

# 基于模拟光突发交换结构的星载光网络资源预留机制研究

李瑞欣 赵尚弘 朱蒙 李勇军 张晓燕 康巧燕

空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077

**摘要** 为了适应可实现性强、稳健性高的卫星光交换网络,选择模拟偏置时间光突发交换(E-OBS)作为转发卫星的激光通信架构,并结合现有的地面光交换资源预留方法,提出了一种偏置时间固定的资源预留机制。通过流量估计把突发数据按照目的地址和服务质量(QoS)区分为单个突发和突发流,按照分类对卫星光网络资源进行了成功预留,并建立了平均端-端时延、吞吐量、链路利用率、丢包率数学分析模型。理论分析与仿真证明,该资源预留方法通过突发流机制降低了光交换矩阵的重置时间和交换时延,通过E-OBS架构降低了核心节点控制复杂度和对边缘节点的缓存需求,提高了网络吞吐量,适用于星载光交换网络。

**关键词** 光计算;星载光交换;模拟光突发交换;突发流;资源预留机制

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.022001

## Research of On-Board Satellite Optical Switching Resource Reservation Protocol based on E-OBS Architecture

Li Ruixin Zhao Shanghong Zhu Meng Li Yongjun Zhang Xiaoyan Kang Qiaoyan

Information and Aviation Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China

**Abstract** To meet the requirements of satellite laser switching network, such as fine robustness and high physical realizability, emulated-optical burst switching (OBS) is selected as the architecture of relay satellite, and an on-board resource reservation protocol, whose offset time is constant, is proposed combining the ground resource reservation methods. Traffic prediction is used to differentiate the data burst into single burst or burst stream according to the destination and quality of service (QoS), then resource reservation is accomplished successfully. To validate it, mathematic models of mean end-end delay, throughput, link utility and burst loss probability are established. The results of analysis and emulation show that the protocol can reduce the reconfiguration time and switching time of optical switch matrix through burst stream scheme, and decrease the complexity and cache size requirement through the E-OBS architecture, so the new resource reservation protocol meets the requirements of satellite laser communication.

**Key words** optics in computing; on-board optical switching; emulated-optical burst switching; burst stream; resource reservation protocol

**OCIS codes** 200.2610; 200.4560; 200.6715; 250.6715

## 1 引言

在三种光网络技术即光路交换(OCS)、光分组交换(OPS)和光突发交换(OBS)中,OBS技术<sup>[1]</sup>具有交换粒度适中、灵活性较强和实现难度适中等优点,是在未来光网络中最具可实现性的一种交换技术,所以文献[2]提出运用OBS作为未来卫星光网络的交换技术。OBS技术使用一个带外波长为突发数据,并对其进行资源预留,这样光突发数据分组在数据信道中通过交换节点时无需进行光-电-光(O/E/O)转换和光缓存,光突发数据分组就可以完全在光域内完成,实现了高速光数据分组的交换,因此资源预留算法的优劣对OBS

收稿日期: 2014-08-26; 收到修改稿日期: 2014-09-09; 网络出版日期: 2015-01-13

基金项目: 国家自然科学基金(61231012,61201209)、陕西省自然科学基金(2010JM8014)

作者简介: 李瑞欣(1973—),女,博士研究生,主要从事天基信息系统和交换技术方面的研究。E-mail: cftgeh@sina.com

导师简介: 赵尚弘(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事卫星光通信技术方面的研究。E-mail: shzhao@yahoo.com

