

基于中间节点预测的卫星光交换网络信令设计

王雨琦,陈 特,周 纳*

(中国空间技术研究院 通信卫星事业部,北京 100094)

摘要:针对复杂的信令交互过程会增加卫星网络链路时延的问题,借鉴地面光网络信令协议的研究成果,提出了一种基于中间节点预测的卫星光突发交换网络信令交互流程,并对其网络性能进行了理论分析与仿真验证。该信令在链路的中间节点加入模型预测机制,根据预测的网络性能指标动态选择最优中间节点进行信令返回确认。仿真结果表明:该信令可有效权衡业务的时延和阻塞率,保证网络的各方面性能不会出现急剧恶化的问题。

关键词:卫星光网络;光突发交换;中间节点预测;时延;阻塞率

中图分类号:TN927 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)12-0016-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.12.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of satellite optical switching network signaling based on intermediate-node prediction

WANG Yuqi, CHEN Te, ZHOU Na*

(Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To cope with the problem that complex signaling interaction process will greatly increase the satellite network time delay, this paper draws on the research of terrestrial optical network signaling and put forward a novel optical burst switching network signaling based on intermediate-node prediction. The network performance is analyzed and verified by simulation. The signaling adds model prediction mechanisms to intermediate nodes of links. It dynamically selects the optimal intermediate node for signaling confirmation based on predicted network performance indicators. The simulation result shows that the method can balance time delay and blocking rate of services, so that the performance of all aspects in the satellite network will not deteriorate sharply.

Key words: satellite optical network; optical burst switching; intermediate-node prediction; time delay; blocking rate

0 引言

为了满足卫星通信传输流量的快速增长、业务的多样性和突发性变化以及星上承载能力提升等需求,卫星通信系统逐渐向大容量方向发展,业务类型逐渐向宽带分组化方向发展,星上载荷逐渐向轻小型化方向发展^[1]。目前,在星上采用的传统电交换方式存在处理带宽受限、交换速率不高和交换设备体积重量大等

缺点,严重地限制了卫星通信容量及其速率的提升和设备的小型化^[2]。相比传统的电交换方式,光交换技术具有宽带、大容量、高速率、抗干扰、无电子瓶颈和有效载荷体积重量小等优势,可支撑高速、安全和可靠的高速卫星通信需求,同时为卫星光网络的发展提供了基础。

目前,地面光交换的主要方式包括光线路交换^[3]、光分组交换^[4]和光突发交换^[5]。光突发交换很大程度上提升了网络资源的灵活性和利用率,适合应用于资源有限的卫星通信场景,得到了国内外研究者的广泛关注^[6]。地面典型的光突发交换网络信令协议主要包括JET(Just-Enough-Time)信令、TAW(Tell And Wait)信令和中间节点初始化(INI)信令等。1999年,纽约州立大学布法罗分校的C. Qiao和华盛顿大学圣路易分校的J.S. Tunnor分别提出了基于JET协议的光突发交

收稿日期:2019-04-28。

基金项目:国家自然科学基金(61775237、61675232、61675233)资助。

作者简介:王雨琦(1992-),男,硕士研究生,现就读于中国空间技术研究院通信卫星事业部,主要从事通信网络架构及光交换关键技术的研究,科研成果主要为宽带卫星光网络架构设计、卫星光突发交换网络的汇聚算法设计和信令设计,曾参与新一代宽带卫星通信系统设计和集成演示验证工作。

* 通信作者:周纳(E-mail:zhou_na@sina.com)。



交换方式^[7]。在上述工作的基础上,2002年,英国伦敦大学的 P. Bayvel 等人研究了面向波长路由的光突发交换技术,通过采用双向预留的 TAW 信令协议避免了由于单向资源预留失败而造成的阻塞^[8],不过其网络灵活性和带宽利用率仍然存在一定问题。2007年,Vokkarane 提出了一种中间节点发起的 INI 信令机制^[9]。在 INI 信令中,从源节点到预留发起节点与后向预留的双向信令相同,从预留发起节点到目的节点与单向信令相同,但是整个过程没有考虑到中间节点后的链路状态。

