对分片技术影响的局限。利用路径阻塞率和字节丢失率对所提方法进行性能分析,并进行了仿真实验。从仿真结果可以看出,相比于传统方案,重传概率从 1 开始每减小 0.2,突发包的阻塞率就将分别减小 13%,24%,16%,6%。

关键词 光通信;光突发交换;突发包分片;重传;路径关联

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0706025

Burst-Segmentation-Based and Path-Correlation-Considered Controlled Retransmission Scheme in Optical Burst Switching Networks

Hou Rui¹ He Tingting² Mao Tengyue¹

(¹ College of Computer Science, South-Central University for Nationalities, Wuhan, Hubei 430074, China)

(² Computer School, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210046, China)

Abstract A burst-segmentation-based and path-correlation-considered controlled retransmission scheme in optical burst switching (OBS) core nodes is proposed. The improvements compared with previous researches are that the performance of several times retransmission under the same transmission probability and the different transmission probability situations are evaluated when the values of retransmission probability are different. The number of times for retransmission is limited to realize the controllability for both retransmission probability and retransmission times. In addition, the impact of path correlation on the proposed burst-segmentation-based controlled retransmission scheme is considered to overcome the limitation of previous researches that only refer to single path and cannot capture the effect of network topology. Path blocking probability and byte loss probability are used to evaluate the performance of proposed method, and an extensive simulation is used to validate it. From the results it can be seen that, compared with the conventional retransmission scheme, path blocking probability reduces by 13%, 24%, 16%, 6% with every decrement of 0.2 for retransmission probability respectively from 1.

Key words optical communications; optical burst switching; burst segmentation; retransmission; path correlation

OCIS codes 060.4254; 060.4510; 060.4520

1 引 言

全光交换具有比传统电路交换更高的速率及带宽保证^[1],其中,光突发交换(OBS)技术又被认为是

下一代光网络中一种能很好地实现太比特量级传输的新型光交换技术^[2-5]。突发包是 OBS 网络的交换单元,它包括突发数据包及与其对应的突发控制

收稿日期: 2013-02-05; **收到修改稿日期**: 2013-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(60841001)、湖北省自然科学基金(2011CDB412)、国家民委自然科学基金(12ZNN010)、武汉市科技计划(2013010501010125)、武汉市青年科技“晨光计划”(201150431076)

作者简介: 侯 睿(1977—),男,博士,副教授,主要从事于光网络交换技术方面的研究。E-mail: ruis005@hotmail.com

分组 (BCP) 两部分。BCP 先于突发数据包进入 OBS 核心交换网络,在核心交换节点为其对应的突发数据包分配波长资源。由于单向资源预留形式没有确认消息,因此突发数据包很有可能在核心交换节点发生为竞争相同波长资源而导致的数据冲突。目前,解决 OBS 网络中突发数据包竞争的方案主要有光缓存^[6-7]、波长转换^[8]、偏射路由^[9-10]和突发包分片^[11-14]方法等。

为了进一步减少数据损失,突发包重传机制被用作各种冲突解决措施的一种有效补充。目前,重传方案的研究已取得一定成果。文献[15]研究了一种基于传输控制协议(TCP)的重传方案;文献[16]给出一种结合偏射路由的重传方案,此方案在降低数据丢失率的同时也使信道利用率得到提高。但这两种方案都可能会因为不可控的重传带来网络负荷的增大和数据丢失率的增加。在此基础上,文献[17]提出一种可控重传方案,以此来平衡 OBS 网络负荷和端到端的数据丢失率。但文献[17]在整个重传的过程中只给出了两个重传概率,认为第二次重传后每次重传概率都相等,实际上,每次重传会导致网络负荷发生变化,因此每次重传概率需要参照网络负荷而定,相同重传概率的假设具有一定局限性。此外,基于突发包粒度量级的重传方案并不适用于 OBS 分片技术。文献[18]研究了一种基于分片的重传方法,但此方法并未考虑到多次重传会增大网络负荷,反而降低了整个网络性能。另外,目前所研究的基于分片的可控重传模型只涉及单链路或单路径情况^[19],所提出的模型并没有考虑到网络中其他关联路径中的突发数据业务对给定路径中的传输业务产生的影响,因此所得结果在考虑整体网络情况下产生一定局限。

