

## 基于 MPLS 的空间信息网络路由策略

潘成胜<sup>a</sup>, 贾亚茹<sup>a,b</sup>, 蔡睿妍<sup>a,b</sup>, 杨力<sup>a,b</sup>

(大连大学 a. 通信与网络重点实验室; b. 信息工程学院, 辽宁 大连 116622)

**摘要:** 针对空间信息网络中卫星链路组网时延长、IP 技术与 ATM 技术体制难以融合与互通的问题, 基于卫星多协议标签交换(MPLS)组网方案, 提出一种空间信息网络路由策略。将 IP 数据包和 ATM 信元采用统一的 MPLS 格式进行封装, 融合 IP 与 ATM 2 种技术体制, 在融合过程中为合理选择传输路径, 提出一种基于跳数和带宽利用率的路径选择算法。通过 OPNET 仿真平台进行验证, 结果表明, 与 OSPF 卫星网络路由策略相比, 该策略能够有效降低网络的传输时延。

**关键词:** 空间信息网络; 多协议标签交换; IP 技术; ATM 技术; 路由策略; 路径选择算法

**中文引用格式:** 潘成胜, 贾亚茹, 蔡睿妍, 等. 基于 MPLS 的空间信息网络路由策略[J]. 计算机工程, 2019, 45(3): 85-90.

**英文引用格式:** PAN Chengsheng, JIA Yaru, CAI Ruiyan, et al. Routing strategy for spatial information network based on MPLS[J]. Computer Engineering, 2019, 45(3): 85-90.

## Routing Strategy for Spatial Information Network Based on MPLS

PAN Chengsheng<sup>a</sup>, JIA Yaru<sup>a,b</sup>, CAI Ruiyan<sup>a,b</sup>, YANG Li<sup>a,b</sup>

(a. Communication and Network Laboratory; b. College of Information Engineering,  
Dalian University, Dalian, Liaoning 116622, China)

**[Abstract]** In order to solve the problems of prolonged satellite link networking, difficult integration and interoperability between IP technology and ATM technology in space information network, a routing strategy for space information network is proposed based on the satellite Multi-Protocol Label Switching(MPLS) networking scheme. IP packet and ATM cell are encapsulated in a unified MPLS format, which integrates IP and ATM technology. In order to select the transmission path reasonably, a path selection algorithm based on hops and bandwidth utilization is proposed. Results of OPNET simulation platform show that compared with OSPF satellite network routing strategy, this strategy can effectively reduce the transmission delay of the network.

**[Key words]** spatial information network; Multi-Protocol Label Switching(MPLS); IP technology; ATM technology; routing strategy; path selection algorithm

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0049722

### 0 概述

随着国家在空间探索、海洋考察等领域需求的不断提升, 建设天地一体化网络成为一项重要工程<sup>[1]</sup>。其中, 卫星网络是目前研究的一个热点<sup>[2]</sup>。现有卫星系统采用的技术体制有 ATM (Asynchronous Transfer Mode)<sup>[3]</sup>、IP (Internet Protocol)<sup>[4]</sup>等。ATM 采用面向连接的方式<sup>[5]</sup>, 安全性高、时延小, 但其协议复杂, 网络成本高, 网络规模较大时流量管理问题比较突出。基于路由的 IP 技术面向无连接, 可扩展性强、运行费用低<sup>[6]</sup>, 但其在服务质量、安全性等方面不如 ATM 技术。上述 2 种技术体制之间相互独立, 无法实现互联互通,

这为空间信息网络中各子网络之间的相互融合带来了阻碍<sup>[7]</sup>。

多协议标签交换 (Multi-Protocol Label Switching, MPLS) 技术为网络层和链路层的结合提供了一套体系架构<sup>[8]</sup>。使用 MPLS 技术可以在保持 IP 技术面向连接的同时, 抛弃 ATM 信令, 减少网络资源消耗, 保障 QoS, 从而无缝地将 IP 技术与 ATM 技术相融合, 其标签式的控制和转发的分离机制在一定程度上能够进行多种不同协议的统一, 实现卫星网络中多种网络的融合互通。因此, 设计一种 MPLS 空间信息网络路由策略, 实现不同异构网络的融合互通, 成为一个关键问题。

