

适用于卫星光网络的改进 CR-LDP

庞成光¹, 郭秉礼^{1*}, 周伟², 杨昌胜², 傅天文², 蒋明毅¹, 王逸翔¹, 刘奕廷¹, 傅铭江¹, 罗青松³

(1. 北京邮电大学 电子工程学院, 北京 100089; 2. 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;

3. 中国电子科技集团公司 第三十四研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对空间激光骨干网中卫星链路采用高级在轨系统(AOS)帧进行数据传输、星上资源有限和数据传输时延较长等特点, 为了在卫星光网络中实现标签交换和流量工程, 首先对标准的基于路由受限标签分发协议(CR-LDP)进行了改进, 包括对协议消息大小设置定长, 设计面向无连接的传输层协议, 减小协议开销和对双向标签交换路径(LSP)的建立流程进行改进, 然后进行了软件仿真和硬件测试。结果表明: 改进后的 CR-LDP 在建链时资源消耗更小, 支持双向 LSP 建立且流程简单有效。

关键词: 卫星光网络; 星间激光链路; 标签分发协议; 流量工程; VxWorks

中图分类号: TN929.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-5561(2022)04-0032-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Improved CR-LDP for satellite optical network

PANG Chengguang¹, GUO Bingli^{1*}, ZHOU Wei², YANG Changsheng²,FU Tianwen², JIANG Mingyi¹, WANG Yixiang¹, LIU Yiting¹, FU Mingjiang¹, LUO Qingsong³

(1. School of Electronic Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100089, China;

2. School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin Guangxi 541004, China;

3. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: In view of the characteristics of satellite link in space laser backbone network using advanced orbiting systems(AOS) frame for data transmission, limited on-board resources and long data transmission delay, in order to realize label switching and traffic engineering in satellite optical networks, the standard route based restricted label distribution protocol(CR-LDP) is improved, including setting a fixed length for the size of protocol messages, designing a connectionless transport layer protocol, reducing protocol overhead and improving the establishment process of bidirectional label switching path (LSP), and then the software simulation and hardware test are carried out. The results show that the improved CR-LDP protocol has less resource consumption, supports bidirectional LSP establishment, and the process is simple and effective.

Key words: satellite optical network, intersatellite optical communication, label distribution protocol, traffic engineering, VxWorks

0 引言

随着卫星激光通信技术的发展, 建立覆盖全球的空间激光骨干网成为一种趋势。由于星上资源有限,

收稿日期: 2021-08-05。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 61771074)资助。

作者简介: 庞成光(1998—), 男, 硕士研究生, 本科毕业于西安邮电大学, 现就读于北京邮电大学电子工程学院电子科学与技术专业, 主要研究方向为天地一体化网络控制技术, 参与过多个卫星光网络领域的科研项目。

* 通信作者: 郭秉礼(1982—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为天地一体化网络控制技术、数据中心与高性能计算中心的光互连网络技术。



如何降低卫星节点的数据转发压力成为构建激光骨干网急需解决的问题。目前, 虽然有星载异步传输模式(ATM)交换、星载 IP 交换 2 种交换技术^[1]用于解决此问题, 但星载 ATM 交换对拓扑频繁变化的卫星网络、复杂的信令系统难以适应, 信令开销巨大^[2]; 星载 IP 交换基于逐跳的转发策略, 每一跳都要进行 IP 的最长前缀匹配查表, 导致星上转发速率慢, 且服务质量(QoS)保证能力弱^[3]。参考地面网络中多协议标签交换(MPLS)技术, 采用改进的基于路由受限标签分发协议(CR-LDP)在卫星光网络中实现标签交换, 可以解决上述 2 种交换技术遇到的问题^[4]。

本文参考地面标准 CR-LDP, 提出一种适用于卫星光网络的改进 CR-LDP。

1 卫星光网络 MPLS 体系架构

卫星光网络 MPLS 体系架构如图 1 所示^[10-11], 整个协议体系分为管理平面、控制平面以及传送平面。控制平面中, 连接控制模块负责对模块间交互并提供控制功能, 其对信令模块的主要接口功能是发起标签交换路径(LSP)建立和删除请求; 路由模块、链路管理模块和信令模块分别采用开放式最短路径优先(OSPF)协议、链路管理协议(LMP)和 CR-LDP, 其中信令模块配合路由模块的路由功能和链路管理模块的资源管理功能完成 LSP 建立。本文主要研究用于信令模块的 CR-LDP, 其架构如图 2 所示。数据收发模块负责协议数据收发, 邻居管理模块负责对等体发现和邻居关系维护, 标签管理模块主要负责标签分配和维护, 定时器模块则负责系统的时钟同步。同时, CR-LDP 提供了建链所需的路由、标签和资源操作接口。

