

文章编号 1004-924X(2017)增-0228-07

## 基于受限延迟抢占的竞争解决与阻塞公平改善

柳春郁, 张旭东, 张 雪, 康 静, 杨九如\*  
(黑龙江大学 电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为改善用户的阻塞公平性,提出了一种基于公平性改善的受限延迟抢占方案以同步满足光突发交换网络中高、低优先级突发的低丢弃率要求。在核心节点,依据分组到达的优先级别与实时流量状态,通过动态设定流量门限,限制阻塞条件下高优先级用户的缓存与信道占用权限,有效减少低优先级用户在高流量状态下的无效丢弃。结果表明:丢弃率与高、低优先级用户占比和流量门限设定值直接相关,当高优先级用户占比小于 0.3,动态流量门限值为 0.5 ~ 0.7 时,所提方案可保证中、高流量状态下的阻塞率低于  $10^{-2}$ ,且公平性因子保持 ~ 0.95。与传统基于优先级的抢占机制相比,所提方案在支持区分服务的同时,兼顾了用户的阻塞与公平性要求,避免了因大量低优先级突发丢弃所导致的无效传输与二次阻塞,有效提升了光交换网络的实用性与可靠性。

**关键词:**光突发交换;竞争解决;公平性;阻塞率;抢占;缓存

**中图分类号:**TP929.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172513.0228

## Contention resolution and blocking fairness improvement based on limited delay preemption

LIU Chun-yu, ZHANG Xu-dong, ZHANG Xue, KANG Jing, YANG Jiu-ru\*

(College of Electronics Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

\* Corresponding author, E-mail: yangjr@hlju.edu.cn

**Abstract:** In order to improve blocking fairness of users, limited delay preemption scheme based on fairness improvement (LDP-FI) was proposed to satisfy the requirement of low discarding rate of high and low priority burst in optical burst switching network synchronously. In core nodes, priority level and real-time traffic states reached by LDP-FI according to groups decreased invalid discard of low priority users effectively under high traffic state by dynamic setting of traffic threshold and restriction of buffer and channel occupancy authority of high priority users under blocking condition. Numerical results show that: discarding rate is directly related to proportion of high and low priority users and set value of traffic threshold. When proportion of high priority users is less than 0.3, and dynamic traffic threshold value is 0.5–0.7, LDP-FI can guarantee that blocking rate under middle and high traffic state is lower than  $10^{-2}$  and fairness index is kept to be 0.95. Compared with traditional preemption mechanism based on priority, LDP-FI gives consideration to blocking and fairness requirements of users at the time of supporting differentiated service, avoids invalid transmission and secondary blocking caused by discard of a large number of low priority burst and improves practicability and reliability of

收稿日期:2017-05-02;修订日期:2017-07-04.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61675066, 61302075, 61205071)

optical switching networks effectively.

**Key words:** optical burst switching; contention resolution; fairness; blocking rate; preemption; buffer

## 1 引言

数据中心驱动下的光因特网工程促进了光传输、光交换、自由空间/室内光通信等技术的快速发展<sup>[1-4]</sup>。具有高传输效率与可升级性的光突发交换(OBS)成为未来光因特网的主要备选方案之一,并受到学者们的广泛关注<sup>[5]</sup>。OBS采用单向信道预约机制,分组/突发间的信道竞争在所难免,且分组/突发的丢弃-重传过程将产生二次拥塞、传输延迟、能耗等系列问题<sup>[6-7]</sup>。因此,改善OBS的高丢弃率始终是相关研究中的焦点与热点。通过在核心节点配置可调谐波长转换器(TWCs)和光纤延迟线(FDLs)等器件,多种竞争解决方案(如:偏折路由、信道预留、缓存、突发分段等)被证实可以有效降低分组/突发的拥塞几率,满足用户的区分服务质量(QoS)要求<sup>[8-9]</sup>。不足在于,大量引入TWCs和FDLs器件使得核心节点的结构庞大、控制复杂度增加,额外能量消耗陡<sup>[10]</sup>。与之相比,抢占机制支持区分服务,无需配置TWCs和FDLs,可避免高优先级分组/突发的直接丢弃,具有较高的实用性。抢占机制的缺陷在于,它以大量低优先级突发的不合理丢弃为代价,这极易诱发公平性问题<sup>[11]</sup>。考虑到低优先级突发是网络中的主体,适度限制高优先级突发的抢占权限,可有效降低低优先级突发及核心节点的丢弃率,改善用户传输的公平性与实效性。