**基金项目:** 国家自然科学基金“空间信息网络协议”(61722105)。

**作者简介:** 潘成胜 (1962—), 男, 教授、博士生导师, 主研方向为无线网络、空地一体化网络结构体系与协议; 贾亚茹, 硕士研究生; 蔡睿妍, 副教授; 杨力, 教授。

**收稿日期:** 2017-12-25 **修回日期:** 2018-02-08 **E-mail:** adolph993@163.com

文献[9]在 ULISS 项目中应用 MPLS 融合机制,实现了不同功能层的分离,能够在卫星网络上高效地传输各种数据,但其复杂的协议转换增大了系统开销。文献[10]构建基于 MPLS 技术的多业务网络融合拓扑,该拓扑能在一个 MPLS 网络上承载多种业务系统,但在实际应用中,还需要对其进行更深入的理论分析并提供技术支撑。文献[11-12]将 MPLS 技术应用于 GEO 卫星网络,但是其分别在链路层和网络层实现了 IP 和 ATM 的数据传输。文献[13]提出一种基于开放最短路径优先(Open Shortest Path First, OSPF)的多层卫星网络路由策略,该策略通过减少路径经过的跳数,有效地降低了通信开销,但其未实现空间网络与互联网的高效融合。

MPLS 空间信息网络资源受限,因此,多种多路径算法被提出,以提高网络资源利用率。文献[14-16]从多路径分流和流量工程方面出发,实现了单标签多 LSP(Label Switched Path)路径的并行转发,减少了网络拥塞,但这种方法不适用于卫星网络的高动态、长时延特性。文献[17]从传输时延方面考虑,满足了卫星网络的传输长时延、拓扑高动态特性,但其计算复杂度较大,且没有考虑链路的生存时间。文献[18]优化 LSP,实现最小化通信开销,但其未应用到卫星 MPLS 的负载均衡中。

本文在卫星 MPLS 组网的基础上,提出一种基于 MPLS 的空间信息网络路由策略,以实现 IP 和 ATM 2 种技术体制的融合。在融合过程中,提出基于跳数和链路利用率的路径选择算法,避免选择拥塞路径,从而优化网络传输性能。

## 1 基于 MPLS 的空间信息网络组网方案

表 1 对 IP、ATM 及 MPLS 技术在卫星中的组网性能进行比较。IP 技术和 ATM 技术在各自的发展领域都遇到了瓶颈,均需要借助对方以进一步发展,

IP 需利用 ATM 技术提高传输速度,ATM 要具有 IP 的承载能力,以拓展其应用领域。现有卫星系统承担着互联各种异构网络的任务,在卫星系统中将 ATM 技术和 IP 技术相融合是实现互联互通的必然趋势。而 MPLS 技术结合了 IP 和 ATM 的优点,是当前卫星组网的一种解决方案。

表 1 IP、ATM 及 MPLS 技术的性能比较

性能	IP	ATM	MPLS
连接方式	无连接	面向连接	面向连接
路由灵活性	高	低	高
可扩展性	强	弱	强
组播	支持	不支持	支持
系统资源利用	差	好	好
网络融合能力	强	弱	强

MPLS 不是一个完整的网络体制,它必须和 IP 技术结合在一起。MPLS 充分利用 IP 的控制协议来引导 ATM 的数据交换,继承了 IP 技术负载均衡的能力,在此基础上加以改进,保证了其网络路由的灵活性。此外,MPLS 分组转发是基于定长标签的,简化了转发机制,解决了 ATM 可扩展性弱的问题,从而无缝地将 IP 技术的优点融合到 ATM 的高效转发中。

为更好地对空间信息网络下不同网络的融合问题进行研究,本文采用文献[19]提出的基于卫星 MPLS 的组网方案,如图 1 所示。该架构包含 3 层:

1) CE1 ~ CE41 为最外层,即各种可以通过卫星网络相互通信的终端节点,包括 IP 网络、ATM 业务、移动终端等。

2) LER1 ~ LER4 为中间层,即边缘路由器 LER (Label Edge Router)。

3) 最内层为核心层,包括低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星节点。

该架构层次分明,各层之间分工明确,在很大程度上保证了网络连接的稳定性。

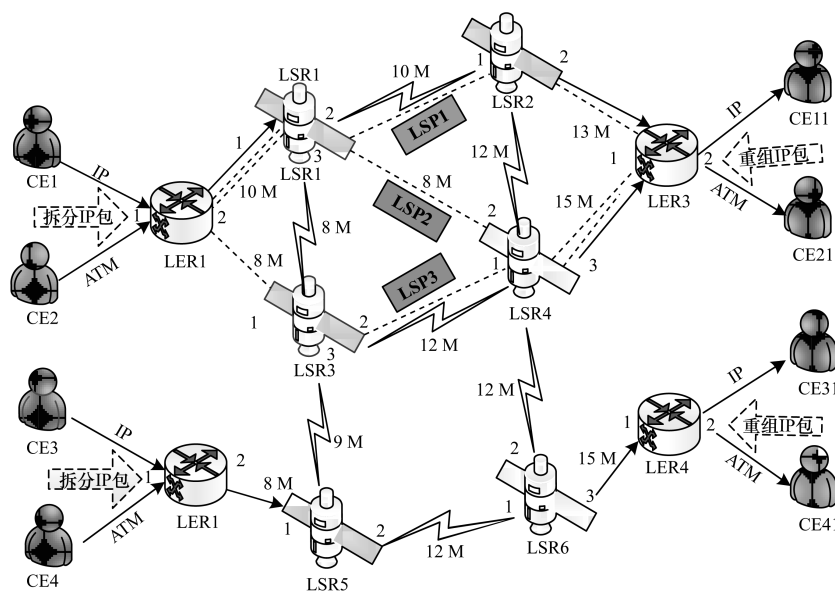


图 1 卫星 MPLS 组网方案架构

## 2 基于路径选择算法的路由策略

要建设以卫星 MPLS 为主体的天地一体化网络,就必须有基于星间链路(Inter Satellite Link, ISL)的高效路由策略。基于 MPLS 的空间信息网络路由策略需要知道每条链路上的剩余带宽和通信量,从而合理地选择最优传输路径。根据时延最小的选路准则比较链路的传输时延,当卫星路由采用最短路径时,通常时延最小。本文用最小跳数路径替代最短路径,建立最小跳数路径时考虑链路忙闲程度,即考虑链路的带宽利用率情况,以避免选择负载过大的路径。

### 2.1 带宽约束的数学描述

设空间信息网络在某个时段内的拓扑结构图为  $G(V, E, C)$ , 其中,  $V$  为节点集,  $v \in V$  为图  $G$  的一个节点,  $E$  是链路的集合,  $C$  是与  $V, E$  相关的带宽或其他约束条件。用  $U$  表示 LSP 的端点集合,  $K$  表示 LSP 集合,  $i$  表示网络中的路径,  $i \in K$ 。  $S_1, T_1$  分别为入口节点和出口节点,  $X_j^i$  表示路径  $i$  是否经过链路  $j$ ,  $j \in E$ ,  $n_i$  为路径  $i$  的跳数限制。本文优化目标是最小化链路利用率, 也即最大化链路的剩余带宽。网络路由优化问题的数学模型描述如下:

记链路利用率为  $\delta_i = \prod_j \delta_{ij}$ , 其表示路径  $i$  在一定时间内的忙闲程度。其中,  $\delta_{ij} = b_{ij}/c_{ij}$ ,  $j$  为最小跳数路径中第  $i$  条路径包含的链路,  $b_{ij}$  为路径  $i$  上链路  $j$  的需求带宽,  $c_{ij}$  为链路  $j$  的剩余带宽, 且  $b_{ij} \leq c_{ij}$ 。

优化目标为:

$$\min \delta_i \quad (1)$$

约束条件为:

$$\sum_{j \in E} X_j^i \leq n_i \quad (2)$$

$$X_j^i = \begin{cases} 1, & \text{路径 } i \text{ 流经链路 } j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$\sum_{i: S_1 = m} X_j^i > 0, \quad \forall m \in U \quad (4)$$

$$\sum_{i: T_1 = m} X_j^i > 0, \quad \forall m \in U \quad (5)$$

$$\sum_{i: S_1 = m} X_j^i - \sum_{i: T_1 = m} X_j^i = 0, \quad \forall m \in U \quad (6)$$

其中, 式(2)是入口节点到出口节点的路径跳数限制, 式(3)表示限制为单路径, 式(4)~式(6)是对 LSP 的属性约束, 分别规定每个入口 LER 一定存在由该节点建立的 LSP, 以及每个出口 LER 一定存在以它为结束的 LSP, 且 LSP 不会终止于任意中间节点。

