

光突发交换网络能耗有效性研究

杨九如¹ 柳春郁¹ 常金龙² 丁 群¹

¹黑龙江省普通高等学校电子工程重点实验室(黑龙江大学), 黑龙江 哈尔滨 150080

²黑龙江大学电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 光突发交换(OBS)具有光旁路特性,是未来绿色光因特网的有力备选方案。OBS 的运行主要集中于边缘节点,诸多特性参数的设置均会直接影响其传输能效,但目前相关的研究鲜见报道。本文基于边缘节点低功率空闲(LPI)模型,深入分析了光信号在 OBS 中的传输过程,建立了对应的能效量化分析模型,比较了额外偏置时间(EOT)和固定聚合长度(FAS)两种竞争避免机制在目标丢弃率条件下的能效性能。数值结果表明,LPI 模型下 EOT 机制的能效特性更佳,能耗节省达 48.86%。

关键词 光通信;光突发交换;能耗有效性;低功率空闲

中图分类号 TN915 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.s105001

Energy Efficiency Research of Optical Burst Switching Networks

Yang Jiuru¹ Liu Chunyu¹ Chang Jinlong² Ding Qun¹

¹Key Laboratory of Electronics Engineering, College of Heilongjiang Province, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

²Electronic Engineering College, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract Optical burst switching (OBS) with the nature of optical bypass is one of the potential techniques for future green optical internet. Due to the fact that main operations perform at edge nodes, the energy efficiency of OBS is directly affected by parameters setting, but it has been rarely reported to date. In the article, based on low power idle (LPI), the transition of burst is comprehensively analyzed and the quantitative energy model is established. Further, the energy efficiencies of extra offset time (EOT) and fixed assembly size (FAS) are compared under the target loss probability. The numerical results show that, with LPI model, EOT is superior to FAS in energy consumption because a 48.86% saving is gained.

Key words optical communications; optical burst switching; energy efficiency; low power idle

OCIS codes 060.4510; 060.4259; 060.6719

1 引 言

温室效应的日益加剧使得人们开始关注通信网络设备的能耗问题。据统计,当前光网络能耗约占整个通信网络能耗的 12%,但 2020 年该值将攀升至 20%^[1]。诚然光接入网依旧是光网络能耗的主要来源,但随着业务与流量的激增,光骨干网络的能耗问题亦引起学者们的焦虑^[2]。研究表明,在 IP over WDM 架构光骨干网中,信号传输能耗(含发射器,中继器,接收器等)仅占总能耗的 2%~7%^[3]。亦即,边缘节点及核心节点的光信号处理过程[由于

光随机存取存储器(RAM)的缺失,需进行必要的光-电-光转换]消耗了 90%以上的能耗。

为保持光网络的“绿色”特性,使光交换网络的能耗有效节省研究成为近期的新热点。其中,“光旁路”因具有链路直通特性而被认为是一种有效的能耗节省技术^[4-6]。就目前三种主要的光交换技术而言,光电路交换(OCS)是一种典型的“旁路”技术,但较大的传输延迟与较低的带宽利用效率一直为学者们所诟病;光分组交换(OPS)被认为是理想的交换技术,但却采用“非旁路”工作模式。由于 OPS 需要

收稿日期: 2013-09-25; **收到修改稿日期:** 2013-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61302075, 61205071, 61177079)、黑龙江省自然科学基金(F201009)、中国博士后基金资助(2012M520779)

作者简介: 杨九如(1978—),男,博士,副教授,主要从事光通信网络方面的研究。E-mail: yangjr@hlju.edu.cn

在核心节点配置大量的光缓存(光纤延迟线)以实现光信号的同步与处理,其传输能耗难以令人满意。相比之下,光突发交换(OBS)作为二者的折中,在具有“旁路”特性的同时展现了良好的带宽与延迟性能。基于OBS平台的光骨干网能耗特性研究已有报道。文献[7]通过量化比较,证实了大容量(100 Tb/s)条件下OBS的传输能耗仅为OPS的50%。Bathula等^[8-9]采用“低功率空闲(LPI)”模型改善OBS核心节点的路由能效;Kang等^[10]关注LPI机制转换方式对网络能耗的影响;Zaiter等^[11]分析了突发长度与传输能耗的关系;Renuka等^[12]则以“突发链”方式简化光信号的处理过程。上述研究的局限性在于:忽视了除聚合机制以外的其他诸多参数(如跳数、预约方式、偏置时间、聚合门限等)对光信号传输能耗的影响。鉴于此,本文基于边缘节点LPI模型,深入分析OBS的聚合/解聚合过程、控制分组处理过程、光信号传输过程以及丢弃-重传