通过设置突发权重,Proportional preemption<sup>[12]</sup>、Probabilistic preemption<sup>[13]</sup>和Hop-based preemption<sup>[14-15]</sup>等“直接抢占”方案被相继提出以改善分组/突发的阻塞公平性。“直接抢占”的固有缺陷是易产生虚假信道竞争现象(又称“鬼影突发”),并由此产生不必要的突发丢弃与信道资源浪费<sup>[16-17]</sup>。基于缓存策略的预/后信道预约技术是避免“鬼影突发”的有效方案<sup>[18-20]</sup>。本文以低优

优先级突发为研究对象,结合受限抢占与小缓存技术,提出一种新颖的基于公平性改善的受限延迟抢占(LDP-FI)方案以同步满足区分用户的丢弃率与阻塞公平性要求。LDP-FI通过设定流量门限,动态限制高优先级突发的抢占权限,避免低优先级突发在中/高流量状态下的“过丢弃”。实验结果表明,设置流量门限值为0.5~0.7,所提方案使得核心节点在中、高流量状态下的阻塞率小于 $10^{-2}$ ,高、低优先级突发间的阻塞公平因子达~0.95。与传统基于优先级的抢占方案相比,LDP-FI的公平性改善达5.5%~18.9%,光交换网络的实用性与可靠性进一步提升。

## 2 阻塞模型

在两优先级模型中,设定“丢弃-延迟敏感”业务为高优先级( $B_{h,i}$ ,  $i = 1, 2, 3, \dots$ ),其它业务为低优先级( $B_{l,j}$ ,  $j = 1, 2, 3, \dots$ )。设突发的到达与服务速率服从指数分布,则载荷/信道可表示为 $\rho = \lambda/W\mu$ ,其中 $\lambda$ 和 $\mu$ 分别是突发的平均到达与服务速率, $W$ 为信道数。进而,设高优先级突发 $B_h$ 的流量占比为 $\alpha$ ,则高、低优先级的业务载荷可分别表示为 $\rho_h = \alpha\rho$ 和 $\rho_l = (1-\alpha)\rho$ ,其中 $\rho = \rho_h + \rho_l$ 。

如图1(a)所示的核心节点由控制单元和交换单元组成。交换单元包含 $m$ 输入/输出端口,每端口的光纤链路数为1,对应数据信道波长数为 $W$ 。基于延迟性考虑,核心节点仅配置一段小尺寸的反馈结构FDLs(长度~80  $\mu\text{s}$ )用于竞争避免。进而,规定信道阻塞条件下,高优先级突发具有缓存与抢占权限,低优先级突发则仅拥有缓存权限。于是,在上述延迟抢占机制中<sup>[21]</sup>,当突发竞争产生时,后至突发可进入空闲FDLs缓存以避免被直接丢弃。与此同时,控制单元将为被缓存的高(低)优先级突发抢占(二次预约)信道。