### 2.2 基于跳数和带宽利用率的路径选择算法

跳数反映资源的占用概况, 数据流穿过的跳数越多, 资源消耗越大。利用单一的带宽利用率或跳数, 都不能很好地衡量链路的资源占用情况。因此, 本文将带宽利用率和跳数这 2 个参数相结合, 作为资源占用的评估标准。令链路占用的资源函数为:

$$R_i = \delta_i N_i \quad (7)$$

其中,  $N_i$  为路径  $i$  的跳数, 其表示为:

$$R_i = \left( \prod_j \frac{b_{ij}}{c_{ij}} \right) N_i \quad (8)$$

假设数据包在向下一跳转发前, 节点已经获得下一跳节点的状态信息, 包括下一跳选择的链路带宽。如图 1 所示, 以边缘路由器 LER1 到 LER2 为例, LSP 选路过程如下:

1) 任何一条显示 LSP 一旦建立, 则该 LSP 上的跳数为固定。根据文献[20]方法, 在入口节点 LER1 和出口节点 LER2 间寻找多条可选路径, 选出最小跳数路径, 并记录每条路径的跳数。

2) 当在 LER1 到 LER2 之间有数据流请求时, 查询卫星网络中各链路的剩余带宽, 删除卫星网络中剩余带宽小于需求带宽的链路。

3) 根据式(1)~式(6)对第 1 步中的可选路径计算带宽利用率  $\delta_i$ , 并在这些路径中选择带宽利用率最小的路径。

4) 计算每条路径的资源函数, 选择资源函数  $R_i$  最小的链路作为传输路径, 从而引导数据流选择合理的路径进行传输。

5) 更新链路剩余带宽, 并恢复第 2 步中删除的链路, 为下一次链路选择做准备。

从上述步骤可以看出, 当所有 LSP 的跳数相同时, 该算法的评估标准是带宽利用率最小。经计算求得路径 LSP1 的资源函数  $R_i$  最小, 因此, 选择路径 LSP1 作为传输路径。

## 3 路径选择算法实现

根据上述选路过程实现 MPLS 网络中的数据转发过程。本文采用 VPI/VCI (VPI 代表路径, VCI 代表链路节点值, 且设定 LSP1 的 VPI = 1, LSP2 的 VPI = 2, LSP3 的 VPI = 3) 作为卫星 MPLS 标签, 将 ATM 和 IP 2 种网络纳入一个统一体制中, 实现过程如图 1 所示, 卫星 MPLS 工作过程分为转发表生成和数据转发 2 个阶段。

### 3.1 转发表生成阶段

转发表生成阶段具体如下:

1) 卫星边缘路由器 LER1 判断接收到的定长数据为 ATM 信元, 不定长数据为 IP 包, LER1 将 IP 包分割重组成 44 Byte 的定长数据, 装载至卫星 MPLS 网络传输的分组内。LER1 将所有处理后的数据根据相同的入口/出口边缘路由器划分转发等价类 (Forwarding Equivalence Class, FEC), 映射成初始 VPI/VCI 值为 1/32 的 MPLS 标签, 并将标签值为 1/32 的 VPI/VCI、出端口、下一跳转发入口 NHLFE (Next Hop Label Forwarding Entry) 发送给卫星 LSR1, LER1 保存这些信息并形成 LER1 标签转发表, 如表 2 所示。

表 2 LER1 的标签转发表

入端口	入标签 VPI/VCI	出标签 VPI/VCI	出端口	NHLFE
1	—/—	1/32	2	LSR1-1

2) 卫星 LSR1-1 端口收到 LER1 发送的标签映射信息后, 将标签改为 1/33, 并确定下一跳入口为 LSR2-1, 将此时的标签、出端口、NHLFE 保存到 LSR1 的标签转发表中, 如表 3 所示, 然后将此消息发送给卫星 LSR2。卫星 LSR2 进行相同的处理, 把收到的标签 1/33 更新为 1/34, 并形成自己的转发表, 如表 4 所示。

表 3 LSR1 的标签转发表

入端口	入标签 VPI/VCI	出标签 VPI/VCI	出端口	NHLFE
1	1/32	1/33	2	LSR2-1
1	1/32	2/33	3	LSR4-2

表 4 LSR2 的标签转发表

入端口	入标签 VPI/VCI	出标签 VPI/VCI	出端口	NHLFE
1	1/33	1/34	2	LER2-1

3) LER2-1 端口接收到 LSR2 发送的标签映射消息后, 把出端口改为 2, 然后通知其他端口。由于 LER2 为出口边缘路由器, 因此将现在的分组标签 1/34 去掉, 此时分组变成空标签, 如表 5 所示。