过程,量化评价多参数对于OBS网络传输能效的影响;进而引入目标丢弃率,比较了额外偏置时间(EOT)和固定聚合长度(FAS)两种典型竞争避免机制的能效特性,实现了能效与丢弃率的联合分析。

2 网络能耗分析模型

在基于恰量时间(JET)^[13]的OBS网络中,低速率的数据分组到达网络边缘节点后,将依据其目的节点被聚合成数据突发(DB)。若聚合长度/时间达到所设定的门限值,携带相关信息的突发控制分组(BCP)即被发送。BCP在核心节点(包含源节点、目的节点和若干中间节点)为对应的DB以虚链接方式单向预约信道。于是,与BCP间隔偏置时间(T_{off})后发送的DB可在从源节点到目的节点的光链路中以“旁路”形式透明传输(如图1所示)。反之,若虚链接创建失败,DB则可能遭遇丢弃。

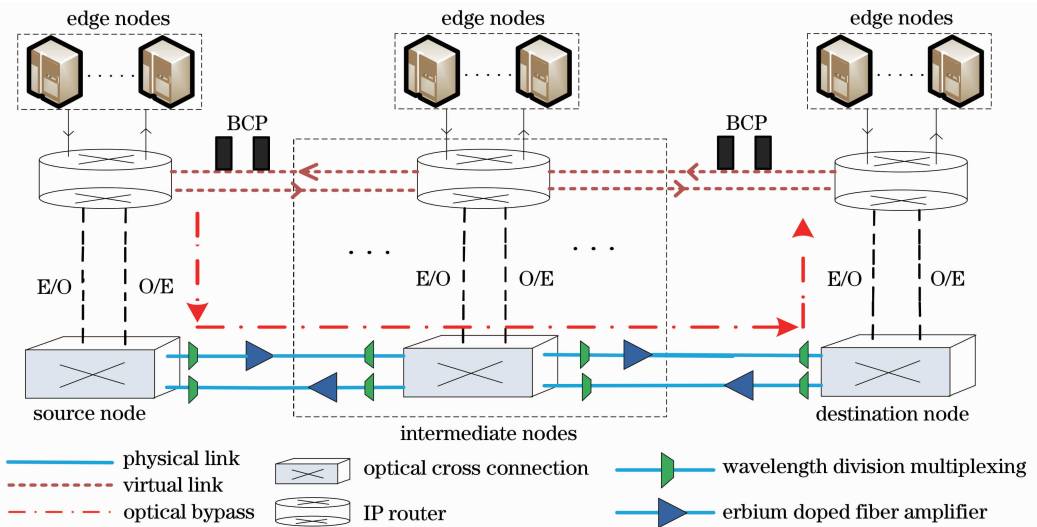


图1 OBS光旁路传输模型

Fig.1 Model of optical bypass in OBS

由上可知,光信号在OBS中的传输能耗包含四部分:1)边缘节点的聚合/解聚合能耗;2)核心节点的信号处理与转发能耗;3)光信号传输能耗;4)丢弃-重传能耗。下面依次建立各部分的能耗分析模型。

2.1 边缘节点的聚合/解聚合能耗

在OBS边缘节点,低速率的分组完成突发聚合后并非立即发送,而是经偏置时间后才以高速率转发至核心节点。由于上述过程全部在电域内进行,能耗较高。LPI模型于2010年9月被IEEE 802.3az工程组标准化,它定义了active和sleep两种工作模