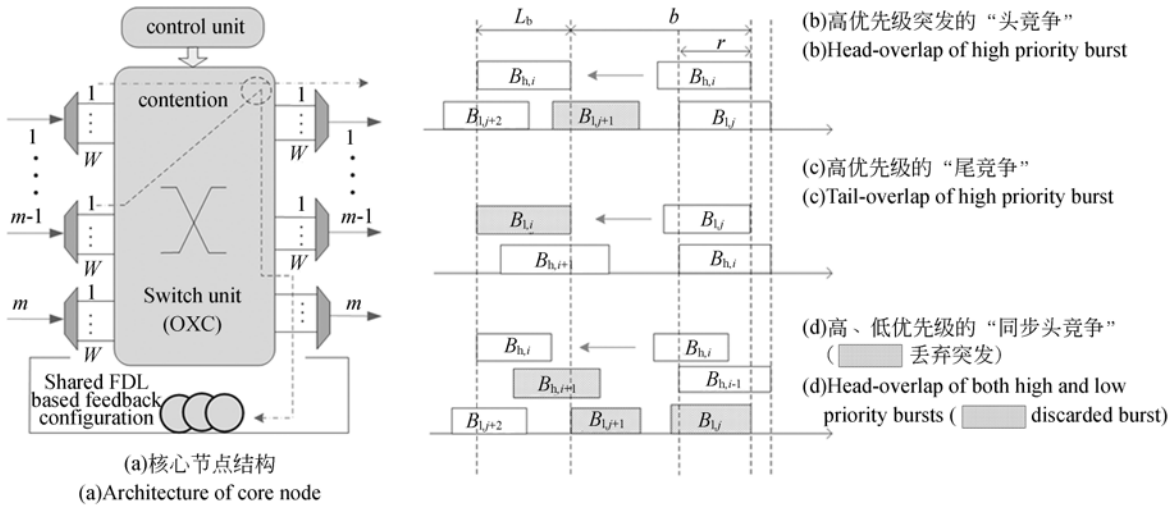


图 1 LDP-FI 工作原理  
Fig. 1 Principles of LDP-FI

设 FDLs 长度为  $b$ , 突发长度为  $L_b$ , 均值为  $\bar{L}_b = 1/\mu$ , 两竞争突发间的交叠长度为  $r$ , 则依据竞争位置, 可将高优先级突发的信道冲突分为“头竞争”、“尾竞争”与“同步头竞争”3 种情况。处理机制如下: (1) 如图 1(b), 基于“先进先出”原则, 先到达的低优先级突发  $B_{l,j}$  直接被转发, 后至的高优先级突发  $B_{h,i}$  则遭遇“头竞争”。若此时 FDLs “空闲”, 则  $B_{h,i}$  进入 FDLs 并缓存  $b$  长度。同时, 控制单元提前为其无条件预留(抢占)信道  $b-r + L_b$ 。于是, 在  $b-r$  间隔内到达的低优先级突发  $B_{l,j+1}$  将被丢弃。(2) 如图 1(c), 若  $B_{h,i}$  遭遇“尾竞争”, 后至低优先级突发  $B_{l,j}$  进入空闲 FDLs 中缓存。若在  $b-r$  间隔内有高优先级突发  $B_{h,i+1}$  到达, 则  $B_{l,j}$  被丢弃。(3) 当高、低优先级突发  $B_{h,i}$  和  $B_{l,j}$  均遭遇“头竞争”时(见图 1(d)), 规定高优先级突发  $B_{h,i}$  进入空闲 FDLs, 丢弃低优先级突发  $B_{l,j}$ 。并规定, 若缓存  $b$  长度后,  $B_{h,i}$  与另一高优先级突发  $B_{h,i+1}$  在间隔  $b-r$  内产生二次竞争, 则丢弃并重传  $B_{h,i+1}$  (降低乱序到达几率)。另一方面, 若有突发在间隔  $b-r$  内到达, 无论缓存与否, 无信道抢占权限的低优先级突发均将被丢弃。

综上, 仅信道与缓存被同时占用时, 到达突发才会被丢弃。于是, 丢弃率/信道可表示为:

$$P_D = u \cdot P_{FDL}, \quad (1)$$

其中,  $u = \rho(1 - P_D)$  为信道占用几率<sup>[18]</sup>,  $P_{FDL} = 1 - e^{-\lambda b}$  是缓存占用几率。对应地, 高、低优先级突发的信道占用几率可分别表示为  $u_h = \alpha\rho(1 - P_D)$

和  $u_l = \rho(1 - \alpha)(1 - P_D)$ 。由于具有抢占权限, 高优先级突发仅当信道与缓存均被占用时才会被丢弃, 所以其丢弃率为:

$$P_{D,h} = \alpha P_D = \alpha \cdot u P_{FDL}. \quad (2)$$

与之相比, 低优先级突发的阻塞则可能来自以下 3 种情况: (1) 信道与缓存“忙”; (2) 缓存后信道依旧“忙”; (3) 信道“忙”, 缓存“空闲”, 但已被高优先级突发提前预约。于是, 低优先级突发的阻塞率可表示为:

$$P_{D,l} = u(1 - \alpha) P_{FDL} + u(1 - P_{FDL}) \cdot P_{b-r}(1 - \alpha) + u(1 - P_{FDL}) \cdot \alpha, \quad (3)$$

