

基于突发流的星载光交换数据信道调度算法

李瑞欣 赵尚弘 刘振霞 庄绪春 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 根据卫星光交换网络应用需求, 借鉴现有的地面光交换信道调度算法, 综合考虑资源预留和调度算法, 提出了一种基于突发流资源预留的星载光交换信道调度算法。通过流量估计把突发数据按照目的地址和突发区服务质量(QoS)区分为单个突发和突发流, 并分类进行资源预留。把数据信道按照优先级划分成不同的信道。不同优先级的突发包先搜索对应级别的信道, 高优先级的或者突发流可以抢占低优先级的信道。理论分析与仿真比较证明, 该算法不但降低了光交换矩阵的重置时间和交换时延, 也提高了链路利用率。复杂度在最坏情况下与可插空最近可用未调度信道(LAUC-VF)方式相同, 丢包率在负载为 0.5 时平均达到 10^{-7} , 适用于星载光交换系统。

关键词 光计算; 卫星光网络; 星载光交换; 突发流; 资源预留; 信道调度算法

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1105004

An On-Board Optical Switching Data Channel Scheduling Algorithm Based on Burst Stream

Li Ruixin Zhao Shanghong Liu Zhenxia Zhuang Xuchun
Zhang Xiaoyan Kang Qiaoyan

(School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract According to the requirements of satellite optical switching network, an on-board optical switching scheduling algorithm based on data burst stream resource reservation is proposed combining the ground optical scheduling algorithm considering resource reserve and scheduling algorithm. Flow-estimation prediction is used to differentiate the data burst into single burst and burst stream according to the destination address and emergency package quality of service (QoS), and then resource reservation with different classifies is accomplished. The data channels are classified into different channels according to priorities. Different kinds of data bursts search the corresponding level channel, but high priority burst or burst stream can reave low level channels. From the comparison results of analysis and simulation, the reconfiguration time and switching time delay of optical switching matrix are not only lowed, but also the channel utility is improved. The algorithm complexity is also the same as latest available unscheduled channel with void filling in the worst condition. Packet loss rate is 10^{-7} on average when the load is 0.5, so the algorithm meets the requirements of optical satellite communication.

Key words optics in computing; satellite optical network; on-board optical switching; burst stream; resource reserve; channel scheduling algorithm

OCIS codes 200.2610; 200.4560; 200.6715; 250.6715

1 引 言

在卫星光网络中使用光交换替换电交换是空间通信技术发展的趋势。欧空局(ESA)在 Darwin

mission 和 XEUS 项目中研制了无阻塞 8×8 星载光交换机^[1], 实验证明星载光交换是可行的。国内有文献提出借鉴光突发交换(OBS)作为卫星光网络

收稿日期: 2013-05-03; 收到修改稿日期: 2013-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(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星上交换技术等方面的研究。

E-mail: cftegh@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

星载光交换的方式^[2]。在这种方式下,把 IP 包组装成数据突发包后要等待一个偏置时间,等待被调度到合适的信道,调度机制的性能在很大程度上决定了 OBS 网络的性能^[3],因此调度算法是 OBS 网络中的关键技术之一。在卫星光网络中,为了充分发挥 OBS 网络的优势,有效利用信道带宽,提高网络资源的利用率,必须设计合适的信道调度算法。

地面网络中已经提出了很多调度算法。最迟可用未占用信道(LAUC)算法^[4]简单,易于实现,但该算法的信道利用率不高,尤其是在业务量较大时容易阻塞,丢包率较高。可插空最近可用未调度信道(LAUC-VF)算法^[5]比 LAUC 可以更有效地利用网络带宽,同时降低突发数据包(BDP)的丢失率。文献^[6]提出了基于延迟的边缘节点调度算法(SAD)和核心节点基于“宏突发”的区分型资源预留方法(DRR)。该调度算法是利用边缘结点的电缓存延迟对数据突发的调度时间,即当组装器生成数据突发时不立即进行调度,而是将生成的数据突发缓存一段时间,然后对缓存时间内生成的所有目的地址相同的数据突发进行成批调度,这样就形成了较多的“宏突发”以便于进行资源预留。该调度算法在信道利用率和丢包率方面都获得了较好的性能,但是由于边缘节点基于时间的组装算法和“有意”延迟也造成了调度算法延迟性能的退化。