考虑到星上资源有限,卫星间相距遥远,链路状态不确定性高,需要双向预留的信令协议来保证数据业务传输的成功率。同时卫星网络链路时延较大,面向时延敏感型业务时过于复杂的信令交互会大大影响业务服务质量。因此,本文针对空间光网络链路时延长、面向需求多元化的问题,结合地面光突发交换网络信令的特点,提出了基于中间节点预测(INP)的信令交互流程并进行仿真验证。

1 基于中间节点预测的信令协议

针对空间信息光网络链路时延长、面对业务需求多元化的问题,结合 JET 信令和 TAW 信令的特点,本文提出了基于 INP 的空间光突发交换信令交互流程,流程图如图 1 所示。当 IP 包在边缘节点汇聚生成突发包后,首先向目的节点发送突发控制包(BCP)。BCP 沿路径收集所经过节点的状态信息,每到达一个中间节点时,节点根据 BCP 收集的信息确认 BCP 传输过的路径是否满足建链要求,同时根据网络信息预测到目

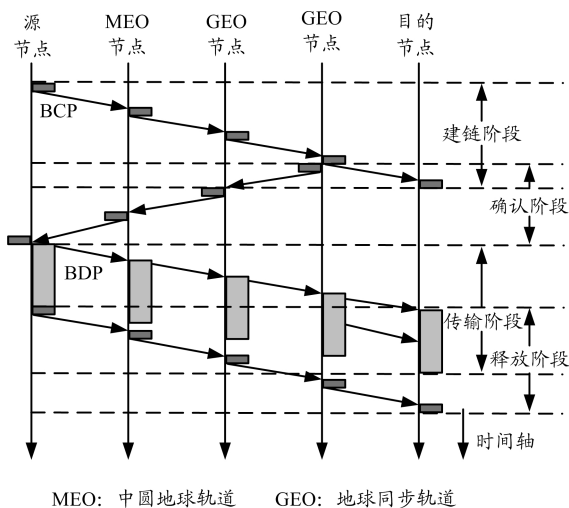


图1 基于 INP 的空间光突发交换信令交互流程

的节点剩余路径的状态;如果该节点对整个链路的建链预测达到预期要求,则在该节点向源节点返回确认信息,同时 BCP 继续向目的节点传输预留信道资源;否则 BCP 继续收集信息并传输到下一节点再进行预测。待确认信息返回源节点后,将突发数据包(BDP)按照预留好的路径发送至目的节点,同时发送释放信息拆除预留链路。

INP 信令算法流程如图 2 所示,具体的算法流程如下:

- ①BCP 到达后初始化网络拓扑;
- ②根据最短路径算法找出源节点与目的节点的最短路径 R_{sd} ;
- ③使用 INP 信令找到满足期望服务质量 (如时延、阻塞率等)的中间节点,同时向源节点返回确认信息;
- ④源节点按照预留好的 R_{sd} 发送 BDP 并发送释放信息拆除链路。

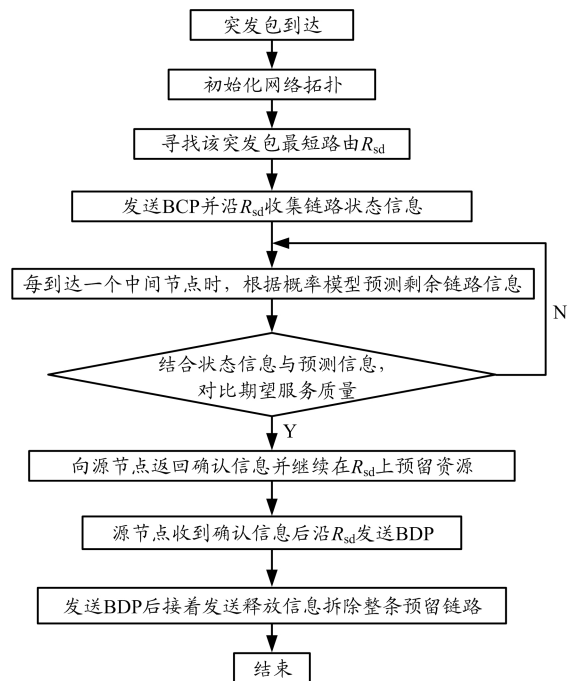


图2 INP 信令算法流程

2 理论分析

2.1 时延分析

考虑到每个卫星核心节点不具有光纤延迟线和波长转换功能,假设从业务源节点到目的节点计算出的最短路由为 R_{sd} ,同时每个信道只具备单个波长的传输能力(多波长信道模式可通过建立多层网络的方式来分析)。下面给出了需要用到的各物理量定义^[9]。