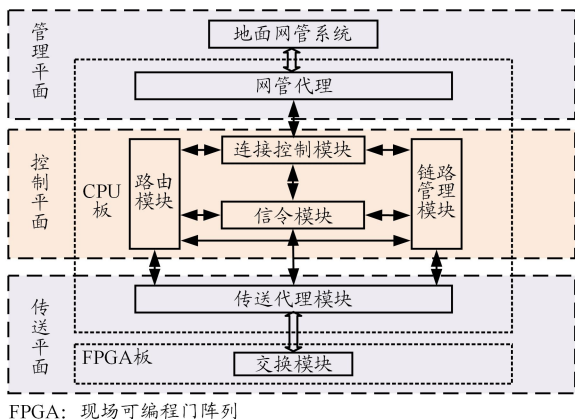


图 1 MPLS 体系架构

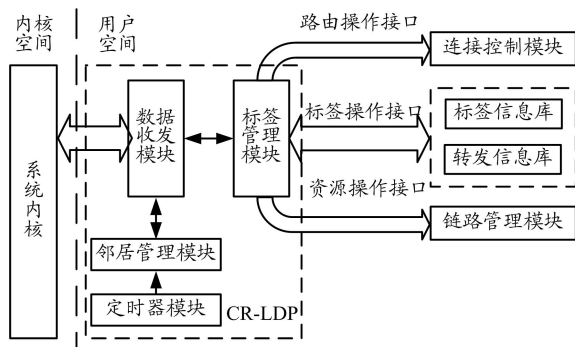


图 2 CR-LDP 架构

2 标准 CR-LDP 的不足

现有的标准 CR-LDP 直接运用于卫星网络存在以下问题:

①带宽资源消耗大。在地面网络中, CR-LDP 除组播的 Hello 消息之外, 其它的消息均采用传输控制协议/因特网互联协议(TCP/IP)进行传送。由于 TCP 本身需要在建立连接前进行 3 次握手, 会造成一定时延。在连接过程中, 会消耗大量的带宽资源, 且在节点内核需要一定资源维持 TCP 状态机。

②控制开销大。CR-LDP 规范中未给出双向 LSP 建立流程^[8], 现有的双向 LSP 建立流程^[9]如图 3 所示。链路先进行正向 LSP 的建立, 待建立完成后由源端 R_0 通知另一端 R_3 开始建立反向 LSP, 其实际过程是显式创建 2 条单向 LSP。这会导致在双向 LSP 建立过程中, 节点之间的交互比较繁琐, 而且单独建立了 2 条单向 LSP 路径, 控制开销大。

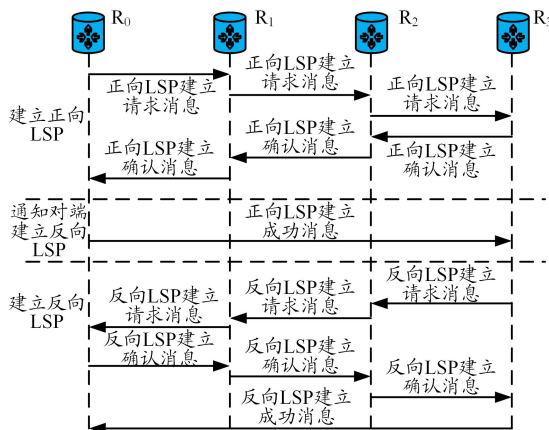


图 3 现有双向 LSP 建立流程

3 CR-LDP 的改进

针对 CR-LDP 在卫星网络中应用面临的问题, 本文对标准 CR-LDP 进行相应的改进, 以简化交互过程, 节约星载平台有限的资源。具体改进措施如下:

①协议消息大小设置定长。由于卫星遥测的上传/下载信道限制了单个数据包大小, 当数据包大于 200 字节时会进行限速处理。因此, 将改进 CR-LDP 的消息大小设置为定长 160 字节以实现数据稳定的高速传输。

②设计面向无连接的传输层协议。TCP 协议拥塞控制机制并不适合卫星网络环境, 用户数据报协议(UDP)并不提供可靠传输。因此, 本文设计一套面向无连接的传输层协议, 在协议数据头部引入确认字符(ACK)字段, 当数据到达目的节点后会返回响应数据包, 降低由于握手机制和拥塞控制产生的性能损耗, 同时提高数据传输可靠性。

③减小协议开销, 将协议数据放入高级在轨系统

庞成光,郭秉礼,周伟,等;适用于卫星光网络的改进 CR-LDP

(AOS)帧插入域中。卫星激光链路采用 AOS 帧进行数据传输。协议数据为连续的传输帧的固定字节,信息在源端被拆分为多个部分并连续封装入传输帧的插入域中,在宿端被卫星读取、组装还原给协议进程,卫星节点的控制平面对协议数据进行处理,这使得其传输速率稳定、时延抖动较小,并且不使用传输帧的数据域资源,也不影响业务数据的传输速率。

④对双向 LSP 的建立流程进行改进。CR-LDP 负责转发等价类(FEC)的分类、标签的分配以及 LSP 的建立和维护等操作。改进的双向 LSP 的建立流程如图 4 所示,标签请求消息中不仅带正向 LSP 建立所需 Type-length-value (TLV) 参数,而且包括反向 LSP 的相关 FEC 参数、标签参数和流量参数。标签参数中携带前一个节点分配给后一个节点的标签。下游节点收到标签消息后,会进行资源预留并且保存上游节点分配的标签。前向标签分配以后,末节点会反向给源节点分配标签,待源节点收到标签以后,双向 LSP 完成建立。业务数据到达标记边缘路由器(LER)时,会查询相应的标签表,进行数据转发。

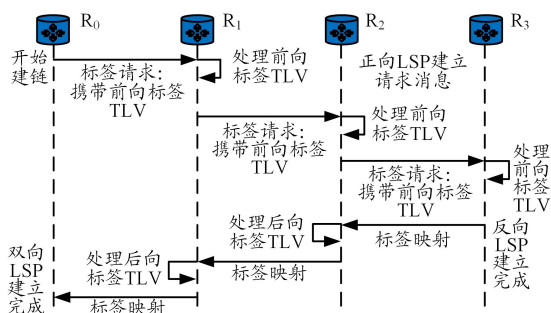


图 4 改进的双向 LSP 建立流程

4 测试验证

4.1 软件仿真

CR-LDP 在卫星光网络场景下运行的前提是物理层中卫星激光链路能够实现正常通信。对于星间激光链路,光传输信道为真空环境,影响接收端探测器接收信号光功率的因素主要包括:光源的输出功率、发射和接收光学系统的平台抖动、链路传播距离和背景光的干扰等。一般地,星间激光链路方程通用表达式^[12]为

$$P_R = P_T \cdot \eta_T \cdot G_T \cdot L_{TP} \cdot L_{\text{free space}} \cdot L_{\text{solar}} \cdot L_{\text{others}} \cdot L_{RP} \cdot G_R \cdot \eta_R \quad (1)$$

其中, P_R 为接收机接收到的总信号功率, P_T 为发射天线接口处的光学发射功率, η_T 、 η_R 分别为发射光学系统、接收光学系统的效率, G_T 、 G_R 分别为发射天线、接收天线增益, $L_{\text{free space}}$ 为自由空间传播损耗, L_{TP} 为发射机瞄准损耗, L_{solar} 为太阳光或接收机视场内其它恒星、行

星造成的背景光损耗, L_{others} 为其它损耗(包括发射波前损耗、分光效率损耗和光纤耦合损耗), L_{RP} 为接收机瞄准损耗。

仿真时,本文通过 Satellite Tool Kit (STK)对卫星进行轨道模拟和星座构建,根据用户指定的参数模拟激光星间链路物理参数,搭建了仿真场景,参数设置如表 1 所示。