其中,  $P_{b-r} = e^{-\lambda(b-r)}$  是在间隔  $b-r$  内突发到达的几率,  $1 - P_{FDL}$  是缓存的空闲几率。联立式(2)和(3)得到:

$$P_D = \frac{\rho[\alpha(1 - P_1) + P_1]}{\rho[\alpha(1 - P_1) + P_1] + 1}, \quad (4)$$

其中,  $P_1 = P_{FDL} - P_{FDL} \cdot P_{b-r} + P_{b-r} = 1 - e^{-\lambda b} - (1 - e^{-\lambda b})e^{-\lambda(b-r)} + e^{-\lambda(b-r)}$ ,

显然,  $P_1$  是给定  $\lambda$  条件下  $b$  和  $r$  的函数。依据文献[22],  $r$  的期望为:

$$E[r] = \frac{\bar{L}_b}{2} + \frac{\delta_{L_b}^2}{2L_b},$$

其中,  $\delta_{L_b}^2$  是突发长度  $L_b$  的方差。假设所有突发的聚合长度门限值相同, 则  $\delta_{L_b}^2 = 0$ , 且  $E[r] = \bar{L}_b/2$ ; 并设  $b = \bar{L}_b$ <sup>[19]</sup>, 则有  $E[r] \approx b/2$ 。于是,  $P_1$  的均值可简化为:

$$\overline{P_1} = (1 - e^{-\lambda b})(1 - e^{-\lambda b/2}) + e^{-\lambda b/2}. \quad (5)$$

考虑到 FDLs 长度  $b$  实为定值,则在给定  $\lambda$  条件下的  $\overline{P_1}$  亦为常量。此时,  $P_D$  可视作  $\alpha$  的单调递增函数。亦即,当  $\alpha = 0$  时,  $P_D$  取得其最小值。然而,  $\alpha = 0$  意味着两优先级模型退化为无优先级模型。这表明,延迟抢占机制下,高优先级突发的延迟与抢占权限是导致核心节点高丢弃率的根源。进一步,由公式(3)可知,高丢弃率源于高优先级突发“非公平”抢占所致的大量低优先级突发丢弃。换言之,为改善核心节点的阻塞公平性,在特定流量状态下,应适度限制高优先级突发的信道抢占权限,避免不必要的低优先级突发丢弃。于是,设流量门限为  $\rho_{th}$ ,规定:当载荷  $\rho$  小于  $\rho_{th}$  时,保持高优先级突发的抢占权限;当  $\rho$  大于  $\rho_{th}$  时,剥夺高优先级突发的抢占权限。于是,  $\rho > \rho_{th}$  时,  $P_{D,h}$  和  $P_{D,l}$  分别变为:

$$P_{D,h} = u[P_{FDL} + (1 - P_{FDL})P_{b-r}] \cdot \alpha, \quad (6)$$

$$P_{D,l} = u[P_{FDL} + (1 - P_{FDL})P_{b-r}] \cdot (1 - \alpha). \quad (7)$$

显然,式(6)和(7)具有相同的形式,其不同仅在于流量占比之差异。比较式(7)与(3)可知,低优先级突发的丢弃率减少  $u(1 - P_{FDL}) \cdot \alpha$ ,且与  $\alpha$  成反比关系。类似地,将式(6)与(2)做差可知,高优先级突发丢弃率略有上升,对应增加值为  $u(1 - P_{FDL})P_{b-r} \cdot \alpha$ 。鉴于  $P_{b-r} < 1$ ,对应核心节点的总丢弃率减少:

$$P_D = u\alpha(1 - P_{FDL})(1 - P_{b-r}) = \alpha \rho(1 - P_D) e^{-\lambda b} [1 - e^{-\lambda(b-r)}] = \rho_h(1 - P_D)(e^{-\lambda b} - e^{-2\lambda b + \lambda r}). \quad (8)$$

显然,  $P_D$  与  $P_D$  和到达速率  $\lambda$  成反比,与高优先级突发载荷占比  $\rho_h$  成正比。表明 LDP-FI 可在  $\rho > \rho_{th}$  区域有效抑制高优先级突发的资源抢占,降低突发阻塞几率。综上,LDP-FI 方案的丢弃率/信道可表示为:

$$P_D = \begin{cases} \frac{\rho[\alpha(1 - P_1) + P_1]}{\rho[\alpha(1 - P_1) + P_1] + 1} & \rho \leq \rho_{th} \\ \frac{\rho P_1}{\rho P_1 + 1} & \rho > \rho_{th} \end{cases}. \quad (9)$$