针对以上研究的局限性,本文提出了一种基于突发包分片技术并充分考虑到路径关联的可控突发包重传方案。此方案能够根据网络负荷的变化,赋予每次冲突后的重传以不同的重传概率,并对重传次数进行有效控制,此外还充分考虑了其他关联路径中的业务对给定路径产生的影响。此模型涉及到路径长度、路径中的节点数目、与给定路径相连并与其传输业务产生冲突的关联路径数目[即路径关联系数(PCF)]等与网络特性有关的参数,从而能够获得网络因素对基于分片技术的可控重传方案的影响。最后,通过仿真分析路径阻塞率和字节丢失率来衡量所提出模型的冲突解决性能。

2 基于分片的重传模型

如图 1 所示,在 OBS 网络中,突发包在核心交换节点由于冲突而进行分片后,为了减少数据损失,目的节点 e 就会发送一个反馈给源节点 i 要求重传突发包被分片丢弃部分,如果重传后的部分突发包在传输过程中再次遇到冲突并经历分片,则源节点需要再次重传被分片丢弃部分。在一个支持服务质量(QoS)的 OBS 网络中,并不需要重传所有突发包被丢弃部分,而且多次重传会使网络负荷变大,并很有可能增加数据在核心节点的阻塞率。为了控制网络负荷,特别是在节约能耗的光交换技术要求前提下^[20],需要减少多余负荷对网络产生的不必要能耗。因此,需要对重传的负荷进行适当控制。用参数 α_i 表示突发包在第 i 次冲突并经历分片后需要的重传概率。如图 1 所示,在 OBS 网络中,突发包在核心交换节点由于冲突而进行首次分片后,为了减少数据损失,目的节点 e 就会发送一个反馈给源节点 i,要求以 α_1 的概率重传突发包被分片丢弃部分,即突发包被分片丢弃部分不被重传的概率为 $1 - \alpha_1$ 。同样,如果第 i 次重传后的部分突发包在传输过程中再次遇到冲突并经历分片,则源节点需要再次以 α_i 的概率重传被分片丢弃部分。

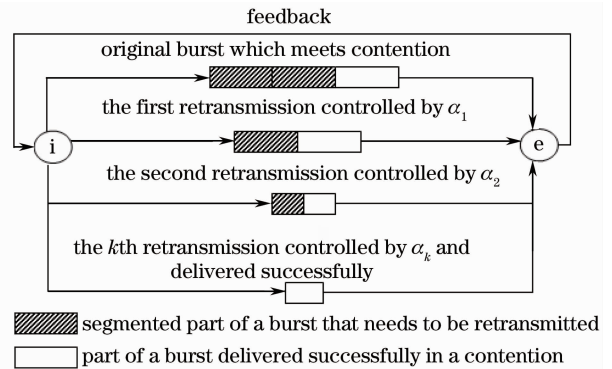


图 1 基于分片的重传原理图

Fig. 1 Principle diagram of the retransmission based on burst segmentation

3 理论分析

为了衡量所提出重传方案的性能,采用路径阻塞率及字节丢失率作为性能衡量参数指标,并提出一种计算路径阻塞率和字节丢失率的分析模型。用 λ_r^0 表示路径 r 上突发包在源节点的到达率, η_r^k 表示路径 r 上第 k 次重传时突发包的离开率, μ_r 表示路径 r 上突发包的服务率, R 表示 OBS 网络中源节点和目的节点之间所有的最短路径, P_r^k 表示路径 r 上第