表 1 仿真场景参数

仿真参数	数值
星座构型	MEO 星座为 Walker 24/3/1
轨道高度/km	21 528
轨道倾角/(°)	55
激光发生功率(平均)/dBm	35
工作波长/nm	800
发射天线增益/dB	99.6
发射天线效率	65%
发射波前损耗/dB	-1.87
瞄准损耗/dB	-2
背景光损耗/dB	-2
接收天线增益/dB	99.2
接收天线效率	65%
光纤耦合损失/dB	5
分光效率/dB	-1.2
误码率门限	$<10^{-6}$
接收机灵敏度/dBm	-91
链路信噪比/dB	12

在测试过程中,本文利用 VxSim 虚拟机模拟卫星节点运行 CR-LDP,分别统计建链过程中的交互消息数量和协议运行 CPU 占用率。

首先,测试 LSP

改进前后的交互消息数量,如图 5 所示。可以看出,改进前交互消息数量 $\approx 7 \times$ 节点数,改进后交互消息数量 $\approx 2 \times$ 节点数,改进后的双向 LSP 建立过程中的交互消息数量比改进前的更少。

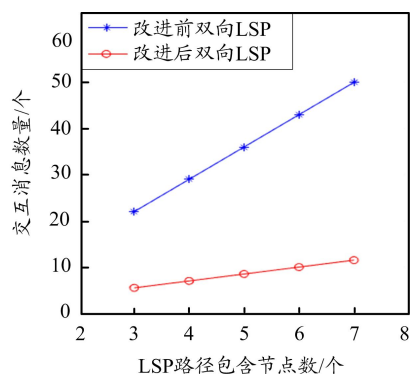


图 5 改进前后双向 LSP 交互消息数量

其次,统计协议进程运行 CPU 占用率。统计结果如图 6 所示,改进前协议运行 CPU 占用率的平均值在 1.05% 上下波动,改进后 CPU 占用率的平均值在

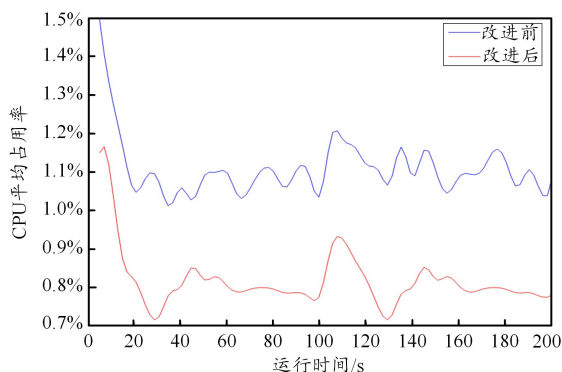


图6 协议运行时 CPU 占用率对比

0.85%左右。改进后相较于改进前的性能有小幅提升,提升的主要原因是改进后的进程未采用 socket 通信,进程数据收发通过串口实现,系统内核不需要监听多个套接字;数据包减少,数据收发模块 CPU 消耗减少。

4.2 硬件测试

基于星间激光链路的天基网络中,网络拓扑本身会规律性动态变化,导致相应链路中断,称之为正常中断;同时,星间激光链路无外保护层,易受太阳风、空间辐射等干扰。卫星或终端故障,均会使得链路中的数据传输意外中断,这2种中断链路中,前者可以根据建链规划表的内容预判正常链路中断的发生时间,从而提前采取措施,避免正常链路中断对路径的影响,同时也避免了频繁的泛洪带来的额外开销;当发生意外中断时可以由 CPU 中的路由模块重新收集路由信息并计算路径,然后通过连接控制模块将路径信息发送给信令模块,由 CR-LDP 重新建立双向 LSP 路径。

硬件测试主要测试协议功能,包括标签分配、标签转发信息库(LFIB)表和转发信息库(FIB)表的维护。LFIB 表主要内容是标签对和端口号,中间节点根据标签对和出端口完成标签替换并转发数据。FIB 表主要内容包括 FEC 和出标签,当数据到达 LER 时,LER 会根据 FIB 内容给数据插入初始标签值。

硬件测试实物、测试结构分别如图7、图8所示。其中,FPGA板负责将以太网帧适配到AOS帧、进行标签交换和数据传输,CPU协议族包括 OSPF 协议、CR-LDP 和 LMP,OSPF 协议负责路由信息收集,CR-LDP 负责 LSP 建立、维护和拆除,LMP 负责资源管理。