网络性能影响很大。若在卫星光网络中使用 OBS 技术,也必然要设计合适的资源预留机制,因此资源预留算法是星载 OBS 光交换网络中的关键技术之一。

OBS 网络概念建立之初,人们实际上提出了两种不同控制体系结构<sup>[9]</sup>:传统 OBS(C-OBS)和模拟偏置时间 OBS(E-OBS),它们的区别在于控制面架构。资源预留算法如 JET(Just-Enough-Time)、JIT(Just-in-Time)、Horizon、LAUC(Latest Available Unscheduled Channel)、LAUC-VF(Latest Available Unused Channel with Void Filling)、DRR(Differentiated Resource Reservation)、基于窗口的资源预留<sup>[4-10]</sup>等在任何一种架构上都可以完成所需资源的提前预订,但选择哪一种架构是要考虑的一个问题。本文选择 E-OBS 架构作为卫星光交换网络的研究基础,针对星上资源有限、光接收功率较小、误码率较高<sup>[11-12]</sup>且卫星节点数目有限,通信时间受限、星上业务单一、突发性较大、光缓存性能有限,且数据连续传输的概率较大、公平性和时延等实际因素,设计了一种基于突发流的星载 E-OBS 网络资源预留算法,建立了理论分析模型,仿真分析证明,该算法吞吐量较大,且在负载较高时具有较高的资源预留成功率,从而使得端-端时延有较好的性能。

## 2 星载 E-OBS 光交换核心节点结构的选择

C-OBS 和 E-OBS 的不同在于控制平面中偏置时间的设置<sup>[13]</sup>。C-OBS 采用了软方式(soft-way),即先发送突发控制包(BCP),偏置时间过后再发送突发数据包(BDP);而 E-OBS 使用了硬方式(hard-way),BCP 和 BDP 同时发送,E-OBS 在核心节点输入端增加了 ODM(optical drop multiplexer)和 FDU(fiber delay unit)来达到设置偏置时间的目的。ODM 把控制信道和数据信道分离,把 BCP 送入交换控制器(SC);FDU 对 BDP 进行延迟,使 BCP 进行资源预留。选用可变延迟(FDL)组成 FDU,可根据需要确定延迟的时间。除此之外,FDU 的再生光信号功能也可为长距离传输提供色散补偿<sup>[14-15]</sup>。卫星间相距遥远,星间链路存在周期性中断<sup>[16]</sup>,且光信号经过长距离传输之后会有较大的衰减<sup>[17-18]</sup>,在进入光交换机之前必须进行信号的补偿再生,而 FDU 刚好可以提供这样的功能。

C-OBS 结构简单而经济,但管理和控制复杂。每一核心节点都对偏置时间进行修改,偏置时间连续可变;越接近目的节点偏置时间越短,一旦产生资源竞争,丢包率越容易上升。相比 C-OBS,E-OBS 不修改偏置时间,减小了硬件与控制机制的要求,具有控制复杂度小的优势(包括路由管理和节点处理),但增加了硬件成本。在卫星光网络中,卫星一旦发射升空之后很难对其进行修改完善,从系统稳健性方面考虑,希望管理和控制简单。E-OBS 地面验证证明系统性能并没有因此受到影响,且公平性较好,减小了边缘节点对缓存空间的要求<sup>[19]</sup>,这些优点正好符合星上交换系统的现实需要。综合这两种节点的结构和星载交换系统复杂度要求,这里选用 E-OBS 作为星载光交换核心节点的结构,星载 E-OBS 核心节点结构设计如图 1 所示。

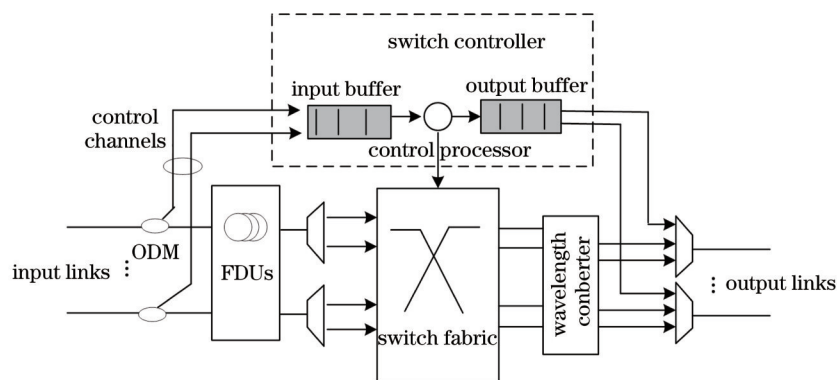


图 1 星载 E-OBS 核心节点结构图

Fig.1 On-board E-OBS core node structure

## 3 以突发流为预留单位的星载 E-OBS 网络资源预留算法(E-OBSRR)

考虑到卫星光网络的特殊性,卫星网络中业务的发送具有较大的连续性和突发性,所以使用了“突发流”的思想,减少了对核心节点的资源预留的操作,简化了预留过程,达到了“一次预留,多次应用”的目的,降低了算法复杂度和端-端时延,提高了资源利用率。这里把突发数据包区分为单个突发和突发流。单个