式^[10]。基于LPI模型,边缘节点在“分组聚合”和“信道调度”过程中处于active模式。二者之间则是BCP预约信道过程,此时DB处于“待发送”的空闲状态,规定其工作于sleep模式(如图2所示)。显然,DB的空闲时间应为突发的偏置时间。假设DB在目的节点直接被快速解聚合,则其能耗应与分组聚合过程近似相等。于是,数据突发的边缘节点能耗可表示为

$$E_{edge} = E_{ass} + E_{idle} + E_{sched} + E_{diass}, \quad (1)$$

式中 $E_{ass} = E_{disass}$ 分别为聚合和解聚合能耗, E_{idle} 为空闲状态能耗, E_{sched} 为信道调度能耗。

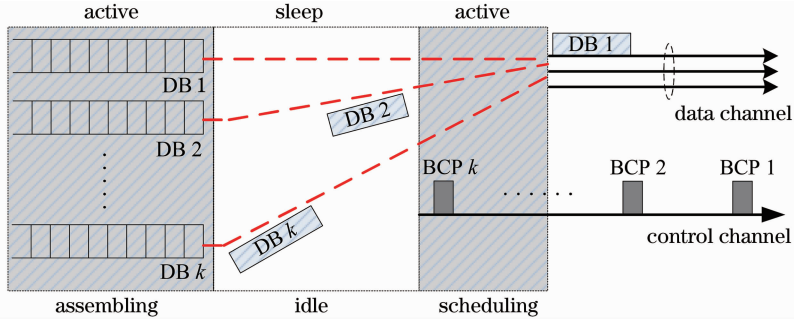


图 2 OBS 边缘节点 LPI 模型

Fig. 2 LPI model of edge nodes in OBS

进一步地,设分组的平均到达速率为 λ ,聚合的长度门限为 L_b ,则DB的聚合时间为 $t_{\text{ass}} = L_b / \lambda$ 。依据文献[7],令 e_{ass} 为单位比特分组聚合能耗,则 $E_{\text{ass}} = L_b \cdot e_{\text{ass}}$ 。设DB的传输速率为 R ,则信道调度时间可表示为 $t_{\text{schedl}} = L_b / R$,相应的能耗为 $E_{\text{schedl}} = (t_{\text{schedl}} / t_{\text{ass}}) \cdot E_{\text{ass}}$ 。类似地,空闲状态能耗可表示为 $E_{\text{idle}} = (t_{\text{off}} / t_{\text{ass}}) \cdot E_{\text{ass}} \cdot \alpha$,其中 α 定义为sleep模式与active模式的能耗比, t_{off} 则与DB所经历的跳数有关。设跳数为 h ,偏置时间可定义为 $t_{\text{off}} = t_{\text{proc}} \cdot h\beta$,其中 t_{proc} 为核心节点的BCP处理周期, β 称为比例因子,且 $\beta \geq 1$ 。显然, $\beta = 1$ 对应于 t_{off} 的最小值。整理(1)式得

$$E_{\text{edge}} = \left[\left(1 + \frac{\lambda}{R} \right) L_b + t_{\text{proc}} h\beta \cdot \alpha \right] \cdot e_{\text{ass}} \quad (2)$$

(2)式表明, E_{edge} 的值与 L_b 和 t_{off} 成正比。考虑到边缘节点能耗占整个光传输能耗的约90%以上,这意味可通过设置较小的突发聚合门限和偏置时间实现能耗节省。然而为保证DB具有较低的丢弃率,额外增加 L_b 或 t_{off} 的值是常见的竞争避免策略^[14-15]。可见,在突发丢弃率与能耗节省之间存在矛盾。

2.2 核心节点信号处理与转发能耗

当BCP到达核心节点后需经光电转换被识别与处理,进而IP路由器根据BCP内部信息,为即将到达的DB预留信道。考虑到核心节点的流量远远高于边缘节点,在核心节点运用LPI模型的意义不大。因此,OBS核心节点的能耗可表示为

$$E_{\text{core}} = (e_{\text{BCP}} + e_{\text{DB}}) \cdot h, \quad (3)$$

式中 e_{BCP} 为BCP处理能耗, e_{DB} 为光交叉连接器对DB进行转发与寻址的能耗。

2.3 光信号传输能耗

当BCP在各中间节点成功预约信道后,DB可以“旁路”形式在源-目的节点间透明传输。因此,在光信号的端-端传输过程中,其能耗仅由发射器、中

继器(含3R过程)和接收器三部分构成,对应的能耗可表示为

$$E_{\text{trans}} = E_{\text{send}} + E_{\text{EDFA}} + E_{\text{rece}}, \quad (4)$$