t_{bcp} :在每个网络节点 BCP 的处理时间,本文假设处理时间包含建链时间、释放时间和确认时间,在所有节点这些时间都是相同的。

t_{sw} :每个网络节点重新配置光交叉矩阵的交换时间。

t_{at} :IP 包在边缘节点汇聚成突发包所需要的汇聚时间。

t_{b} :BDP 在节点内的传输时间。

t_{off} :需要给 BCP 和相应 BDP 传输之间预留的最小偏置时间。

t_{p}^{ij} :从节点 i 到节点 j 的光路传输时延。

一般的典型值: t_{bcp} 约为百纳秒量级, t_{sw} 约为几微秒量级, t_{p}^{ij} 约为 $3.3 \mu\text{s}/\text{km}$ 。

在 INP 信令中,其端到端时延由 TAW 和 JET 时延方程的混合形式给出,大小取决于中间节点的位置 k 、突发包汇聚时间和突发包传输时间。令 l 为源节点到中间节点的跳数, m 为中间节点到目的节点的跳数, n 为业务经历的总跳数。那么其传输时延 T_{INP} 为:

$$T_{\text{INP}} = t_{\text{at}} + 2 \sum_{p \in R_k} t_{\text{p}}^{ij} + \sum_{p \in R_d} t_{\text{p}}^{ij} + t_{\text{b}} + t_{\text{off}} \quad (1)$$

其中,如果 $2 \sum_{p \in R_k} t_{\text{p}}^{ij} \geq m t_{\text{bcp}} + t_{\text{sw}}$,那么 $t_{\text{off}} = 0$;否则有:

$$t_{\text{off}} = (m t_{\text{bcp}} + t_{\text{sw}}) - 2 \sum_{p \in R_k} t_{\text{p}}^{ij} \quad (2)$$

显然,当 $l=n$ 时,时延等价于 TAW 信令带来的时延;当 $l=0$ 或 $m=n$ 时,时延等价于 JET 信令带来的时延。

2.2 阻塞率分析

文献[10]给出了在单条链路上 BCP 单向预留资源而不接受确认信息的突发包阻塞率为 P_i ;BCP 反馈确认信息双向预留资源的接入损失率为 0。

文献[11]给出了理想设计中不同负载下激光链路中继卫星接入阻塞率与用户数量的关系。假设 A 为单位时间内的通信业务量,总共有 s 条可用接入链路,共有 r 个用户卫星随即接入。那么第 i 条链路的接入阻塞率 P_i 为该链路单位时间内成功接入次数与总共接入次数之比,可以用爱尔兰呼叫损失计算公式表示为:

$$P_i = \frac{A^s}{s!} / \left(\sum_{i=0}^s \frac{A^i}{i!} \right) \quad (3)$$

在此基础上,对于中间节点 k 的混合信令交互方

式的突发包阻塞率 P_i 为:

$$P_i = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i) \quad (4)$$

2.3 约束下的最优中间节点分析

假设 S_i 为网络性能的状态量,由 BCP 在第 m 个中间节点处收集的源节点到该节点的链路状态信息 S_G 与该节点到目的节点的后向链路预测状态信息 S_B 组成,可表示为 $S_i = f_i(S_G, S_B)$ 。 E_i 为该业务的期望性能,其中 $i=1,2,3 \dots$ 表示不同的性能指标类型,如:阻塞率、时延和链路利用率等。