突发就是某些路由相同、服务质量(QoS)相同的IP包的数据量只能组装成一个突发包,突发流就是在某段时间内某一业务的数据量较大,能够组装成多个突发包,这些突发包的路由相同且连续发送。

假设BDP为定长突发包,在速率一定的情况下,若为单个突发包(标志域最高位为1),由BCP按照LAUC进行资源预留,延迟时间一到,突发包就从FDU直接送入交换矩阵进行交换即可。若为突发流(标志域最高位为0)的第一个数据包(标志域为011),BCP进行预留,并且在第一个包交换完成之后,不释放资源(直到标志位为000的BDP交换完成之后才释放所占用的资源)。这样下一个突发包来到时只是等到前一个突发包交换完成之后就提前从FDU送入光交换机,提前的时间等于FDU的延迟时间 $T_{FDU}$ 减去BCP包的处理的需要时间 $T_{proc}$ ,即 $(T_{FDU} - T_{proc})$ 。预留成功,则采用反馈证实机制,即在BDP离开边缘节点(EN)之前返回否定证实消息(NACK),取消该突发数据包的预留调度计划,将其重新缓冲排队以备再次调度发送。这样可以尽量为BDP提供可靠的传输,减少BDP的丢失。整个预留过程的流程如图2所示。

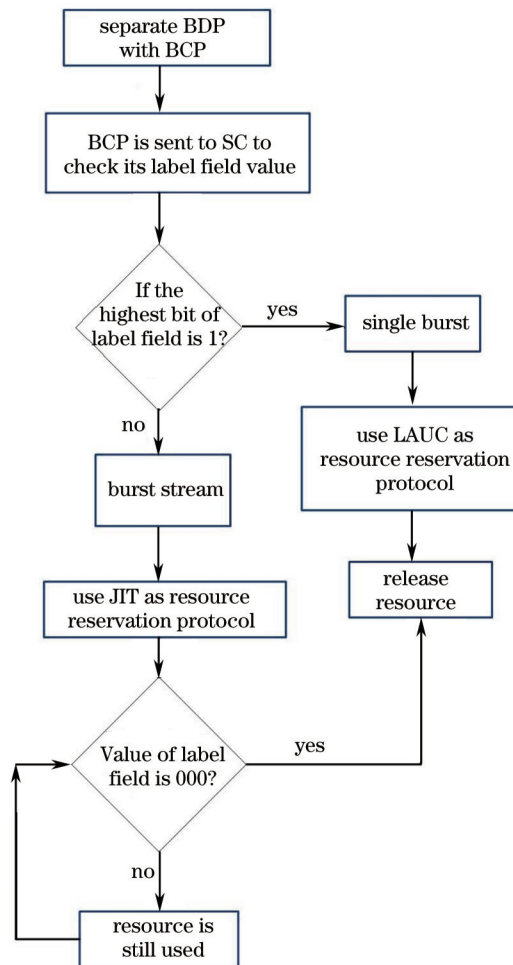


图2 基于突发流的星载E-OBS网络资源预留流程图

Fig.2 Flow chart of resource reservation based on E-OBS

突发流的资源预留方式复杂度为 $O(\lg m)$ ,  $m$ 为单波长的空隙数量。一旦预留成功,后续突发包的BCP就不用再进行资源预留,成功率为100%,平均下来,其预留成功率较高,而整体复杂度较C-OBS下的JET低。

## 4 数学分析模型

### 4.1 吞吐量模型

在以上资源预留情况下,定义吞吐量为单位时间内平均发送的突发数。这里研究核心节点的吞吐量。根据文献[19]的研究,假设核心节点具有部分波长转换能力 $(0 < \gamma < 1)$ ,  $\gamma$ 为能变换的波长数与总波长数之比,总波长数为 $W$ ,数据信道波长数为 $w$ 个,则控制信道波长数为 $(W - w)$ 。当数据突发为突发流中的第一个突发包或不属于突发流时,资源预留和调度算法需要为该突发选择数据信道中的某个波长来转发该突