式(9)表明,给定流量载荷条件下,LDP-FI 的阻塞改善性能依赖于  $\rho_{th}$  和  $\alpha$ 。换言之,确定匹配的  $\rho_{th}$  和  $\alpha$  值是降低丢弃率与提升阻塞公平性的关键。

### 3 性能评价

图 2 所示的仿真模型为典型的 14 节点 NSF 网络拓扑<sup>[15]</sup>。设所有突发在边缘节点具有相同偏置时间,最小和最大突发长度分别为 20 kB 和 300 kB,且服从均值为 100 kB 的指数分布。控制信道和数据信道的传输速率分别为 10 Gb/s 和 40 Gb/s,控制单元的处理周期为  $t_p = 10 \mu s$ 。交换单元的输入/输出端口数为  $m = 4$ ,所有突发在 FDLs 中单次缓存,FDLs 长度为  $80 \mu s$ ,光纤链路内的数据信道数  $W = 16$ 。进而,设定  $0.1 \leq \alpha \leq 0.5, 0.3 \leq \rho_{th} \leq 0.9$ 。LDP-FI 方案下的高、低优先级突发的阻塞性能如图 3 所示。

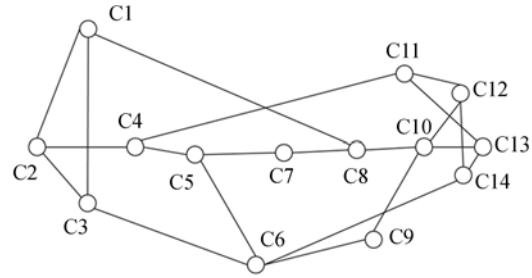


图 2 14 节点 NSF 网络拓扑

Fig. 2 NSF network with fourteen nodes

由图 3(a)~(d)可知,阻塞率  $P_D$  随  $\alpha$  值的减少持续降低,低流量状态下( $\rho < 0.3$ ),  $\alpha = 0.1$  时,  $P_D$  值位于  $10^{-4}$  以下。而且,对于给定的  $\alpha$  值,全流量状态下其对应的最小丢弃率均在  $\rho_{th} = 0.3$  处获得。然而,比较数值结果可知,当  $\alpha$  为较大值时(如:  $\alpha = 0.3$  或  $0.5$ ),丢弃率在  $\rho > \rho_{th}$  区域内的改善效果更加明显。图 3(a)中,非受限抢占在  $\rho = 0.8$  处的  $P_D$  值即高达  $1.04 \times 10^{-1}$ ;当设定  $\rho_{th} = 0.3$  后,对应的  $P_D$  值减少至  $\sim 4.8 \times 10^{-2}$ ,丢弃率改善超 50%。相反,当高优先级用户较少时,由于信道抢占几率不高,阻塞率改善不明显。 $\alpha = 0.1$  时,  $\rho_{th} = 0.3$  与非受限抢占间的丢弃率改善小于 20% ( $\rho = 0.8$ )。上述结果与式(8)的相关分析一致。进一步地,设定  $\alpha = 0.3$ ,LDP-FI 方案下高、低优先级突发的丢弃率如图 3(e)~(f)所示。如图 3(e),由于限制了高优先级的抢占权限,  $\rho > \rho_{th}$  时,低优先级突发的丢弃率得到显著降低。 $\rho_{th} = 0.3$  时,LDP-FI 的丢弃率改善达  $\sim$

67% ( $\rho = 0.8$ )。图 3(f)表明,受限抢占条件下,高优先级突发的阻塞率略有上升( $< 30\%$ ),且与  $\rho_{th}$  值呈反比例关系,但在全流量状态下,其值均低