考虑到星上资源有限,卫星间相距遥远,光接收功率较小,误码率(BER)较高^[7-8]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^[9],光缓存性能不佳^[10],且数据连续传输的概率较大、公平性和时延要求高等,借鉴地面调度算法的研究成果,本文设计了一种简单有效的调度算法。仿真表明该算法降低了卫星光网络的传输时延和丢包率,且计算复杂度低,链路利用率较高,能够满足卫星通信业务需求,适用于星载光交换。

2 星载光交换数据信道调度算法(SABB)

基于 GEO 卫星和 LEO 卫星组成的双层卫星光网络,如图 1 所示。GEO(相当于 OBS 中的核心节点)充当中继卫星,用来转发数据,它可以和其他 GEO、LEO 等卫星建链,还可以通过激光链路把从 LEO 获得的数据传回地面站,进而使地面获得需要的信息。LEO 卫星(相当于 OBS 中的边缘节点)充当应用卫星,获取各种数据,此处假设 LEO 同层卫

星之间无星际链路,它可以与 GEO 建立激光链路,通过 GEO 把信息传回地面。

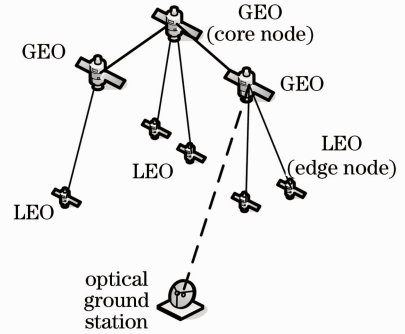


图 1 GEO/LEO 双层卫星光网络

Fig. 1 Two-layer laser satellite network of GEO/LEO

2.1 星载光交换资源预留方式

卫星网络中业务的发送具有较大的突发性和连续性,如果完全按照地面 OBS 网络资源预留方式,将会造成卫星网络资源的浪费,且容易产生网络拥塞,所以借鉴了“宏突发”的思想,对传统控制协议资源预留方式进行了改进,但是不借鉴其为了生成宏突发而“有意”进行的延迟行为。这里把 BDP 区分为单个突发和突发流。单个突发就是某些路由相同的 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。这里通过在控制包中设置标志域来区分单个突发和突发流。设标志域的位数为 3 位,若标志域最高位为 1,则为单个突发,若最高位为 0,则为突发流。当 GEO 收到控制分组时,根据其携带的标志域判定突发类型。若为单个突发,则按照突发长度信息预留资源,并在(波长)字段写入预留好的波长号,发送完毕后释放资源,整个过程与 JET(Just Enough Time)方式完全相同;若为突发流,只确定预留资源的起始时刻,前一个突发传送结束后不释放资源,而是继续传送下一个突发,直到发送完突发流的最后一个突发后释放资源。突发控制包的格式如图 2 所示,图中 QoS 为服务质量, CRC 为循环冗余校验。定义标志域中:“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;“000”表示数据突发处于宏突发的最后位置;其余值无意义,而“1 * *”则为单个突发。“wavelength”字段用来对资源预留成功后的某一 GEO 所使用的波长进行记录,目的在于当某些突发包(流)使用的不是本优先级所分配的波长时,在下一个核心节点可能要要进行波长变换,这样可以方便变换。

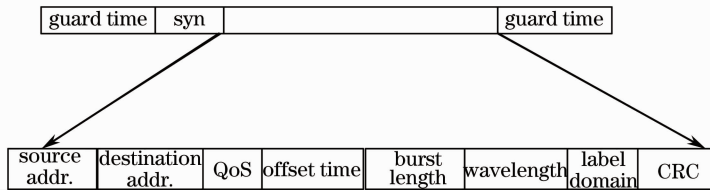


图2 突发控制包的格式

Fig. 2 Format of burst controlling packet

突发流形成的先决条件是当前一个突发汇聚完成时能够预先知道下一个突发的长度,此处可由边缘节点设置一个流量预测器来实现对下一个突发长度的预测,其预测结果通过控制包体现出来,从而在核心节点可根据控制包信息进行资源预留。

资源预留方式的变化可通过链路利用率体现出来。在考虑保护时间的条件下,星载光交换网络总的链路利用率可以表示为

$$\eta_{\text{total}} = \frac{k}{K} \frac{T_{\text{bs}}}{T_{\text{bs}} + T_{\text{oxc}}} \rho_i, \quad (1)$$