k 次重传时的阻塞率, α_k 表示第 k 次重传时突发包的
重传概率。分片技术均采用突发包尾部分片方式。根据
流量守恒定律, 第一次重传时路径 r 上源节点中
等待重传的突发包的的增长率等于此时突发包的离开
率。因此, 可以得出以下关系式:

$$(P_r^1 \alpha_1 \lambda_r^0 + P_r^2 \alpha_2 \eta_r^1) = \eta_r^1. \quad (1)$$

因此, 可以得出突发包第一次重传时在路径 r
上的离开率为

$$\eta_r^1 = \frac{\lambda_r^0 P_r^1 \alpha_1}{1 - P_r^2 \alpha_2}. \quad (2)$$

同理, 第 k 次重传时路径 r 上源节点中等待重
传的突发包的的增长率等于此时突发包的离开率:

$$P_r^k \alpha_k \eta_r^{k-1} + P_r^{k+1} \alpha_{k+1} \eta_r^k = \eta_r^k, \quad (3)$$

则第 k 次重传时路径 r 上突发包的离开率为

$$\eta_r^k = \frac{\lambda_r^0 \prod_{j=1}^k P_r^j \alpha_j}{\prod_{i=2}^{k+1} (1 - P_r^i \alpha_i)}. \quad (4)$$

为了简化模型, 假设突发包在路径 r 上每个节
点的到达率都相等。第 k 次重传后路径 r 上突发包
及重传突发包总的到达率 λ_r^k 可以写为

$$G_r^1(t) = P_r^1 \{ (1 - \alpha_1) + \alpha_1 \{ 1 - [1 - G_r^0(t)][1 - H_r^1(t)] \} \} = P_r^1 - \alpha_1 \exp(-\lambda_r^1 t), \quad (8)$$

因此, k 次重传后, 路径 r 上突发包剩余包长的 CDF 可以表示为

$$G_r^k(t) = P_r^k \{ (1 - \alpha_k) + \alpha_k \{ 1 - [1 - G_r^{k-1}(t)][1 - H_r^k(t)] \} \} = P_r^k - \sum_{i=1}^{k-1} \left[(1 - P_r^i) \prod_{j=i+1}^k \alpha_j \exp(-\lambda_r^j t) \right] - \prod_{m=1}^k \alpha_m \exp(-\lambda_r^m t), \quad (9)$$

第 k 次重传后突发包剩余包长的概率分布函数(PDF)可以写为

$$g_r^k(t) = \sum_{i=1}^{k-1} \left[(1 - P_r^i) \sum_{m=i+1}^k \lambda_r^m \prod_{j=i+1}^k \alpha_j \exp(-\lambda_r^j t) \right] + \sum_{n=1}^k \lambda_r^n \prod_{m=1}^k \alpha_m \exp(-\lambda_r^m t). \quad (10)$$

假设路径 r 上存在 n 个节点, ρ_m^k 表示第 k 次重
传时路径 r 上的总负荷, 则有

$$\rho_m^k = \frac{\sum_{i \in M_d(n)} \lambda_{ri}^k + \lambda_r^k}{\mu_r}, \quad (11)$$

式中 λ_{ri}^k 表示第 k 次重传时路径 r 上第 n 个节点处的
第 i 条相关联路径的突发包到达率; $M_d(n)$ 表示路
径 r 上与第 n 个节点所关联的路径集合(PCF), 其
值 N_{PCF} 就是与一个节点相邻接, 其链路上的突发包
可能与原来在这个核心节点进行处理的突发包发生
冲突的链路数目。