定义 $\text{SUP}(S_i, E_i)$ 表示中间节点计算的性能状态 S_i 优于设定期望状态 E_i ,例如:状态时延小于期望时延,状态链路利用率大于期望链路利用率等。当该节点满足 $\text{SUP}(S_i, E_i)$ 时,给不同的性能指标引入权重 ω_i ,则优化目标为在满足条件 $\text{SUP}(S_i, E_i)$ 的情况下,使得函数

$$\sum \omega_i |S_i - E_i| \text{ 取得最大值。}$$

根据以上方法可找到中间节点 m_0 ,满足网络的性能达到期望的最优性能。

3 仿真分析

为了对选取的最优中间节点进行验证,本文选取了一种 GEO+MEO 的双层网络架构进行仿真验证。

在仿真算例中设定 5 个 GEO 节点,对应 3 颗同轨道面的 MEO 卫星,MEO 星座的周期为 12 h,倾角为 40° ,通过 STK 软件验证可知该星座能满足全球最小一重覆盖。考虑到网络的对称性,将同一个 MEO 轨道面上卫星都等价于有最近 GEO 卫星接入的 MEO 卫星,具体的拓扑连接关系如图 3 所示。

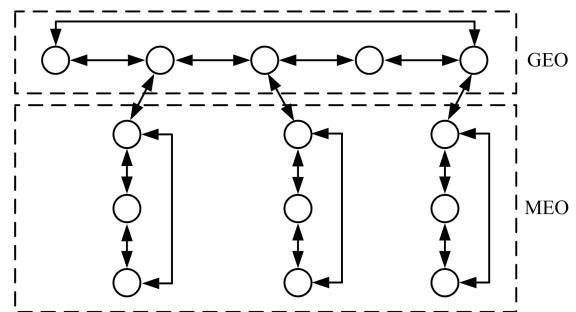


图3 卫星网络逻辑连接图

根据链路连接关系和星座轨道信息,可以计算出各轨道面的星间链路距离,以及轨道间的最近卫星平均距离,如表1所示。

不失一般性,在网络仿真的过程中边缘节点的汇

表 1 星座参数

星座参数	GEO	MEO
倾角 i	0°	40°
轨道高度 $h(\text{km})$	35786	20184
偏心率 e	0	0
周期 $T(\text{s})$	86164	43082
轨道数	1	3
每个轨道面的卫星数	5	3
每颗星搭载的终端数	4	4
轨道内星间链路距离(km)	49567	46007
轨道间平均距离(km)	28837 km	

聚过程选择最大突发长度-最大汇聚时间算法,卫星光网络的波长路由分配采用最短路径算法,信道分配方式为 First-Fit 算法,在观察期内网络连接拓扑不变,且不考虑核心节点端口竞争引起的阻塞。

不同业务对于服务质量的需求是不同的,本文分析对比了几种常见卫星业务的服务质量需求^[2],如表2所示。其中,主要业务服务质量需求可分为时延敏感的 I 类业务和准确性敏感的 II 类业务,因此后续验证主要针对这两类业务分别进行仿真。

表 2 常见卫星业务服务质量需求对比分析

卫星业务数据类型	带宽	服务质量需求
高分遥感数据	宽带	少量用户,非实时性
全球测控数据	窄带	专用服务
指控数据	窄带	实时性、准确性
遥感与探测数据	宽带/窄带	大量用户,多等级服务

假设 GEO 节点和 MEO 节点承载的业务量比例不同,按照 GEO 节点承载业务量 α 从 0.5~0.9 的情况进行仿真,各跳数业务的分配量如图 4 所示。可以看出,随着 GEO 节点的承载业务量比例增多,2~4 跳的业务占比逐渐变大,大于 4 跳的业务占比逐渐缩小。

本文在算例中选取 $\alpha=0.7$ 的场景分析,该负载下不同跳数的各信令的平均时延如图 5 所示。其中,INP I 代表 I 类业务在 INP 信令下的曲线,INP II 代表 II 类业务在 INP 信令下的曲线。可以看出,INP 信令产生的平均时延不会出现 TAW 信令中链路跳数过多时时延性能急剧恶化的问题。