式中 E_{send} 是发射器能耗, E_{rece} 是接收器能耗, E_{EDFA} 是中继器能耗。设 $E_{\text{EDFA}} = A_i \cdot e_{\text{EDFA}}$,其中 e_{EDFA} 为单位中继器能耗, A_i 是链路间放大器数目。依据文献[11], $A_i = \sum_{l=1}^{h-1} \left[\frac{L_{(i,l+1)}}{l} - 1 \right] + 2$,其中 $L_{(i,l+1)}$ 表示相邻中间节点间的物理距离, l 为中继器间的平均间隔,“2”代表位于发射器和接收器端的前/后置放大器。

2.4 丢弃-重传机制

高丢弃率一直是困扰OBS的问题。一旦DB在某中间节点遭遇丢弃,“丢弃报文”被立即发送至源节点。对应地,边缘节点则需重复分组聚合、信道预约、信道调度等过程。设某流量状态下的突发丢弃率 P_d ,那么丢弃-重传过程所产生的额外能耗为

$$E_{\text{loss}} = P_d \cdot (E_{\text{edge}} + E'_{\text{core}} + E'_{\text{trans}}), \quad (5)$$

式中 $E'_{\text{core}} = h'(e_{\text{BCP}} + e_{\text{DB}})$, $E'_{\text{trans}} = E_{\text{send}} + E_{\text{rece}} + \left\{ \sum_{l=1}^{h'-1} \left[\frac{L_{(i,l+1)}}{l} - 1 \right] + 2 \right\} \cdot e_{\text{EDFA}}$, h' 为DB丢弃时已经历的跳数。进而定义 E_{edge} 、 E_{core} 和 E_{trans} 为DB传输的基本能耗,定义 E_{loss} 为额外传输能耗。联立(1)~(5)式,数据突发的端-端传输总能耗为

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} = & E_{\text{edge}} + E_{\text{core}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{loss}} = \\ & \left[\left(2 + \frac{\lambda}{R} \right) L_b + t_{\text{proc}} h\beta \cdot \alpha \right] \cdot e_{\text{ass}} + \\ & (e_{\text{BCP}} + e_{\text{DB}}) \cdot h + E_{\text{send}} + E_{\text{rece}} + \\ & \left\{ \sum_{l=1}^{h-1} \left[\frac{L_{(i,l+1)}}{l} - 1 \right] + 2 \right\} \cdot e_{\text{EDFA}} + \\ & P_d \left\{ \left[\left(2 + \frac{\lambda}{R} \right) L_b + t_{\text{proc}} h\beta \cdot \alpha \right] \cdot e_{\text{ass}} + \right. \\ & (e_{\text{BCP}} + e_{\text{DB}}) \cdot h' + E_{\text{send}} + E_{\text{rece}} + \\ & \left. \left\{ \sum_{l=1}^{h'-1} \left[\frac{L_{(i,l+1)}}{l} - 1 \right] + 2 \right\} \cdot e_{\text{EDFA}} \right\}. \quad (6) \end{aligned}$$

(6)式包含参数众多,但部分参数在数值上差别较大。如 $e_{\text{EDFA}}=0.1\sim 0.01$ nJ/b, $E_{\text{send}}=0.7$ nJ/b, $e_{\text{ass}}\approx 6.9$ nJ/b。这意味 E_{trans} 要比 E_{edge} 低 1~2 数量级^[3,7]。此外,若在任意流量状态下可将丢弃率 P_d 限制在 10^{-2} 以下,则 E_{loss} 在整个能耗中所占的比例亦可被忽略。基于上述假设,将(6)式近似简化为

$$E_{\text{total}} = E_{\text{edge}} + E_{\text{core}} + E_{\text{trans}} + E_{\text{loss}} \approx E_{\text{edge}} + E_{\text{core}} = \left[\left(2 + \frac{\lambda}{R} \right) L_b + t_{\text{proc}} h \beta \lambda \cdot \alpha \right] \cdot e_{\text{ass}} + (e_{\text{BCP}} + e_{\text{DB}}) \cdot h. \quad (7)$$