设定 OBS 核心交换节点没有波长转换功能, 这
样, 突发包输出过程可用 $W/W/1/1$ 模型描述, 其阻
塞率可用 Erlang B 公式^[21] 来计算:

$$\lambda_r^k = \lambda_r^0 + \sum_{m=1}^k \eta_r^m, \quad (5)$$

式中 $G_r^k(k)$ 表示路径 r 上第 k 次重传后突发包剩余
包长的累积分布函数(CDF), $H_r^k(t)$ 表示第 k 次重
传时路径 r 上一个突发包在若干节点由于冲突被分片
后剩余长度的 CDF, 定义为

$$H_r^k(t) = 1 - \frac{1}{P_r^k} \exp(-\lambda_r^k t). \quad (6)$$

假设突发包在源节点实行基于长度门限的封装
方式, 突发包的长度为 B , 则 $G_r^0(t)$ 可以表示为

$$G_r^0(t) = \begin{cases} 0, & t \leq B \\ 1, & t > B \end{cases} \quad (7)$$

假设一个突发包在 k 次重传后其长度小于等于
 t , 则有以下两种情况发生:

- 1) 第 $(k-1)$ 次重传后此突发包的长度已经小
于等于 t ;
- 2) 第 k 次重传时此突发包与其他突发包发生
竞争被分片后剩下的长度小于等于 t 。

则在 $t \leq B$ 的情况下, 第一次重传后, 路径 r 上
突发包剩余包长的 CDF 可以表示为

$$q_m^k = \frac{\rho_m^k}{1 + \rho_m^k}. \quad (12)$$

假设路径 r 上存在 n 个节点, 则路径阻塞率的计算
公式可以表示为

$$P_r^k = q_{r1}^k + \sum_{i=1}^{n-1} \prod_{j=1}^i (1 - q_{rj}^k) q_{r(i+1)}^k. \quad (13)$$

假设 L_r^k 表示路径 r 上第 k 次重传后突发包包长的
平均期望值, 则有

$$L_r^k = \int_0^{\infty} t g_r^k(t) dt, \quad (14)$$

则第 k 次重传后突发包的平均剩余包长可以写为

$$\Delta_{\text{loss}, r}^k = kB - \sum_{i=1}^k L_{r,i}^k. \quad (15)$$

因此, 在这个 OBS 网络, 第 k 次重传后突发包的平

均字节丢失率可以表示为

$$P_{\text{loss}}^k = \frac{\sum_{r \in R} \lambda_r^k \Delta_{\text{loss},r}^k}{\sum_{r \in R} \lambda k B}, \quad (16)$$

其中 λ 表示所有源节点和目的节点之间的突发包总到达率。

4 仿真分析

图 2 给出具有三个源节点 (i_1, i_2, i_3) 和三个目的节点 (e_1, e_2, e_3) 的美国国家科学基金会网络 (NSFNET) 的网络拓扑结构, 图 2 中距离单位为千米。假设网络传输速率是 80 Gb/s, 突发包在源节点的到达率服从泊松分布。假设所有的入口-出口节点对中突发包所有重传路径均服从最短路径算法。仿真结果均是在重传 4 次 ($k=4$) 的情况下得出的。

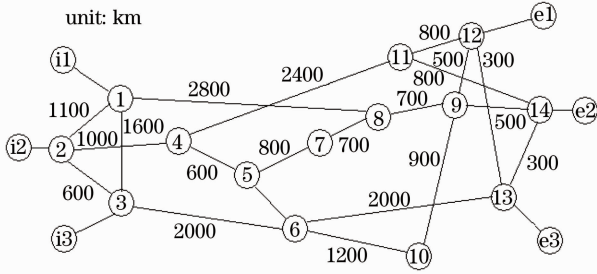


图 2 具有三个源节点 (i_1, i_2, i_3) 和三个目的节点 (e_1, e_2, e_3) 的 NSFNET 网络拓扑结构

Fig. 2 NSFNET network map with three source nodes (i_1, i_2, i_3) and three destination nodes (e_1, e_2, e_3)