式中 T_{bs} 为数据突发传输时间, T_{oxc} 为设备倒换时间, ρ_i 为单波长信道的业务量强度, K 为总的波长数, k 为数据信道数。在其他因素固定的情况下,通过使用突发流的资源预留方式,链路利用率随着设备的倒换时间 T_{oxc} (即光交换矩阵的重置) 的减小而逐渐增大。

2.2 基于突发流的星载光交换信道调度算法

在以上资源预留的基础上,设计了一种考虑突发包 QoS 的信道调度算法。把突发数据包划分为不同优先级,同时把数据信道也根据数据包的优先级数划分为不同的组。高优先级的突发数据包对应高优先级数据信道,其他优先级依次对应,原则上数据包使用对应优先级的信道进行数据传输。但高优先级的数据包在对应信道忙时可以暂时占用空闲的低优先级信道,而低优先级数据只有在传送突发流时才可以占用高优先级数据信道,这种对应关系存在于每个节点中。此处定义国外上空的业务等级高于国内上空的业务等级。除了业务重要性之外,另外一个原因是国外上空的星际链路也更长,符合网络路由选择的规律。

算法步骤如下:1) 当一个突发数据包到来时,核心节点根据控制包的标志域来检测其是否是突发流中的某个包,若是,则不用选择数据信道,直接使用确定的波长传送即可;2) 若是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;3) 若对应信道忙,就使用 LAUC-VF 算法对其他低

优先级信道进行选择,若找不到空闲信道则丢弃;4) 若突发数据包在某一 GEO 使用的是低优先级的信道(可以从数据包的优先级与控制包波长字段的对应关系中检测获得),在下一个 GEO 资源预留时也会首先选择与其优先级相对应的信道,这样可以保证低优先级的数据包不会由于高优先级数据占用了其信道而被丢弃,这时需要进行波长转换。

如图3所示,假如某 GEO 有4个数据信道,1个控制信道。数据包有2个优先级,则优先级为 P_1 的数据包对应 $D_1 \sim D_2$ 信道,优先级为 P_2 的数据包对应 $D_3 \sim D_4$ 信道。 t 时刻到达优先级为 P_1 的突发流,首先查找 D_1 信道,但此时该信道正忙,而 D_2 信道由于已经有其他突发包预约,在此时刻到预约突发之间的空闲时间较小,不能完成新到突发的传输,所以使用 LAUC-VF 算法对该其他数据信道进行搜索,最后选择 D_3 信道传送该突发流。若 D_3 信道在该突发流传输期间到来新的突发包,则使用 D_4 传输或丢弃该突发包。该调度算法既利用了突发流资源预留优势,减少了光交换矩阵的重置操作,也降低了交换时延和调度时延,同时其计算复杂度得到了降低,最坏时才和 LAUC-VF 相同。弱点是可能会使低优先级数据包在业务量较大时的丢包率上升。另外,还需在边缘节点处设置流量预测器作为光突发流的资源预留使用,但该预测器是在 LEO 节点上设置的,并不影响 GEO 的负重和复杂度。

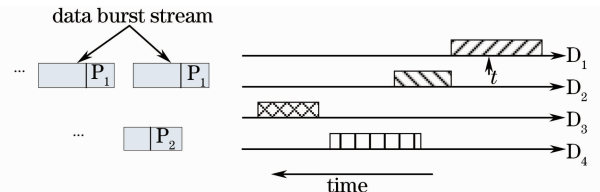


图3 基于突发流的星载光交换信道调度算法

Fig. 3 On-board optical switching algorithm based on data burst stream

突发数据包的丢包率可以由 Erlang B 公式得到。假设系统共有 K 个波长信道,其中数据信道为 k 个,则控制信道数目为 $(K-k)$ 个。假设数据信道中优先级为 i 的数据包所对应的数据信道有 m_i 个,对于优先级