发,此时核心节点的资源预留过程可以看作一个  $M/M/w/w$  马尔科夫生灭过程。设系统中突发包的到达率为  $\lambda$ , 服务速率为  $\mu$ , 则该系统的状态转移图如图3所示。

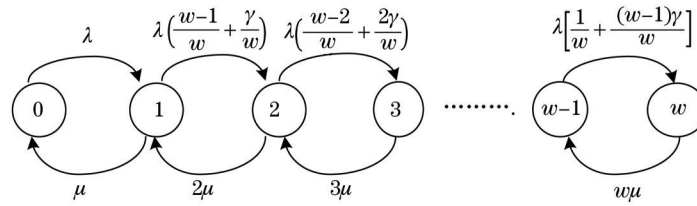


图3 星载光交换网络核心节点状态转移图

Fig.3 State diagram for on-board optical switching network core node

在这种情况下,生的概率  $b_i = P\{X_{n+1} = i + 1 | X_n = i\} = \frac{\lambda(w-k)}{w}$ ,  $k$  为正处于“忙”状态的波长数。则稳态概率

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{\lambda}{\mu} \\ 1 + \frac{\lambda}{\mu} + \sum_{j=2}^w \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^j \frac{1}{j!} \prod_{i=1}^{j-1} \left(\frac{w-i}{w} + \frac{i\gamma}{w}\right) \end{cases}, k=1$$

$$\pi_k = \begin{cases} \frac{(\frac{\lambda}{\mu})^k \frac{1}{k!} \prod_{i=1}^{k-1} \left(\frac{w-i}{w} + \frac{i\gamma}{w}\right)}{1 + \frac{\lambda}{\mu} + \sum_{j=2}^w \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^j \frac{1}{j!} \prod_{i=1}^{j-1} \left(\frac{w-i}{w} + \frac{i\gamma}{w}\right)} \end{cases}, k \geq 2 \quad (1)$$

则非突发流吞吐量可表示为

$$\beta = \sum_{k=0}^w k \pi_k. \quad (2)$$

若某突发包在突发流中的序号大于等于2时(标志域中“011”表示宏突发中第一个数据突发;“001”表示数据突发处于中间位置),该突发包不需要等待调度,直接使用资源预留过的波长进行传输就可以了,其吞吐量等于到达率乘以时间。设突发流持续时间为  $t$ , 则突发流持续期间产生的吞吐量为  $\lambda t$ 。

假设突发流在某段时间  $T$  中所占平均比例为  $R$ , 则非突发流所占比例为  $1-R$ , 则在时间  $T$  内产生的吞吐量  $\beta_T$  大致可表示为

$$\beta_T = R \left[ \frac{\lambda}{\mu} \right] + \lambda t + (1-R) \sum_{k=0}^w k \pi_k. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,突发流比例  $R$  越大,(3)式第一部分所产生的吞吐量越大,第二部分产生的吞吐量越小,则整个吞吐量就增长得越快,故基于突发流的资源预留方法在一定程度上提高了系统的吞吐量。

#### 4.2 端到端平均时延

不失普遍性,以不定长的突发包(使用混合门限组装算法)为例建立核心节点平均时延分析模型。依据文献[9]的研究,使用混合门限算法对IP数据包进行组装后,输出的突发包长度分布可近似于Poisson过程。 $K$  为系统的总的波长数,  $k$  为控制信道的波长数,此处假设边缘节点的电缓存足够大,可以缓存一段时间内到达的IP包。