不失一般性, 以路径 $r(i_1-1-8-9-14-13-e_3)$ 为研究对象, 图 3 给出了针对每次重传时赋予相同重传概率的突发数据业务在 r 上的路径阻塞率性能。显然, 随着网络负荷的增大, 路径阻塞率逐渐增大。另外, 在相同负荷下, 随着重传概率的增大, 路径阻塞率也逐渐增大。不失一般性, 取负荷为 0.5 时, 相比于传统的方案 (即重传概率 $\alpha_i = 1$), 重传概率每减小 0.2, 突发包的阻塞率将分别减小 13%, 24%, 16%, 6%。很明显, 不可控的重传方案下的路径阻塞率远高于可控重传下的路径阻塞率。这说明了该可控重传方案相对于传统方案的性能有所改善。

图 4 给出了在每次重传相同的重传概率情况下, 突发数据业务在路径 r 上的字节丢失率情况。显然, 随着网络负荷的增大, 路径 r 中突发包的字节丢失率逐渐增大。同样, 取负荷为 0.5, 从重传概率 $\alpha_i = 0.2$ 开始, 重传概率每增大 0.2, 字节丢失率分别减小 14%, 10.5%, 7.5%, 4.5%, 表明重传概率的增大会使突发包的字节丢失率减小, 但随着重传

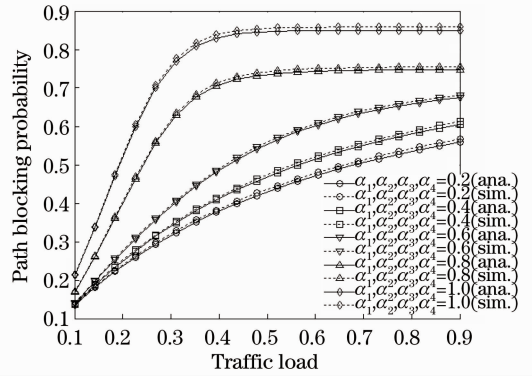


图 3 路径 r 上每次重传基于相同重传概率的路径阻塞率

Fig. 3 Path blocking probability on path r with the same retransmission probability

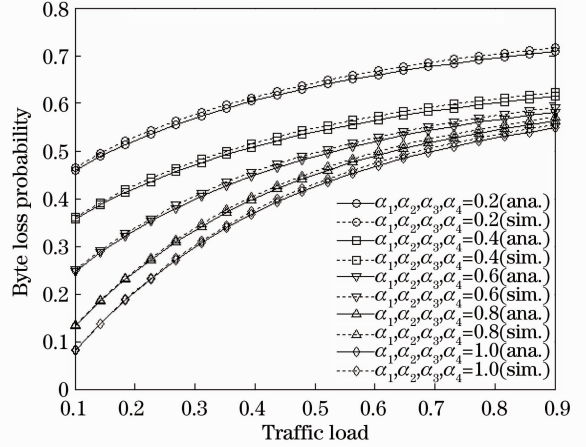


图 4 路径 r 上每次重传基于相同重传概率的字节丢失率

Fig. 4 Byte loss probability on path r with the same retransmission probability

概率的增大, 字节丢失率减小的幅度逐渐降低, 当重传概率 α_i 接近于 1 时, 增大重传概率并不能有效地减小字节丢失率, 这是因为重传概率的增大导致路径阻塞率增大, 从而影响网络中的字节丢失率。

图 5 给出了针对不同的重传概率突发数据业务在 r 上的路径阻塞率性能。在需要多次重传的情况下, 为了控制因过多的重传业务造成的网络负荷增大, 仿真时假设一个突发包的重传概率随着重传次数的增加而减少, 令 $\alpha_i = 0.5\alpha_{i-1} (i = 2, 3, 4)$ 。从图 5 中可以看到, 路径阻塞率会随着网络负荷的增大而逐渐增大; 在相同负荷下, 路径阻塞率随重传概率的增大而增大。此外可以看到, 该可控重传方案获得了比不可控重传方案更低的路径阻塞率。