在最大跳数(6 路)情况下,进一步分析不同业务

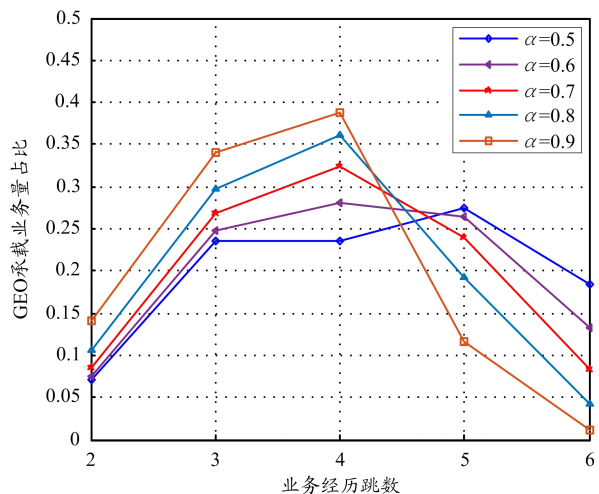


图 4 不同 GEO 节点承载业务量下的各跳数占比

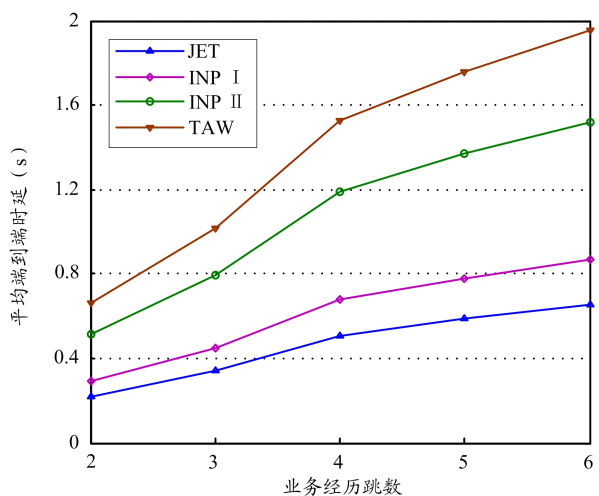


图 5 不同跳数下采用各种协议的平均时延对比

的服务质量保障。首先,设定 I 类业务对时延的期望小于 1 s,则不同负载下各信令的时延对比如图 6 所示。不同负载下各信令的阻塞率对比如图 7 所示。可以看出,对于 I 类业务,JET 和 INP I 曲线在满足时延期望小于 1 s 的同时,INP 信令能够降低业务阻塞率,在满足约束的同时提高服务质量。

设定 II 类业务对阻塞率的期望小于 0.1,结合图 6 和图 7 可知 TAW 和 INP II 曲线满足设定的期望约束。图 6 中 INP II 曲线中的拐点 $m_1 \sim m_6$ 代表了在不同网络状态下寻找的不同最优中间节点 1~6。可以看出,相比于 TAW 信令,INP 信令能够大大降低业务的平均时延,提升服务质量,同时 INP 信令在一定程度上保证了该类业务的传输成功率,避免了 JET 信令中负载增大时阻塞率急剧恶化的问题。