若组装后的突发包是连续的突发流,则除了第一个突发包之外,从第二个突发包开始的后续突发包只需要检测标签值即可,所以其调度时延几乎为0,所以在这种情况下的总的调度时延约等于第一个突发包的调度时延。若突发为单个突发包或突发流的第一个数据包,则会根据突发包的优先级首先依次选择其对应的信道,若对应信道空闲则传送。此时所需的调度时延是LAUC-VF算法的调度时延,假设为  $t_{LAUC}$ 。在突发包调度服务时间服从指数分布的规律,这种情况下的调度过程可近似认为是  $M/M/(K-k)$  系统。假设组装后到达调度器(scheduler)的平均突发数为  $N$ , 假设组装速率(到达率)为  $\lambda$ ,  $P_q$  为突发组到达调度器之后数据信道暂时没有空间而必须等待的概率,  $\rho_i$  为单波长信道的业务量强度,则平均调度时延

$$T = N/\lambda = \rho_i P_q / [\lambda(1 - \rho_i)], \quad (4)$$

式中  $P_q$  为突发组到达调度器之后数据信道暂时没有空闲而必须等待的概率, 根据 Erlang C 公式<sup>[20]</sup>,  $P_q$  可表示为

$$P_q = \{p_0[(K-k)\rho_i]^{K-k}\} / \{(1-\rho_i)(K-k)!\}, \quad (5)$$

则把(5)式代入(4)式, 可得

$$T = N/\lambda = \rho_i P_q / [\lambda(1 - \rho_i)] = \frac{\rho_i p_0 [(K-k)\rho_i]^{K-k}}{\lambda(1-\rho_i)^2 (K-k)!}. \quad (6)$$

对于突发数据包来说, 在核心节点是以“直通”的方式进行交换, 在核心节点除了在 FDU 处的延迟外, 只有一个光交换过程, 所以核心节点的延时  $T_{\text{core}} = T_{\text{switch}} + T_{\text{FDU}}$ 。

若一个突发包在网络中经过了  $H$  个核心节点, 2 个边缘节点, 则平均端到端时延可表示为  $T_{\text{ETE}} = 2T_{\text{edge}} + HT_{\text{core}}$ 。

假设  $T_a$  为边缘节点处突发包的组装时间,  $T_q$  为调度时间。则总的端-端延时的范围可表示为

$$T_{\text{ETE}} = 2(T_a + T_q + T_{\text{off}}) + H(T_{\text{switch}} + T_{\text{FDU}}), \quad (7)$$

把  $T_a$  表达式代入(7)式, 则得到:

$$T_{\text{ETE}} = 2 \left\{ D_{\text{FAT}}^{\text{mean}} \sum_{n=1}^{B_{\text{th}}-1} \frac{(\lambda T_a)^n}{n!} \exp(-\lambda T_a) + D_{\text{FBL}}^{\text{mean}} \left[ 1 - \sum_{n=1}^{B_{\text{th}}-1} \frac{(\lambda T_a)^n}{n!} \exp(-\lambda T_a) \right] + \frac{\rho_i p_0 [(K-k)\rho_i]^{K-k}}{\lambda(1-\rho_i)^2 (K-k)!} + T_{\text{off}} \right\} + H(T_{\text{switch}} + T_{\text{FDU}}), \quad (8)$$

式中  $D_{\text{FAT}}^{\text{mean}}$  为基于时间门限组装算法的平均组装时延,  $D_{\text{FBL}}^{\text{mean}}$  为基于长度门限组装算法的平均值,  $B_{\text{th}}$  为混合门限组装算法中的长度门限。

实际上, 除去突发流的第一个包需要在 FDU 中延迟一定的时间等待预留外, 突发流中的其他包只需在 FDU 中延迟的时间  $T_{\text{FDU}}$  大于等于 BCP 的处理时间  $T_{\text{proc}}$  即可。所以, 在设置了可变延迟功能的 FDU 的情况下, (8)式的端到端延迟值还可以进一步减小。在这种情况下, (8)式可以写作

$$T_{\text{ETE}} = 2 \left\{ D_{\text{FAT}}^{\text{mean}} \sum_{n=1}^{B_{\text{th}}-1} \frac{(\lambda T_a)^n}{n!} \exp(-\lambda T_a) + D_{\text{FBL}}^{\text{mean}} \left[ 1 - \sum_{n=1}^{B_{\text{th}}-1} \frac{(\lambda T_a)^n}{n!} \exp(-\lambda T_a) \right] + \frac{\rho_i p_0 [(K-k)\rho_i]^{K-k}}{\lambda(1-\rho_i)^2 (K-k)!} \right\} + H(T_{\text{switch}} + T_{\text{FDU}}). \quad (9)$$