图 6 给出了在不同重传概率情况下, 突发数据业务在路径 r 上的字节丢失率情况。同样, 令 $\alpha_i =$

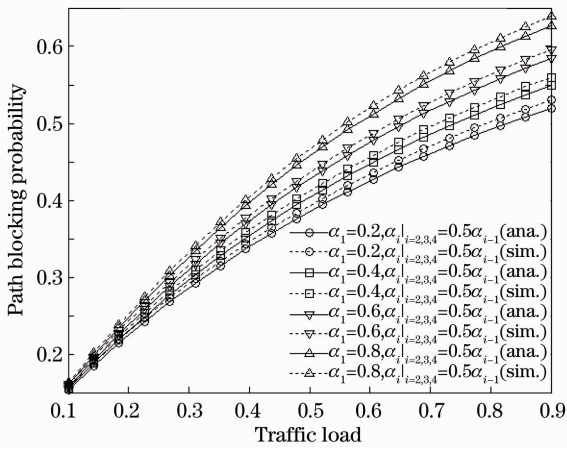


图5 路径 r 上基于不同重传概率的路径阻塞率

Fig. 5 Path blocking probability on path r with different values of retransmission probability

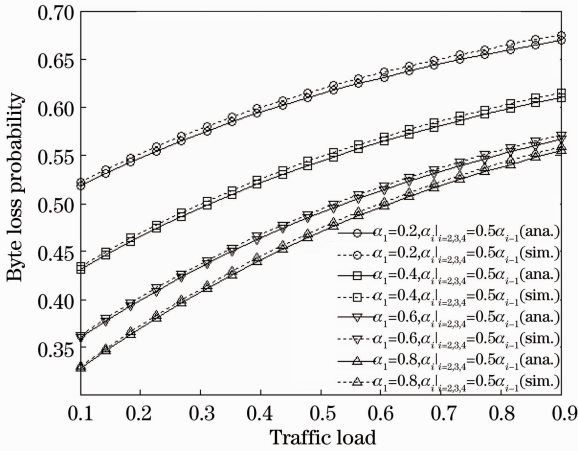


图6 路径 r 上基于不同重传概率的字节丢失率

Fig. 6 Byte loss probability on path r with different values of retransmission probability

$0.5\alpha_{i-1}$ ($i=2,3,4$)。显然,随着网络负荷的增大,路径 r 中突发包的字节丢失率逐渐增大;相同的负荷下,重传概率的增大会使突发包的字节丢失率减小,且字节丢失率减小的幅度随重传概率的增大逐渐降低。

图7给出了PCF对突发包字节丢失率的影响。为了具体说明PCF所产生的影响,这里选取三条路径作为仿真对象:路径1(i1-1-8-9-14-e2),路径2(i1-1-8-9-14-13-e3)和路径3(i1-1-8-9-14-11-12-e1),这三条路径的PCF分别为7,8,9。从图7中可以看出,随着网络负荷的增大,三条路径中的突发包字节丢失率均逐渐增大;同时,PCF的增大也会使得字节丢失率增大。因为关联路径数目的增多,意味着突发包在核心节点与来自其他相关联路径突发包发生冲突的几率增大,因冲突而发生分片的概率就随

之变大,导致字节丢失率增大。因而可以看到,以往的单路径分片技术由于没有考虑关联路径等网络因素而产生了一定局限,给定路径突发数据业务不仅会受到本路径业务的影响,同时还会受到与本路径关联的其余路径中突发数据业务的影响。