3 数值模拟与分析

在如图 3 所示的美国自然科学基金(NSF)网络拓扑中,设定 C1 为源节点,C14 为目的节点。基于最短路径路由算法,选择 3 条参考链路用作本文的能耗分析。设边缘节点的电缓存容量无限,交换机类型为 CISCO 12816;设核心节点无波长转换与光缓存设备,交换机类型为 CISCO CRS-1 路由器。特别地,设定 sleep 模式能耗为 active 模式能耗的 10% (即 $\alpha=0.1$)^[8-11],其他相关参数设置见表 1。

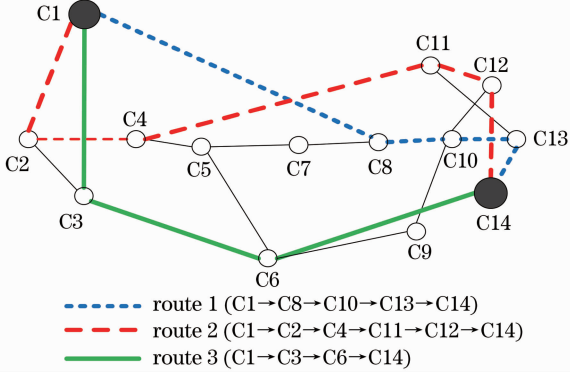


图 3 NSF 网络拓扑(14 节点)

Fig. 3 NSF network topology (14-node)

于是,以链路 1 ($h=4$) 为例,设定 $L_b=100$ kB, $\beta=1$,则不同传输速率所对应的边缘能耗如图 4 所

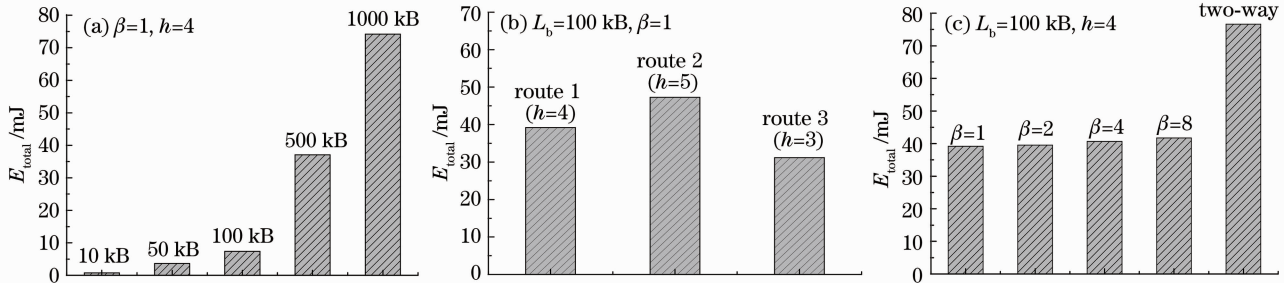


图 5 LPI 机制下 OBS 传输能耗分析。(a) 变聚合门限;(b) 变跳数;(c) 变偏置时间

Fig. 5 Analysis of energy consumption in OBS under LPI by varying. (a) Assembling length threshold; (b) hops; (c) offset time

示。数值结果表明,在 non-LPI 状态下 ($\alpha=1$),高传输速率 (40 Gb/s / 10 Gb/s) 将导致 E_{edge} 增加约 33.54%。相比之下,LPI ($\alpha=0.1$) 则实现了约 10.06% (10 Gb/s / 2.5 Gb/s) 和 30.14% (40 Gb/s / 10 Gb/s) 的能耗节省(见图 4)。可见,LPI 对于未来更高速光传输网络具有重要的实用价值。

表 1 参数设置^[3,7,16]

Table 1 Parameters setting

Parameter	Value
t_{proc}	12 μ s
λ	2.5 Gb/s / 10Gb/s
R	10 Gb/s / 40 Gb/s
e_{ass}	6.9 nJ/b
e_{BCP}	2.3 nJ/b
e_{DB}	4.2 nJ/b
Blower/cooler	3.2 nJ/b