## 5 仿真及分析比较

为了考察星载 E-OBS 网络的资源预留性能, 使用该算法进行资源预留仿真, 并和相同条件下 JIT、JET、LAUC-VF、DRR 算法仿真结果进行比较。假设突发数据 BDP 以泊松过程到达, 到达率为  $\lambda$ , BDP 的长度服从  $1/\mu=100 \mu\text{s}$  的指数分布, 边缘节点 (LEO) 组装算法使用混合门限方式, 假设最短汇聚时间为  $50 \mu\text{s}$ , 最长汇聚时间为  $100 \mu\text{s}$ ; 最短汇聚突发包长度为 500 byte, 最长汇聚突发包长度为 1500 byte, JIT、JET、LAUC-VF、DRR 算法偏置时间为  $30 \mu\text{s}$ 。核心节点 (GEO) 有 4 个输入、输出端口, 每个端口有 4 个波长, 其中 3 个数据信道波长, 1 个控制信道波长, 信道传输速率为 2.5 Gb/s, 每个突发数据到各个输出端口的概率相同。假设该卫星光网络有 6 个边缘节点, 2 个核心节点, 目的地址在边缘节点之间均匀分布, 边缘节点和核心节点之间平均相距 30000 km。边缘节点使用了基于线性预测滤波器<sup>[21-22]</sup>流量预测算法。假设此时 E-OBSRR 中突发流的比例  $R=0.5$ , 每个 FDU 的长度为 30 km, 当突发包处于突发流的中间或结尾时, 此时使用可变的 FDU 长度, 此处统一假设为 5 km, 使其足够能完成 BCP 的处理 (一般处理时间为  $10 \mu\text{s}$ )。在相同的环境条件下使用不同的资源预留方法进行了仿真。图 4 为各算法的平均端到端时延比较。

从图 4 的仿真结果可以看出, 虽然在每个输入接口处 E-OBSRR 都设置了一定的 FDU 来提供偏置时间, 但是这些时间与传播时间相比, 还是相当的小, 几乎可以忽略, 所以在负荷较小的情况下, 其端到端的性能与其他协议类似。相比 JIT、JET 和 LAUC-VF 协议, JIT 协议时延最大, 原因在于 JIT 协议是显示建立和显示拆除的, 中间节点只有收到 RELEASE 消息时, 才将预留的信道资源释放, 这也造成了后续数据包等待时间较长, 从而导致端-端时延性能不佳。JET 和 LAUC-VF、DRR、OBS-RR 算法都是属于估算建立/估算拆除方式, 所以在时延性能上比 JIT 要好。而 E-OBSRR 时延与 LAUC-VF 相似, 只是在负载量较大的情况下性能最好, 说明随着突发流的增多, E-OBSRR 在资源预约上的优势较大, 性能相比 JIT、JET、LAUC-VF、DRR

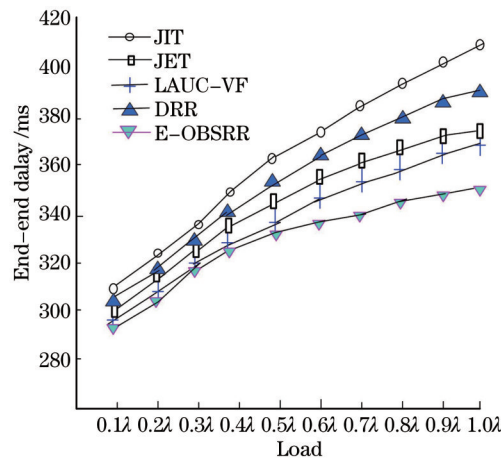
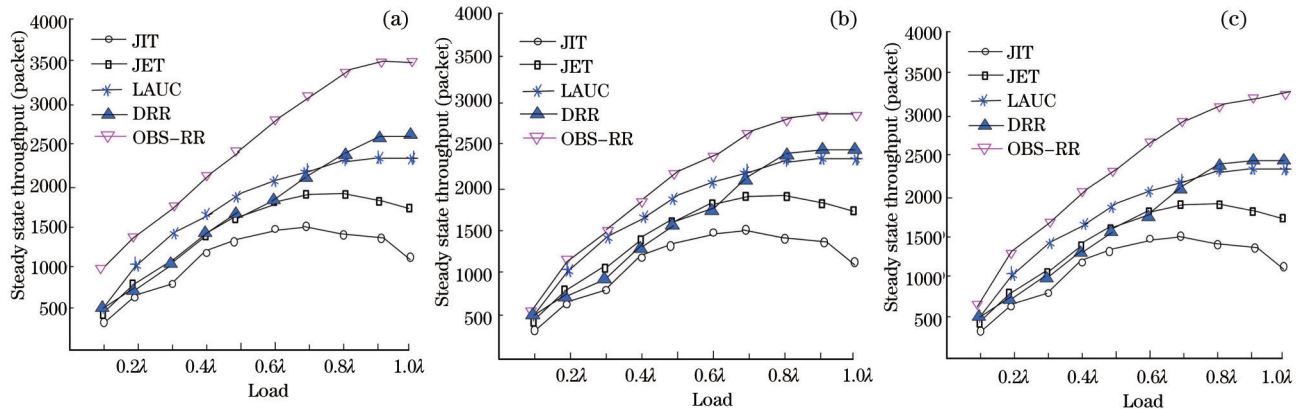