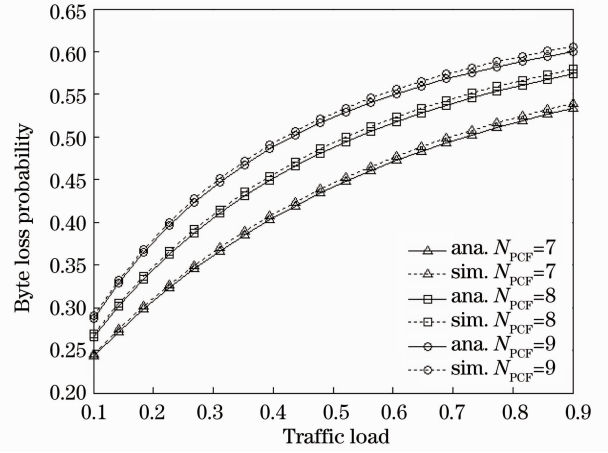


图7 PCF对突发包字节丢失率的影响

Fig. 7 Influence of PCF on byte loss probability of burst packets

为了说明仿真中重传次数 k 设定为4次的原因,给出了重传次数 k 对突发包字节丢失率的影响曲线图,如图8所示。假设重传概率 α_i 均为0.5。从图8中可以看到,随着 k 的增加,字节丢失率逐渐减少。同时可以看到,当 $k=4,5,6$ 时,三条曲线是非常接近的,因此,当 $k \geq 4$ 时, k 对字节丢失率的影响开始减小,这意味着继续增大 k 并不能更有效地减小字节丢失率,反而会增大网络中的路径阻塞率。因此,仿真中取 $k=4$ 。

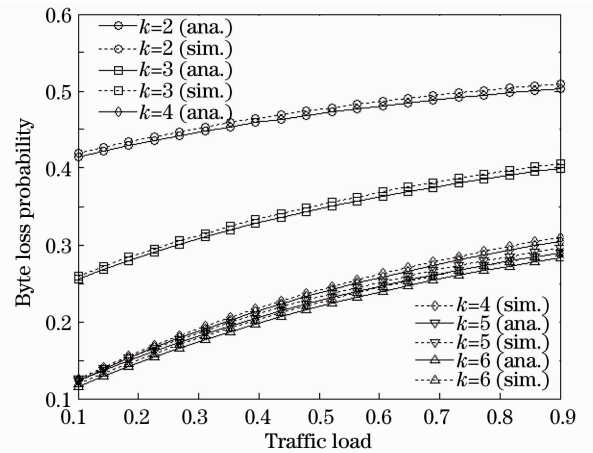


图8 重传次数 k 对突发包字节丢失率的影响

Fig. 8 Effect of k on the performance of byte loss probability of burst packets

5 结 论

OBS网络核心节点中,突发包竞争波长资源而导致的冲突问题是一个关键问题。提出了一种基于分片并考虑路径关联的可控重传方案。仿真结果表明,虽然重传概率的增大会使突发包的字节丢失率减小,但随着重传概率的增大,字节丢失率减小的幅度逐渐降低。当重传概率 α_i 接近于1时(等于1时为不可控重传),增大重传概率并不能有效地减小字节丢失率,反而会使网络中的路径阻塞率明显增大,因此,可以通过赋予每次重传不同的概率来对网络整体负荷进行较好的控制。可以看到,在可控的重传模式下,路径阻塞率得到了较好的改善。同时,充分考虑到其他关联路径中的业务对给定路径产生的影响,此模型涉及到路径长度、路径中的节点数目、与给定路径相连并与其传输业务产生冲突的关联路径数目等与网络特性有关的参数,给出了一种考虑路径关联因素的路径阻塞率的计算方法,从而可以获得网络因素对分片及重传造成的影响。因此,研究结果对重传概率及重传次数等参数的设定和OBS网络的设计和优化提供了一定的理论参考依据。