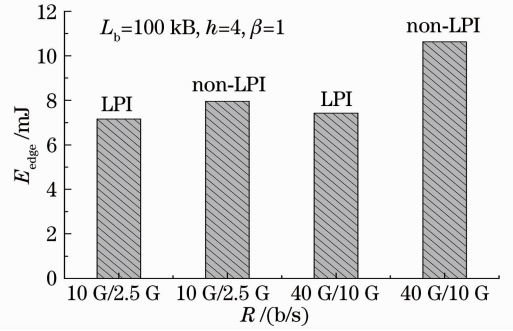


图 4 边缘节点能耗比较

Fig. 4 Comparison of energy consumption in edge nodes

进而,设 $\lambda=10$ Gb/s, $R=40$ Gb/s, $\alpha=0.1$,分析 LPI 机制下长度聚合门限 L_b 、跳数 h 和偏置时间 t_{off} 三个主要参数对 OBS 传输能耗的影响。如图 5 (a) 所示,当 $L_b < 100$ kB 时,由于聚合时间较短,其产生的边缘能耗低于 10 mJ;但随着 L_b 数值的增加,对应的 E_{edge} 迅速攀升。比较数值结果可知,当 $L_b=1$ MB 时, $E_{\text{edge}}=74.21$ mJ,该值已达图 5 (b) 中 $E_{\text{total}}(L_b=100$ kB, $h=4, \beta=1)$ 的 1.89 倍。因此,无

论从传输延迟或能耗的角度考虑,聚合门限的选择均不宜过大。图 5(b)展示了路由选择对于传输能耗的影响($L_b=100$ kB, $\beta=1$)。由数值结果可知,最佳路径(链路 3)与最差路径(链路 2)相比获得了约 34%的能耗节省。与上述结果不同的是,LPI 机制下 t_{off} 增加所导致的 E_{total} 上升却并不明显。在图 5(c)中,当偏置时间从最小值 $t_{proc} \cdot h$ 增加至 $8t_{proc} \cdot h$ 时,其对应的 E_{total} 仅增加 2.498 mJ (约占总能耗的 6.3%)。这显然应归功于 sleep 模式对于能耗的节省。而且,考虑到额外增加的偏置时间通常可令 DB 具有很低的丢弃率($10^2 \sim 10^{-6}$),所以偏置时间策略可作为缓解丢弃率与能耗间矛盾的有效方法。当然,若采用双向信道预约机制可实现“零丢弃”目标,但相应将有超 80%的传输能耗增加。

需注意的是,上述结果是在假设 $P_d < 10^{-2}$ 的前提下获得。竞争解决与竞争避免是 OBS 中降低突发丢弃率的常用方案。鉴于 OBS 的能耗主要源于边缘节点及篇幅限制,仅考 EOT^[14] 和 FAS^[15] 两种竞争避免方案在目标丢弃率($P_{d,tar}$)条件下的能耗

特性。设 $1/\mu$ 为服务时间,则载荷流量可表示为 $\rho = \lambda/W\mu$ (W 为光纤链路内的波长信道数)。进而,设定 $\rho = 0.8$ 时目标丢弃率 $P_{d,tar} = 10^{-2}$,设 $\lambda = 10$ Gb/s, $R = 40$ Gb/s, $h = 3$,于是 EOT 与 FAS 机制的传输能耗的量化比较结果如表 2 所示。特别地,为实现目标丢弃率要求,EOT 的偏置时间不少于 144 μ s (约 2 倍的聚合时间),而 FAS 则需将聚合门限设定至 200 kB 以上。由表 2 可知,无论是否采用 LPI 机制,EOT 的边缘聚合能耗与传输总能耗均低于 FAS。non-LPI 条件下,EOT 的边缘聚合能耗仅比 FAS 低 4.248 mJ,二者差别不大。但由于 EOT 的突发长度较小,其在传输总能耗上约有 27.64%的节省。与之相比,LPI 机制引入使得 EOT 的边缘聚合能耗降低约 9 mJ,对应的传输总能耗仅为 31.97 mJ,能耗节省效率则上升至 48.86%。当然,亦应注意到 EOT 需额外付出超过 100 μ s 的边缘传输延迟作为代价,因此对于某些丢弃-延迟敏感业务(如 VoIP),EOT 方案具有一定的局限性。