表 5 LER2 的标签转发表

入端口	入标签 VPI/VCI	出标签 VPI/VCI	出端口
1	1/34	—/—	2

### 3.2 数据转发阶段

数据转发阶段具体如下:

1) 数据进入卫星 MPLS 的边缘节点, 入口 LER1 读出数据分组组头, 然后查找标签转发表 1 得到入标签及出端口, 并向指定的端口输出。

2) LSR 收到带有标签的数据分组, 从分组中提取标签, 以标签为指针查找标签转发表 2、表 3, 分别用表中的出标签代替所提取的标签, 新的分组根据转发表中所指的输出端口发送给下一跳。

3) 出口 LER2 接收到数据分组后, 将标签去掉, 变成大小为 44 Byte 和 48 Byte 的 2 种数据, 将 44 Byte 的数据重组成 IP 包, 48 Byte 的数据还原成 ATM 信元, 并将重组后的 IP 包和 ATM 信元分别从对应的端口 CE11 和 CE21 输出。

## 4 仿真结果与分析

### 4.1 仿真环境设置

本文采用 Iridium 卫星星座拓扑, 使用 OPNET 软件仿真卫星 MPLS 融合网络, 将其与 NO-MPLS 网络(采用传统内部网关协议 IGP)进行比较, 并将本文策略与 OSPF 策略进行对比。卫星 MPLS 网络模型结构如图 2 所示, 其中, 节点 0 发送 IP 分组到节点 10, 节点 1 发送 ATM 分组到节点 11, 建立 2 条 LSP, 分别为 LSP1: LER1 → LSR1 → LSR2 → LSR3 → LSR4 → LER2 与 LSP2: LER1 → LSR1 → LSR4 → LER2。从节点 2 到节点 9 均要经过链路 LER1 → LSR1, 该链路是数据传输的必经之路, 本文将其定义为关键路径。实验参数设定为: 核心链路使用

PPP\_SONET\_OC3 模块, 边缘链路均使用 DS3 模块, 每条路径的总带宽为 30 Mb, 其他链路带宽设置为 10 Mb/s, 设定传输速率为 8 Mb/s, 数据包长度为 4 000 bit, 仿真时间为 30 min, LEO 卫星轨道参数设置如表 6 所示。

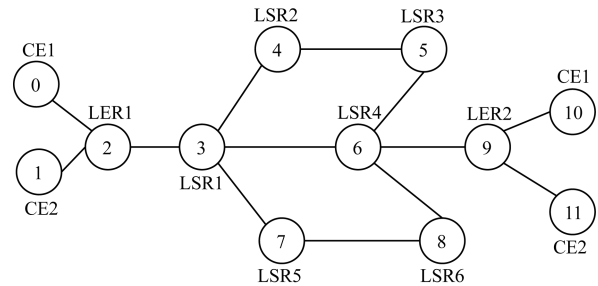


图 2 卫星网络仿真拓扑

表 6 LEO 卫星轨道参数设置

参数名称	参数值
轨道高度/km	780
轨道平面数	6
轨道内卫星数	11
轨道倾角/(°)	86.4
每个卫星星际链路数	4
星际链路带宽/Mb	10

### 4.2 算法性能分析

#### 4.2.1 MPLS 与 NO-MPLS 性能比较

为验证 MPLS 网络的有效性, 将 MPLS 网络和 NO-MPLS 网络的传输时延进行比较。由于 IP 在传输时每一跳要先查找路由表后确定下一跳, 导致其传输时延较大, 而 ATM 是面向连接的, 建立路径以后只进行数据传输, 即在传输过程中无时间消耗, 只在数据量很大时会发生拥塞, 从而产生时延。因此, IP 和 ATM 数据量所占比重的大小会对时延产生影响。MPLS 网络与 IP 占比不同的 NO-MPLS 网络的时延比较结果如图 3 所示。从图 3 可以看出, IP 占比 40% 时, NO-MPLS 时延较小, 在 0.54 ms 左右, 随着 IP 占比的增加, 其时延变大, IP 占比 80% 时, NO-MPLS 时延比 MPLS 大约 13.7%。且在 25 min 以后, 随着数据量的增加, NO-MPLS 时延有逐渐变大的趋势, MPLS 时延基本保持不变。