图4 不同资源预留协议下的端-端时延比较

Fig.4 Comparison of end-end delay

有了较大的提高。DRR算法为了形成宏突发在边缘节点处有一定的等待时间,而E-OBSRR没有设置等待时间,所以在突发流较多的情况下它在核心节点的调度时间几乎为0,故它的时延性能更好。

图5为稳态吞吐量与负载率在不同突发流比例下的关系图。从图中可以得到,不论突发流在整个负载中的比例为多少,它的吞吐量性能都较其他资源预留协议好很多,性能最差的是JIT,其次是JET、LAUC、DRR。随着相同目的地址数据包的增多,连续突发流的比例也在增大,这样DRR和OBS-RR的吞吐量也随之逐渐上升,但是OBS-RR吞吐量增加更为明显,原因在于:1)它没有为了形成突发流而设的“人为”延时,而DRR算法因人设有一定的延时,吞吐量受到了一定的影响;2)突发流比例越大,在FDU延迟上、交换矩阵的配置上和调度上得到的“好处”越多,同时在吞吐量的增加程度上得到了体现,从而也验证了前面的理论分析。

图5 稳态吞吐量比较。(a)  $R=0.1$ ; (b)  $R=0.5$ ; (c)  $R=0.8$ Fig.5 Comparison of steady state throughput. (a)  $R=0.1$ ; (b)  $R=0.5$ ; (c)  $R=0.8$ 

## 6 结 论

基于卫星光交换网络的特殊情况,提出了一种基于E-OBS网络架构及突发流的资源预留方法。理论建模和仿真分析表明,这种方法在负载比较大,数据包目的地址一致的连续数据流情况下与C-OBS性能类似,在突发流比例较大时吞吐量和丢包率、时延性能尤为突出,且减小了对边缘节点缓存的要求和对偏置时间进行管理的难度。但是它也增加了核心节点的系统硬件复杂度。未来卫星光网络主要是为应用卫星转发多媒体数据服务,而这些数据几乎都具有突发性大、目的地址较为单一的特点,所以该资源预留方法可以为数据中继转发卫星的硬件设置和预留方案的设计提供一定的参考。下一步的工作是研制E-OBS结构的实验设备,进一步验证算法设计。

## 参 考 文 献

- 1 C Qiao. Labeled optical burst switching for IP-over-WDM integration [J]. IEEE Communication Magazine, 2000, 38(9):