于  $10^{-2}$ 。这表明,LDP-FI 可以保证高优先级突发的低丢弃要求。

进而,利用“Jain 公平因子”量化高、低优先级

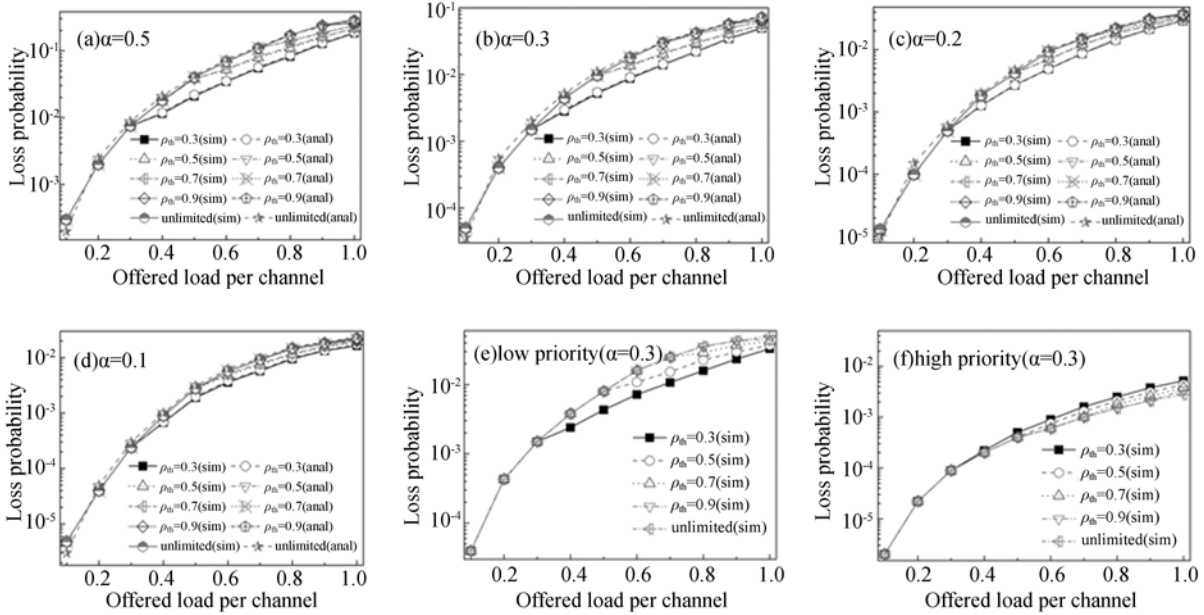


图 3 变  $\rho_{th}$  和  $\alpha$  条件下阻塞性能比较

Fig. 3 Comparison on blocking performance with various  $\rho_{th}$  and  $\alpha$

突发的阻塞公平性<sup>[16]</sup>。

$$F_{(n)} = \frac{(\sum_{n \in N} P_{D,n}/c_n)^2}{N \cdot \sum_{n \in N} (P_{D,n}/c_n)^2}, \quad (10)$$

其中,  $F_{(n)} \in [0, 1]$  为公平因子(注:  $F_{(n)} = 1$  表示公平性最佳;相反,  $F_{(n)} = 0$  表明高、低优先级间存在较大的阻塞率偏差),  $n$  是突发的优先级,  $N$  为  $n$  的最大值,  $c_n$  是对应优先级突发的流量占比。显然,在上述两优先级模型中,  $c_1 = \alpha$ ,  $c_2 = 1 - \alpha$ 。

依据式(10),设  $\alpha = 0.3$ , LDP-FI ( $\rho_{th} = 0.3 \sim 0.9$ )、priority-based DP<sup>[20]</sup> 和 hop-based preemption<sup>[15]</sup> 3种抢占机制的阻塞公平性如图 4 所示。比较可知,就单一核心节点而言,采用“直接抢占”机制的 hop-based preemption 方案的公平性最差。全流量状态下,其  $F_{(n)}$  值始终维持在  $0.75 \sim 0.81$ 。这表明,由于未配置光缓存器件, hop-based preemption 方案在中、低流量状态时即较频繁地使用信道抢占机制转发高优先级突发,并导致了过多低优先级突发的非公平丢弃。与之相比,由于引入了基于小缓存的延迟抢占策