参 考 文 献

- Li Qian, Qiao Yaojun, Ji Yuefeng. Comparison of parallel computing performance between the optical and electrical interconnects [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(2): 498–502.
李倩, 乔耀军, 纪越峰. 光互连与电互连的并行运算性能比较 [J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 498–502.
- C Qiao, M Yoo. Optical burst switching (OBS): a new paradigm for an optical internet [J]. *J High Speed Networks*, 1999, 8(1): 69–84.
- P P Marino, F Neri. On the myths of optical burst switching [J]. *IEEE Trans Communications*, 2011, 59(9): 2574–2584.
- Niu Dawei, Wang Hai, Yu Weibo, *et al.*. A cross traffic estimate model for optical burst switching networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11): 1106002.
牛大伟, 王海, 于卫波, 等. 一种适用于光突发交换网络的背景流量估计模型 [J]. *光学学报*, 2012, 32(11): 1106002.
- Le Zichun, Chen Jun, Fu Minglei, *et al.*. Optical cross connection: novel architecture and performance analysis [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 0306005.
乐孜纯, 陈君, 付明磊, 等. 一种新型结构光交叉连接节点及其联网性能分析 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 0306005.
- C Y Li, P K A Wai, V O K Li. Performance improvement methods for burst-switched networks [J]. *J Optical Communications and Networking*, 2011, 3(2): 104–116.
- Guan Aihong, Wang Boyun, Zhang Yuan, *et al.*. Optical buffer

- mechanism based on priority and burst segmentation in optical burst switching network [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(6): 060601.
- 管爱红, 王波云, 张元, 等. 光突发交换网络基于优先级与突发包分割的光缓存方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(6): 060601.
- M A G Ortega, A S Gonzalez, J C L Ardao, *et al.*. Loss differentiation in full wavelength conversion capable OBS networks by burst cloning [J]. *IEEE Commun Lett*, 2011, 15(1): 85–87.
 - J Baliga, E W M Wong, M Zukerman. Analysis of bufferless OBS/OPS networks with multiple deflections [J]. *IEEE Commun Lett*, 2009, 13(12): 974–976.
 - S Lee, K Sriram, H Kim, *et al.*. Contention based limited deflection routing protocol in optical burst-switched networks [J]. *IEEE J Selected Areas in Communications*, 2005, 23(8): 1596–1611.
 - T Venkatesh, A Jayaraj, C S R Murthy. Analysis of burst segmentation in optical burst switching networks considering path correlation [J]. *J Lightwave Technology*, 2009, 27(24): 5563–5570.
 - V M Vokkarane, J P Jue. Segmentation-based non-preemptive channel scheduling algorithms for optical burst-switched networks [J]. *J Lightwave Technology*, 2005, 23(10): 3125–3137.
 - R Hou, J Sun, P Ding, *et al.*. Performance analysis of differential output ports choosing probability for multi-classes traffic in optical burst switching network [J]. *Opt Eng*, 2006, 45(6): 065003.
 - R. Hou. Blocking and delay performance for differential output-ports choosing probability scheme applied optical burst switching network [J]. *Optik*, 2010, 121(14): 1295–1299.
 - N Charbonneau, V M Vokkarane. Performance modeling of HS-RR-TCP over load-balanced optical burst-switched (OBS) networks [J]. *Optical Switching and Networking*, 2011, 8(2): 116–128.
 - S H Ngo, X H Jiang, S Horiguchi. Hybrid deflection and retransmission routing schemes for OBS networks [C]. *IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing*, 2006. 385–390.
 - T Venkatesh, A Sankar, A Jayaraj, *et al.*. A complete framework to support controlled burst retransmission in optical burst switching networks [J]. *IEEE J Selected Areas in Communications*, 2008, 26(3): 65–73.
 - T W Um, J K Choi, S G Choi, *et al.*. Performance of a partial burst retransmission mechanism in OBS networks [C]. *International Conference on Networking and Services*, 2006. 108–113.
 - R Hou, T T He, T Y Mao. Controlled retransmission scheme for prioritized burst segmentation to support quality-of-service in optical burst switching networks [J]. *Opt Eng*, 2012, 51(10): 105003.
 - Guo Aihuang, Feng Shengyi, Xue Lin, *et al.*. Research on power efficient routing algorithm in green optical networks [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0406002.
郭爱煌, 冯圣毅, 薛琳, 等. 基于节能的绿色光网络路由算法的研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0406002.
 - A Papoulis, S U Pillai. *Probability, Random Variables and Stochastic Processes* [M]. New York: McGraw Hill, 2002.

栏目编辑: 王晓琰