最高的单个突发数据包或突发流的第一个数据包来说,它的排队模型为 M/M/K,则其丢包率为

$$p_s = \frac{\rho_i^K / K!}{\sum_{k=0}^K \rho_i^k / k!}, \quad (2)$$

式中 ρ_i 为信道 i 的业务强度。

对于优先级较低的单个突发包来说,其丢包率为

$$p_s = \frac{\rho_i^S / S!}{\sum_{k=0}^S \rho_i^k / k!}, \quad (3)$$

式中 S 为其优先级对应数据信道的个数 ($S < k$)。

对于优先级为 i 的突发数据流来说,资源预留成功后其排队模型为 M/D/K,即在某一节点的服务时间是固定值,只通过已配置好的光交换矩阵即可,所以是确定性分布,这样通过这一核心节点时是不存在丢包现象的,所以优先级为 i 的突发包流总的丢包率为

$$p_s = \frac{\rho_i^K / K!}{\sum_{k=0}^K \rho_i^k / k!}. \quad (4)$$

当为突发流时,资源预留成功时丢包率为 0,否则,只能丢弃突发流,导致丢包率上升。原因在于低优先级突发流只有在高优先级信道无数据传输时才可占用高优先级信道,所以在业务量较大时低优先级突发包的丢包率肯定大于高优先级。

当为单个突发或突发流中的第一个数据包时,若本优先级有相应的空闲信道,则其复杂度为 $O(n)$, n 为其优先级对应的数据信道数目;若在本优先级内找不到合适的信道,就使用 LAUC-VF 算法搜索,此时复杂度为 $O(k^2)$,其中 k 为 OBS 网络中数据信道总数目,此时复杂度最高。若为突发流中的中间或最后一个数据包,由于不需要进行信道搜索,所以复杂度最低,为 $O(1)$ 。

3 性能仿真比较

假设突发数据 BDP 以泊松过程到达,到达率为 λ ,BDP 的长度服从 $1/\mu = 100 \mu s$ 的指数分布,LEO 组装算法使用混合门限方式,假设最短汇聚时间为 $50 \mu s$,最长汇聚时间为 $100 \mu s$,最短汇聚突发包长度为 2000 byte ,最长汇聚突发包长度为 40000 byte ,偏置时间固定为 $10 \mu s$ 。GEO 有 4 个输入、输出端口,每个端口有 4 个波长,数据信道传输速率为 2.5 Gb/s ,每个突发数据到各个输出端口的概率相同。所有突发包分为 2 个优先级,分别为 0 和 1,0 为高优先级,1 为低优先级。假设该卫星光

网络有 5 个 LEO,3 个 GEO,目的地址在 LEO 之间均匀分布,LEO 和 GEO 之间相距 30000 km 。LEO 使用了基于线性预测滤波器^[11-12]流量预测算法。在相同的条件下使用不同调度方法进行了仿真。

图 4 比较了不同调度算法下、不同 QoS 下的时延性能,可以看出:SABB 星载调度算法相比 LAUC, LAUC-VF 算法,时延在低负载情况下相差不大,而在中高负载下时延降低较多,这主要是由于其突发流资源预留方式减少了光交换矩阵平均重置时间,从而降低了光突发交换调度的总时延,这也证明了基于突发流的星载调度算法对降低时延有很明显的作用。

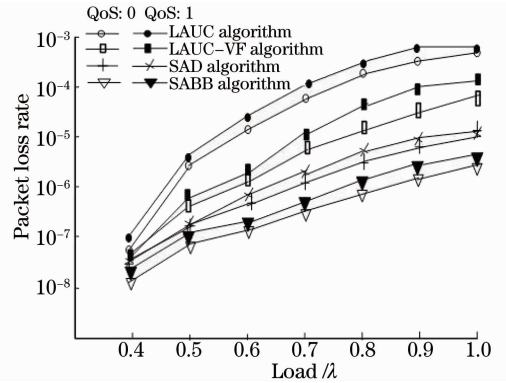


图 4 不同 QoS、不同调度算法下的时延比较
Fig. 4 Comparison of delay in different scheduling algorithms with different QoS

图 5 比较了 SABB 星载调度算法与其他调度算法的丢包率,可以看出由于使用了具有优先级的突发流资源预留方法,使得在负载较高时资源被预留的概率提高,因此丢包率得到了较明显的降低。但是在输入业务量强度较小时形成宏突发的概率较小,对丢包率的改善程度较为有限。