略,priority-based DP 方案显著降低了低优先级突发的直接丢弃几率,全流量状态下,对应  $F_{(n)}$  值有约 10% 的提升。

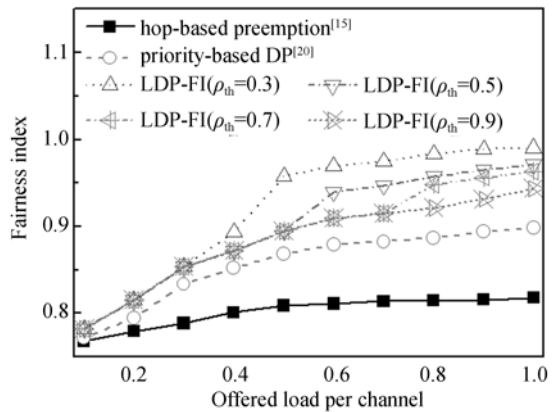


图 4  $\alpha = 0.3$  时阻塞公平性评价

Fig. 4 Evaluation of blocking fairness with  $\alpha = 0.3$

LDP-FI 在延迟抢占方案的基础上,进一步限制  $\rho > \rho_{th}$  区域内高优先级突发的抢占权限,使得中、高流量状态下低优先级突发获得了更多的信

道与缓存资源,阻塞公平性得到进一步改善。当  $\rho_{th}=0.3$  时,对应的  $F_{(n)}$  值最高,达  $\sim 0.99$  ( $\rho=1.0$ )。然而,结合图 3 的结果可知,此时  $P_{D,h}$  值已接近  $10^{-2}$ 。相比之下, $\rho_{th}=0.5$  或  $0.7$  时, $F_{(n)}$  值亦保持在  $0.95$  ( $\rho=1.0$ ) 以上,而对应的  $P_{D,h}$  值则有超 30% 的下降。经计算,与 priority-based DP 和 hop-based preemption 方案相比, $\rho_{th}=0.5 \sim 0.7$  时,阻塞公平性改善达  $5.5 \sim 18.9\%$  ( $= \frac{F_{(n),LDP-FI} - F_{(n),DP/hop}}{F_{(n),DP/hop}}$ )。同时,LDP-FI 使得中、高流量状态下高、低优先级突发丢弃率  $< 10^{-2}$ 。

## 4 结 论

围绕减少低优先级突发的非公平丢弃,本文

提出结合受限抢占与小尺寸缓存技术的 LDP-FI 方案,通过限制特定流量状态区域内高优先级突发的信道抢占权限,有效改善光交换网络中高、低优先级用户间的阻塞公平性。基于两优先级模型,全面分析了延迟抢占条件下高、低优先级突发的阻塞关联性,确定了流量占比与流量门限参量的有效取值范围。数值仿真结果表明,核心节点阻塞率与高、低优先级间的流量占比成反比关系,合理设定流量门限值平衡丢弃率与阻塞公平性的关键。恰当流量门限条件下 ( $\rho_{th}=0.5 \sim 0.7$ ), LDP-FI 机制可有效降低核心节点在中高流量状态下的丢弃率 ( $< 10^{-2}$ ); 与传统抢占方案相比,其高、低优先级用户间的阻塞公平性得到显著改善,阻塞公平性改善达  $5.5\% \sim 18.9\%$ 。

## 参考文献:

- [1] LIU B, ZHANG L J, XIN X J. Non-orthogonal optical multicarrier access based on filter bank and SCMA[J]. *Optics Express*, 2015, 23(21): 27335-27342.
- [2] 杨九如, 柳春郁, 常金龙, 等. 光突发交换网络能耗有效性研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(7): s105001.  
YANG J R, LIU C Y, CHANG J L, et al.. Energy efficiency research of optical burst switching networks [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(7): s105001. (in Chinese)
- [3] 崔宁, 陈兴林, 曹开锐, 等. 空间光通信精跟踪系统的模糊自抗扰控制[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1394-1400.  
CUI N, CHEN X L, CAO K R, et al.. Fuzzy active disturbance rejection control of fine tracking system for free space optical communication [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1394-1400. (in Chinese)
- [4] 王旭东, 冯海燕, 吴楠, 等. 并行翻转-正交频分复用调光控制室内可见光通信系统[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(10): 85-91.  
WANG X D, FENG H Y, WU N, et al.. PF-OFDM dimming control for indoor visible light communication systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 85-91. (in Chinese)
- [5] MARINO P P, Neri F. On the myths of optical burst switching[J]. *IEEE Transaction on Communication*, 2011, 59(9): 2574-2584.
- [6] 朱智俊, 乐孜纯. 光突发交换中的一种自适应汇聚策略[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 248-256.  
ZHU Z J, LE Z C. Adaptive assemble strategy for optical burst switching networks [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 248-256. (in Chinese)
- [7] HOU R, HE T T, LEI J, et al.. A framework of prioritized burst segmentation supporting controlled retransmission in OBS networks[J]. *AEU-International Journal Electronics Communication*, 2014, 68(1): 44-50.
- [8] YANG H, YOO S J B. All-optical variable buffering strategies and switch fabric architectures for future all-optical data routers [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2005, 23(10): 3321-3330.
- [9] HOU R, CHEN J N, HE T T, et al.. Path correlation considered prioritized burst segmentation for quality of service support in optical burst switching networks[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(4): 045005.
- [10] 柳春郁, 刘昌兴, 孟祥宇, 等. 采用动态交错聚合机制改善混合光交换网络的阻塞性能[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 323-329.  
LIU CH Y, LIU CH X, MENG X Y, et al.. Blocking improvement of hybrid optical switching networks by dynamic interlaced assembly[J]. *Opt. Pre-*