表 2 目标丢弃率($P_{d,tar} = 10^{-2}$)条件下传输功耗比较

Table 2 Comparison of energy consumption under $P_{d,tar} = 10^{-2}$

	L_b	β	t_{off}/μ s	E_{edge}/mJ		E_{total}/mJ	
				non-LPI	LPI	non-LPI	LPI
EOT	100 kB	4	144	17.132	8.133	40.969	31.97
FAS	200 kB	1	36	21.38	14.83	69.06	62.51

4 结 论

将 LPI 机制引入到 OBS 的边缘节点,研究了数据突发的端-端传输过程,建立了对应的近似能耗分析模型,量化分析了传输速率、聚合门限、偏置时间与路由选择等参数对传输能耗的影响,比较了目标丢弃率条件下 EOT 与 FAS 两种竞争避免方案的能效特性,证实了 EOT 方案的能耗节省特性,实现了阻塞率与能耗的联合分析。

参 考 文 献

- 1 Guo Aihuang, Xue Lin. Recent research progress in green IP over WDM network [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(7): 070001.
郭爱煌, 薛琳. 绿色 IP over WDM 网络研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(7): 070001.
- 2 Hu Weisheng, Sun Weiqiang, He Hao, et al.. Time structure and space structure of optical switching [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(1): 010001.
胡卫生, 孙卫强, 何浩, 等. 光交换的时间及空间结构分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012 49(1): 010001.
- 3 R S Tucker. Green optical communications—Part II: energy limitations in networks [J]. IEEE J Sel Top Quantum Electron,

- 2011, 17(2): 261–274.
- 4 G Shen, R S Tucker. Energy-minimized design for IP over WDM networks[J]. J Opt Commun Netw, 2009, 1(1): 17–186.
- 5 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.
- 6 Sun Weiqiang, Li Pingqing, Li Chao, et al.. Seamlessly transformable hybrid packet and circuit switching for efficient optical networks[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(1): 010601.
- 7 S Peng, K Hinton, J Baliga, et al.. Burst switching for energy efficiency in optical networks[C]. OFC/NFOEC 2010. OWY5.
- 8 B G Bathula, J M H Elmighani. Energy efficient optical burst switched (OBS) networks [C]. IEEE Global Communication Conference, 2009. 1–6.
- 9 W Yang, J Jung, Y Kim. Performance evaluation of energy saving in core router architecture with low power idle for OBS networks[C]. ICOIN, 2012. 318–323.
- 10 D Kang, W Yang, J Jung, et al.. Wake transition decision algorithm for energy saving in OBS network with LPI [C]. ICCNC, 2012. 527–531.
- 11 M J Zaiter, S Yussof, A Abdelouhahab, et al.. On the energy consumption in optical burst switching (OBS) networks [C]. ISCAIE, 2012. 233–236.
- 12 R Renuka, V Kavitha. OBSCS: High performance burst transmission for achieving energy consumption [C]. ICECCN,

2013. 410—414.
- 13 Hou Rui, He Tingting, Mao Tengyue. Burst-segmentation-based and path-correlation-considered controlled retransmission scheme in optical burst switching networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(7): 0706025.
- 侯 睿, 何婷婷, 毛腾跃. 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[J]. *光学学报*, 2013, 33(7): 0706025.
- 14 M Yoo, C Qiao, S Dixit. QoS performance of optical burst switching in IP-over-WDM networks[J]. *IEEE J Selected Area in Commun*, 2000, 18(10): 2062—2071.
- 15 S Oh, H Hong, M Kang. A data burst assembly algorithm in optical burst switching networks[J]. *J ETRJ*, 2002, 24: 311—322.
- 16 M Klinkowski, D Careglio, J S Pareta, *et al.*. Performance overview of the offset time emulated OBS network architecture [J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(14): 2751—2764.

栏目编辑: 王晓球