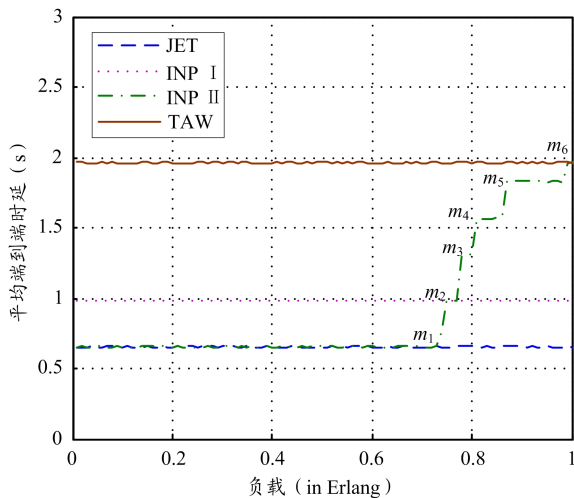


图6 不同负载下业务采用不同协议的平均时延对比

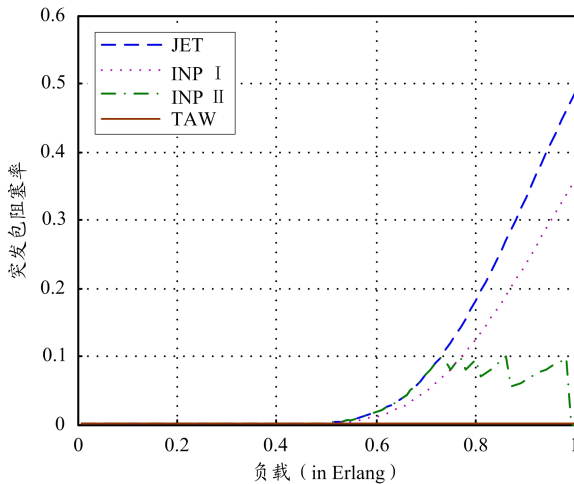


图7 不同负载下业务采用各种协议的阻塞率对比

4 结束语

信令技术是空间光交换网络中的一项核心技术,它对网络的阻塞率、端到端时延等性能起着决定性的作用。本文针对空间光突发交换网络业务类型多元化特点,设计了基于中间节点预测的信令交互流程。本文进行了卫星光突发交换网络的信令仿真实验,仿真结果表明:基于中间节点预测的信令交互流程针对不

同类型的业务能有效权衡业务的传输时延和阻塞率,保证网络的各方面性能不会出现急剧恶化的问题,能够满足卫星通信业务需求,适用于卫星光网络。然而,目前的预测参数主要来源于理论模型,考虑到实际场景的应用,之后的研究可将链路状态作为输入,紧密结合具体应用场景,实现更精准的预测。

参考文献:

- [1] 王家胜. 我国数据中继卫星系统发展建议 [J]. 航天器工程, 2011, 20(2): 1-8.
- [2] CHEN W, LIU K, CHEN X. Research Progresses and Trends of Onboard Switching for Satellite Communications [C]//1st International Conference on Space Information Network, August 24-25, 2016, Kunming, China. Berlin: Springer, 2016: 117-125.
- [3] CHLAMTAC I, GANZ A, KARMI G. Lightpath Communications: an Approach to High Bandwidth Optical WAN's [J]. IEEE Transactions on Communications, 1992, 40(7): 1171-1182.
- [4] O'MAHONY M J, SIMEONIDOU D, HUNTER D K, et al. The application of optical packet switching in future communication networks [J]. IEEE Communications magazine, 2001, 39(3): 128-135.
- [5] CHEN Y, QIAO C, YU X. Optical Burst Switching: a New Area in Optical Networking Research [J]. IEEE Network, 2004, 18(3): 16-23.
- [6] 李瑞欣, 赵尚弘, 么周石, 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.
- [7] QIAO C, YOO M. Optical burst switching (OBS)-a new paradigm for an optical internet [J]. High Speed Networks, 1999, 8(1): 69-84.
- [8] DUESER M, BAYVEL P. Analysis of a dynamically wavelength-routed optical burst switched network architecture [J]. IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(4): 574-586.
- [9] VOKKARANE V. Intermediate-node-initiation (INI): a generalized signaling framework for optical burst-switched networks [J]. Optical Switching and Networking, 2007, 4: 20-32.
- [10] ROECK Franz, RAMANTAS Kostas, LEITGEB Erich, et al. A hybrid signaling protocol for enhancing performance of OBS networks [C]//IEEE 15th International Conference on Optical Network Design & Modeling, February 8-10, 2011, Bologna, Italy. Washington: IEEE Computer Society, 2011: 1-6.
- [11] 陈二虎, 刘颖, 刘璐, 等. 激光链路中继卫星系统网络设计及性能分析 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2778-2780.
- [12] 陈荷, 乔洋, 陈晶, 等. 面向空间信息网络的骨干接入一体化 MEO 卫星系统设计 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 67-72.

《光通信技术》加入 OSID 公告

《光通信技术》期刊自 2018 年 9 月 3 日起加入 国家新闻出版署出版融合发展(武汉)重点实验室提出的 OSID(Open Science Identity)开放科学计划。通过在期刊每篇文章上添加 OSID 开放科学(资源服务)标识码,可以使论文成果更加立体化展现,增强论文质量,促进传播与交流;使作者获得直接拓展学术人脉的渠道,并为作者与研究同领域课题的学者交流互动提供途径。

《光通信技术》编辑部