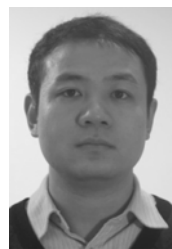
- cision Eng.*, 2016, 24(10): 323-329. (in Chinese)
- [11] SULLIVAN J, RAMOS P, VOKKARANE V. Unfairness in TCP performance over loss optical burst-switched (OBS) networks[C]. *Proc. IEEE ANTS*, New Delhi, 2009: 1-3.
- [12] ORTEGA M A, GONZALEZ A S, ARDAO J C, *et al.*. On improving fairness and providing proportional loss differentiation in OBS networks[J]. *IEEE Communication Letters*, 2010, 14(11): 1077-1079.
- [13] ORAWIWATTANAKUL T, JI Y. Analysis of probabilistic preemption-based mechanism for QoS provision in OBS networks[C]. *Proc. IEEE ICOIN*, Chiang Mai, 2009: 1-4.
- [14] UEDA M, TACHIBANA T, KASAHARA S. Intermediate-hop preemption to improve fairness in optical burst switching networks [J]. *IEICE Transaction on Communications* 2008, E91-B(3): 710-721.
- [15] TACHIBANA T, NASSAR B, KASAHARA S. Hop-based bursts-cluster transmission fairness improvement in high-performance OBS networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communication Networks*, 2011, 3(6): 542-552.
- [16] ZHOU B, BASSIOUNI M A. Concurrent enhancement of network throughput and fairness in optical burst switching environments [J]. *Photonic Network Communications*, 2007, 14(2): 199-207.
- [17] KLINKOWSKI M, CAREGLIO D, MORATO D, *et al.*. Preemption window for burst differentiation in OBS[C]. *Proc. IEEE/OSA OFC/NFOEC*, San Diego, 2008, JWA85.
- [18] ROSTAMI A, CHAKRABORTY S. On performance of optical buffers with specific number of circulations[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(7): 1570-1572.
- [19] KLINKOWSKI M, CAREGLIO D, PARETA J S, *et al.*. Performance overview of the offset time emulated OBS network architecture [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(14): 2751-2764.
- [20] YANG J R, YE H. Blocking improvement for high priority in differentiated OBS networks through preemption and buffer-limitation[J]. *Optik*, 2014, 125(6): 2813-2816.
- [21] 杨九如, 王晓飞, 柳春郁, 等. 基于流量门限的提前预留竞争解决机制 [J]. *光子学报*, 2014, 43(7): 0706019.
- YANG J R, WANG X F, LIU CH Y, *et al.*. Pre-reservation based traffic threshold for contention resolution in differentiated optical burst switching networks [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0706019.
- [22] DETTI A, ERAMO V, LISTANTI M. Performance evaluation of a new technique for IP support in a WDM optical network: Optical composite burst switching (OCBS) [J]. *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, 2002, 20(2): 154-165.

#### 作者简介:



柳春郁(1975—),女,黑龙江海林人,博士,副教授,2011年于黑龙江大学获得博士学位,主要光纤通信与光纤传感技术方面的研究。E-mail: liuchunyu@hlju.edu.cn

#### 通讯作者:



杨九如(1978—),男,黑龙江牡丹江人,博士,教授,2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事光交换网络、光纤通信、光纤有源器件的研究。E-mail: yangjr@hlju.edu.cn