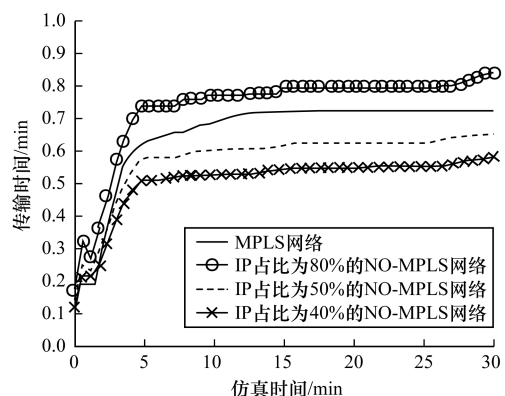


图 3 2 种网络传输时延对比

4.2.2 本文策略与 OSPF 策略比较

将本文策略和 OSPF 策略在吞吐量、传输时延、稳定性、带宽利用率 4 个方面进行比较。

图 4 所示为吞吐量对比结果。从图 4 可以看出,随着时间的变化,吞吐量不断变化,刚开始传输数据流时,2 种算法的吞吐量较小,2 min 左右时吞吐量开始趋于稳定。由于 OSPF 策略对转发路径的选择不够灵活,导致吞吐量不能达到最优值,其网络吞吐量均值为 4 300 kb/s,且波动较大。本文策略能够精确地引导数据流绕过可能出现拥堵的路径,使吞吐量达到最优,其吞吐量均值约为 5 500 kb/s。

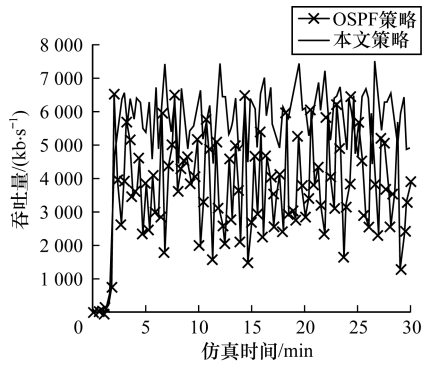


图 4 2 种策略吞吐量对比

图 5 所示为 2 种策略传输时延比较结果。从图 5 可以看出,OSPF 策略时延较大,且时延抖动较剧烈,原因是 OSPF 只选择跳数最短的路径,并不考虑链路的负载,当数据都集中到某一条路径上时,该路径将发生拥塞,数据不能很快到达下一跳,从而造成较大的时延。本文策略在 OSPF 策略的基础上,考虑带宽利用率,选择带宽利用率最小的路径,从而实现了数据的高速转发。

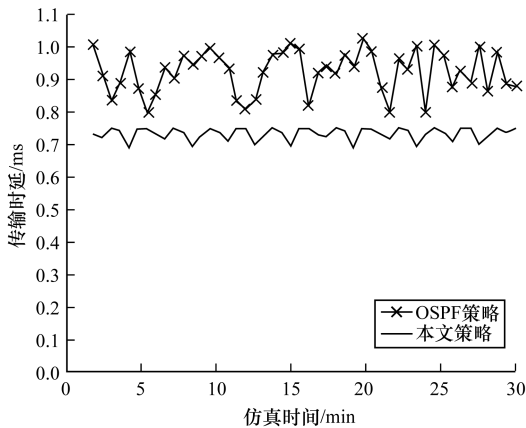


图 5 2 种策略传输时延对比

对图 5 中网络时延的稳定性进行进一步分析,等距采样 100 个采样点后对这 100 个采样点求方差,2 种策略的稳定性对比结果如表 7 所示。从表 7 可以看出,相比 OSPF 策略,本文策略的方差与最大时延差较小,其稳定性明显优于 OSPF。

表 7 2 种策略稳定性比较结果

策略	平均时延/ms	方差	最大时延差/ms	时延抖动
本文策略	0.73	3.927e-04	0.05	较小
OSPF 策略	0.95	3.675e-03	0.20	大