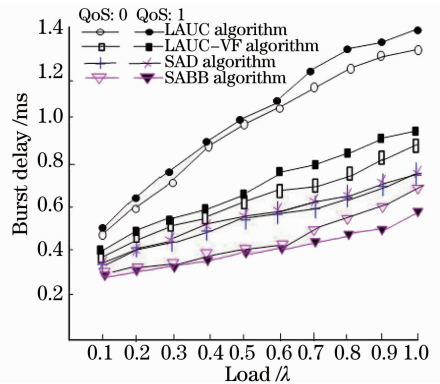


图 5 不同 QoS、不同调度算法下的丢包率比较
Fig. 5 Comparison of packet loss ratios in different scheduling algorithms with different QoS

4 结 论

综合以上分析,可以得出以下结论:1) 基于突发流的星载调度算法由于使用了突发流资源预留方法,使得光交换矩阵不必在每个突发来临时都进行重置恢复,有效节约了交换时间,降低了交换时延,进而提高了卫星光交换网络性能;2) 相比 LAUC 及其他调度算法,使用了基于突发流的星载调度算法后,其突发包丢包率性能也得到了提高。本算法在没有光纤延迟线的情况下,最坏情况下的复杂度与 LAUC-VF 算法相同,为 $O(\omega^2)$,其中 ω 为 OBS 网络中数据信道总数目。所以本算法是简单可行且易于实现的,较为适合星载光交换网络。当然,本算法也可以应用在与网络业务相似的地面光网络中。

不足之处是本算法需要设置流量预测器和波长变换器来实现对下一个突发长度的预测和波长变换,增加了节点的复杂度。下一步的工作是对流量预测器的预测精度进行深入的改进研究,使之能够更适用于卫星光网络中,提高流量预测精度。

参 考 文 献

- 1 ESA. Annual Report2006[EB/OL]. [2012-4-15]. <http://www.esa.net/esapub/annuals/annual106>.
- 2 Li Ruixin, Zhao Shanghong, Yao Zhoushi, *et al.*. Research of on-board mixed optical/electric switching of GEO broadband multimedia satellite [J]. *Optical Communication Technology*, 2011, 35(6): 51-53.
李瑞欣, 赵尚弘, 幺周石, 等. 通信卫星光电混合交换技术研究 [J]. *光通信技术*, 2011, 35(6): 51-53.
- 3 Jihui Xu, Chunming Qiao, Jikai Li, *et al.*. Efficient channel scheduling algorithms in optical burst switched networks [C]. Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer

- & Communications, 2003, 3: 2268-2278.
- 4 Jonathan S Turner. Terabit burst switching[J]. *Journal of High Speed Networks*, 1999, 8(1): 3-16.
- 5 Yijun Xiong, Marc Vandenhoute, Hakki C Cankaya. Control architecture in optical burst-switched WDM networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 2000, 18(10): 1838-1851.
- 6 Liu Jianping. Study on the Key Techniques of the Edge Nodes in the Optical Burst Switching Network [D]. Xi'an: Xidian University, 2006, 67-69.
刘建平. 光突发交换网络边缘节点关键技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006. 67-69.
- 7 Li Tiansong, Yuan Weichao, Yi Miao, *et al.*. Time jitter effects on bit error probability in multipulse position modulation satellite optical communication [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 26-30.
李天松, 袁伟超, 易 淼, 等. 多脉冲位置调制卫星光通信中时钟抖动对比特错误概率影响 [J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 26-30.
- 8 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.
- 9 Feng Shaodong, Jie Xiao, Li Yangzhi, *et al.*. Traffic modeling and simulation in low earth orbit constellation system [J]. *J Astronautics*, 2010, 31(1): 179-184.
冯少栋, 揭 晓, 李仰志, 等. 低轨星座系统业务建模与仿真 [J]. *宇航学报*, 2010, 31(1): 179-184.
- 10 Hu Weisheng, Sun Weiqiang, He Hao, *et al.*. Structure and space architecture 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.
- 11 D Morat, J Aracil, L A Diet, *et al.*. On linear prediction of internet traffic of packet and burst switching networks [C]. *Proc of Tenth International Conference on Computer Communications and Networks*, 2001. 138-143.
- 12 Jingxuan Liu, Nirwan Ansari, Teunis J Ott. FRR of latency reduction and QoS provisioning in OBS networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, 21(7): 1210-1219.

栏目编辑:王晓琰