- 104-114.
- 2 Li Ruixin, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, *et al.*. Research of on-board optical/electric switching of broadband multimedia satellite [C]. Beijing: 4th IET International Conference on Wireless, Mobile & Multimedia Networks, 2011. 22-25.
  - 3 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.
  - 4 I Baldine, G N Rouskas, H G Perros, *et al.*. Jump Start: A just-in-time signaling architecture for WDM burst-switched networks [J]. *IEEE Communication Magazine*, 2002, 40(2): 82-89.
  - 5 M Yoo, C Qiao. Just-enough-time (JET): A high speed protocol for bursty traffic in optical networks [C]. Montreal: IEEE/LEO Conference on Technologies for a Global Information Infrastructure, 1997. 26-27.
  - 6 Y Xiong, M Vandenhouste, H C Cankaya. Control architecture in optical burst-switched WDM networks [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2000, 18(10): 1838-1851.
  - 7 M A Aydin, T Atmaca, H Zaim, *et al.*. Performance study of OBS reservation protocols [C]. Athens: Fourth Advanced International Conference on Telecommunications, 2008. 428-433.
  - 8 J A Hernandez, J Aracil, L de Pedro. Analysis of blocking probability of data bursts with continuous-time variable offsets in single-wavelength OBS switches [J]. *J Lightwave Technol*, 2008, 26(12): 1559-1568.
  - 9 Li Ruixin, Zhao Shanghong, Liu Zhenxia, *et al.*. An on-board optical switching data channel scheduling algorithm based on burst stream [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1105004.  
李瑞欣, 赵尚弘, 刘振霞, 等. 基于突发流的星载光交换数据信道调度算法[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1105004.
  - 10 Guan Aihong, Wang Boyun, Fu Hongliang. A resource reservation mechanism based on window in emulated-optical burst switching networks [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2011, 22(7): 1007-1012.  
管爱红, 王波云, 傅洪亮. E-OBS网络中一种基于窗口的资源预留机制[J]. *光电子·激光*, 2011, 22(7): 1007-1012.
  - 11 Bi Jinzi, Ma Xiuhua, Chen Weibiao, *et al.*. Experimental study of space-borne all-solid-state laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 448-451.  
毕进子, 马秀华, 陈卫标, 等. 星载全固态激光器的实验研究[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(3): 448-451.
  - 12 Wu Chongqing. Study on fiber-delay-line-based buffer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900116.  
吴重庆. 光纤延迟线型全光缓存器的研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900116.
  - 13 M Klinkowski, D Careglio, J Sole-Pareta. Comparison of conventional and offset time-emulated optical burst switching architectures [C]. Nottingham: 2006 International Conference on Transparent Optical Networks, 2006. 47-50.
  - 14 A Al Amin, K Shimizu, M Takenaka, *et al.*. 40/10 Gbps bit-rate transparent burst switching and contention resolving wavelength conversion in an optical router prototype [C]. Cannes: Proc ECOC 2006. 1-2.
  - 15 Fiber Delay Coils [OL]. <http://www.generalphotonics.com/DelayCoil.htm>.
  - 16 Wu Feng, Yu Siyuan, Zhou Jie, *et al.*. Analysis of the stability of bidirectional beam tracking in inter-satellite optical communication [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1105003.  
武 凤, 于思源, 周 洁, 等. 星间光通信链路双向光束稳定跟踪约束条件分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1105003.
  - 17 Wu Jili, Zhao Shanghong, Li Yongjun, *et al.*. Quantum limits of far-field beam pointing accuracy in space [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(1): 0106004.  
吴继礼, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间远场光束对准精度的量子极限[J]. *光学学报*, 2011, 31(1): 0106004.
  - 18 Jiang Huilin, Hu Yuan, Ding Ying, *et al.*. Optical principle research of space laser communication network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1006003.  
姜会林, 胡 源, 丁 莹, 等. 空间激光通信组网光学原理研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1006003.
  - 19 M H S Morsy, M Y S A Sowailam, H M H Shalaby. Performance of analysis of a core node equipped with wavelength converter pool in an optical burst switched network [C]. Doha: 2010 IEEE 17th International Conference on Telecommunications, 2010. 516-522.
  - 20 M Yoo, C Qiao, S Dixit. QoS performance of optical burst switching in IP-over-WDM networks [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2000, 18(10): 2062-2071.
  - 21 D Morato, J Aracil, L A Diez, *et al.*. On linear prediction of Internet traffic of packet and burst switching networks [C]. Pamplona: Proceedings of 10th International Conference on Computer Communications and Networks, 2001. 138-143.
  - 22 J Liu, N Ansari, T J Ott. FRR for latency reduction and QoS provisioning in OBS networks [J]. *IEEE J Sel Areas Commun*, 2003, 21(7): 1210-1219.