图 6 所示为 2 种策略的带宽利用率对比结果。其中,带宽利用率大小由需求带宽与剩余带宽的比值来衡量,图 6 中纵坐标值越小,表示策略性能越好。从图 6 可以看出,在相同网络资源环境下,数据量较小时,2 种策略的带宽利用率相差不大且都较低,随着数据量的增长,网络的带宽利用率逐渐升高,且 OSPF 策略上升的幅度比本文策略大,即本文策略在带宽利用率方面优于 OSPF 策略。原因是采用 OSPF 策略的 NO-MPLS 网络未考虑链路负载情况,其网络资源得不到合理利用,而基于路径选择策略的 MPLS 网络尽量避免 LSP 发生拥塞,其能够合理利用链路资源,优化资源利用。

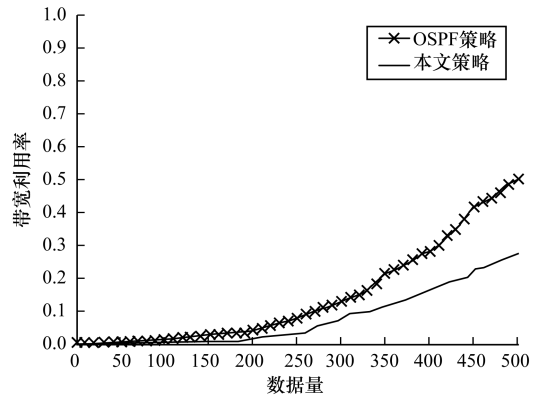


图 6 2 种策略带宽利用率对比

通过以上结果分析可以看出:采用 MPLS 技术的卫星网络能够实现 ATM 和 IP 技术的融合,降低数据传输时延;本文策略在选择路径时能很好地均衡各个链路的负载,增加吞吐量,优化链路利用率,提高网络的稳定性。

5 结束语

本文提出一种基于 MPLS 的空间信息网络路由策略,该策略能实现 IP 技术与 ATM 技术的融合互通,降低网络传输时延,有效优化链路的传输性能。实验结果验证了该策略的高效性与稳定性。下一步将通过建立备份路径或选择其他可行路径的方式,使该策略可以自适应地选择负载少的路径,从而解决关键路径超负荷的问题。

参考文献

[1] 徐明伟,夏安青,杨莹,等.天地一体化网络域内路由协议 OSPF + [J].清华大学学报(自然科学版),2017,57(1):12-17.  
 [2] 黄阳,宋鹏. MPLS 在卫星网络中的应用探讨 [C]//第十一届卫星通信学术年会论文集.北京:[出版者不详],2015:217-222.

- [ 3 ] FARSEROTU J, PRASAD R. A survey of future broadband multimedia satellite systems, issue and trends [ J ]. IEEE Communications Magazine, 2000, 38(6) : 128-133.
- [ 4 ] CLARIZIA M P, GOMMENGINGER C, GLEASON S, et al. Global Navigation Satellite System-Reflectometry (GNSS-R) from the UK-DMC satellite for remote sensing of the ocean surface [ C ] // Proceedings of 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2008 : 276-279.
- [ 5 ] OWOADE A A, OSUNMAKINDE I O. Resilience and survivability of ATM node-node network failures using ant colony swarm intelligent modelling [ C ] // Proceedings of 2016 SAI Computing Conference. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2016 : 16-28.
- [ 6 ] BUSTER D. Towards IP for space-based communications systems; a CISCO systems assessment of a single board router [ C ] // Proceedings of Military Communications Conference. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2005 : 56-58.
- [ 7 ] OSAKO M, TANIGAWA Y, HIROTA Y, et al. High speed multipath computation algorithm for optical circuit and packet switching integrated network [ C ] // Proceedings of IEEE International Conference on High Performance Switching and Routing. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2016 : 110-111.
- [ 8 ] 龚向阳, 金跃辉, 王文东, 等. 宽带通信网原理 [ M ]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006.
- [ 9 ] DUBOIS E, BAUDOINY C, HAARDT C, et al. IP/MPLS satellite network convergence in ULISS project [ C ] // Proceedings of International Workshop on Signal Processing for Space Communications. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2008 : 1-6.
- [ 10 ] 胡士斌, 任松, 卢艳. MPLS VPN 在航天发射场多业务网络融合中的应用研究 [ J ]. 计算机工程与应用, 2016, 52(增刊) : 199-203.
- [ 11 ] TRUCHLY P, URBANOVIC M. MPLS throughput over GEO satellites [ C ] // Proceedings of International Symposium Elmar-focused on Multimedia Signal Processing and Communications. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2006 : 305-308.
- [ 12 ] ZHAI L J, LI Z Y, CAO Z G. A novel method of LSP's protection and restoration in Ka-band satellite MPLS network [ C ] // Proceedings of Asia-pacific Conference on Communications. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2010 : 615-619.
- [ 13 ] LEE J W, LEE J W, KIM T W, et al. Satellite over Satellite (SOS) network; a novel concept of hierarchical architecture and routing in satellite network [ C ] // Proceedings of the 25th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2000 : 392-399.
- [ 14 ] 韩来权, 汪晋宽, 王兴伟. 基于可编程路由技术的 MPLS 单标签分流传输算法 [ J ]. 通信学报, 2014, 35(5) : 155-159.
- [ 15 ] 崔丙锋, 杨震, 丁炜. 一种基于跳数和时延的 MPLS 自适应流量工程算法 [ J ]. 通信学报, 2005, 26(3) : 64-67.
- [ 16 ] LEMESHKO O, VAVENKO T, OVCHINNIKOV K. Design of multipath routing scheme with load balancing in MPLS-network [ C ] // Proceedings of the 12th International Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics. Washington D. C. , USA : IEEE Press, 2013 : 18-24.
- [ 17 ] 肖甫, 孙力娟, 叶晓国, 等. 面向卫星网络的流量工程路由算法 [ J ]. 通信学报, 2011, 32(5) : 104-111.
- [ 18 ] 袁天, 梁俊. 基于遗传算法的卫星 MPLS 网络路由协议研究 [ J ]. 信息工程大学学报, 2013, 14(5) : 548-551.
- [ 19 ] 翟立君. 卫星 MPLS 网络关键技术研究 [ D ]. 北京: 清华大学, 2010.
- [ 20 ] 邓德鑫. 多层卫星网络通信路由设计 [ D ]. 杭州: 浙江大学, 2012.

编辑 吴云芳

(上接第 77 页)

- [ 4 ] 冯仕红. 基于设计特征和参数化的工程化界面设计模式研究 [ D ]. 济南: 山东大学, 2008.
- [ 5 ] 李楠楠. 基于 Pattern 的用户界面呈现模型的研究与实现 [ D ]. 西安: 西北大学, 2016.
- [ 6 ] NEIL T. Mobile design pattern gallery: UI patterns for smartphone apps [ M ]. [ S. 1 ] : O' Reilly Media, Inc. , 2014.
- [ 7 ] ENGEL J, HERDIN C, MAERTIN C. Exploiting HCI pattern collections for user interface generation [ C ] // Proceedings of the 4th International Conferences on Pervasive Patterns and Applications. Nice, France : [ s. n. ], 2012 : 36-44.
- [ 8 ] 杜一, 邓昌智, 田丰, 等. 一种可扩展的用户界面描述语言 [ J ]. 软件学报, 2013, 24(5) : 1127-1142.
- [ 9 ] MARC A, CONSTANTINOS P, ALAN L, et al. UIML: an appliance-independent XML user interface language [ J ]. Computer Network, 1999, 31(11) : 1695-1708.
- [ 10 ] 吴昊, 华庆一, 常言说, 等. 一个轻量级多设备用户界面描述语言 MDUIDL [ J ]. 计算机工程与应用, 2011, 47(35) : 14-21.
- [ 11 ] 齐晓东, 华庆一, 吴昊, 等. 基于模型的用户界面变压器设计 [ J ]. 计算机工程, 2012, 38(9) : 43-45.
- [ 12 ] ABRAMS M, PHANOURIOUS C. UIML: an appliance-independent XML user interface language [ EB/OL ]. [ 2018-06-10 ]. <http://www8.org/w8-papers/5b-hypertext-media/uiml/uiml.html>, 2002.
- [ 13 ] 吴昊, 华庆一. 基于 UIML 的多设备用户界面生成方法 [ J ]. 计算机工程与应用, 2016, 52(16) : 17-22.
- [ 14 ] 常言说. 基于模型的高可用性用户界面开发研究 [ D ]. 西安: 西北大学, 2013.
- [ 15 ] HUMAYOUN S R, HESS S, KIEFER F, et al. Patterns for designing scalable mobile app user interfaces for multiple platforms [ C ] // Proceedings of BCS-HCI' 14. Southport, UK : [ s. n. ], 2014 : 317-322.

编辑 索书志