本文通过在搭载了 VxWorks 系统的 FPGA 硬件平台插拔低电压差分信号(LVDS)线来模拟链路的中断(包括正常中断和意外中断),测试协议的功能。由于

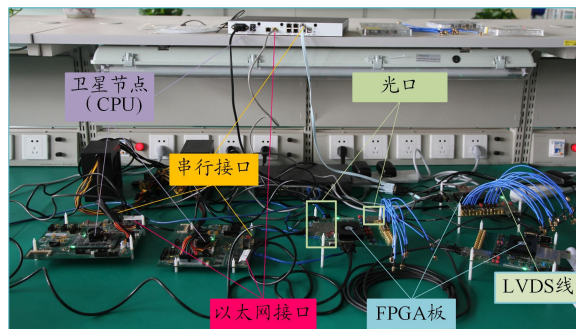


图7 硬件测试实物图

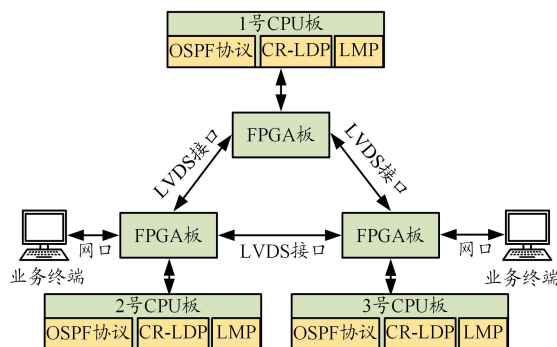


图8 测试结构图

卫星网络拓扑规律变化引起的中断(如图9所示)未触发泛洪机制,只需要读取生成的建链规划表,在无需重新计算路径的同时保证了链路的建立及对老旧链路的拆除,其中,建路命令是建立一条目的节点数为3、前向 FEC 为 0x00000030、后向 FEC 为 0x00000020、持续时间为 500 s、前向带宽为 300 Mb/s 和后向带宽为 200 Mb/s 的双向 LSP。对于链路异常中断的情况(如图10所示),系统会触发泛洪机制,通过连接控制模块来协调各个模块进行路径的计算,进而完成链路的建立及对应信息的维护。

测试采用 IPv6 的 ping 包模拟业务流量,IPv6 地址作为 FEC,通过建立双向 LSP 来对 ping 包进行转



图9 节点2链路正常中断处理

庞成光,郭秉礼,周伟,等;适用于卫星光网络的改进 CR-LDP

```

192.168.65.100(temp CPU3) 192.168.10.22(CPU3) x
attach flood2! 链路意外中断时,触发泛洪机制。
LM_RC_r recvd msg(rc rcv from lm)
--rc-- get a Link Resource State Report from lm!
--rc-- get a message from TPA! 路由模块收集路由信息
--rc-- portQueryResp write success
--rc-- get a message from TPA!
--rc-- portQueryResp write success
--rc-- get a message from TPA!
--rc-- portQueryResp write success
--rc-- get a message from TPA!
--rc-- portQueryResp write success
--rc-- get a message from TPA!
--rc-- portQueryResp write success
test_oneway_lsp_create(2,0x00000020,500,300)
value = 97 = 0x61 = 'a'
--> CC_RC_r recvd msg(rc rcv from cc)
--rc-- ccPathcalResp write success
--SP-- recv a CONNECT_CREATE message from CC
--SP-- Start Build Path! 信令模块中的CR-LDP开始建立路径
--SP-- Only one FEC!
--LM-- Resource reservation succeeded, deduct 300 bandwidth fr
om port 2 to node 2 and the rest reserved bandwidth is 1748
--LM-- write a Resource_Reserve_Resp message to SP.
--SP-- Unidirectional Bzid=5
--SP-- SP recv a LDP_Label_Request Message!!!
--SP-- This is the last node,Create the Label_Mapping_Message!
--rc-- portQueryResp write success
--LM-- Resource assignment succeeded, deduct 300 bandwidth fro
m port 2 to node 2 and the rest assigned bandwidth is 1748
--LM-- write a Resource_Assign_Resp message to SP.
--SP-- send the Dynamic_FIB_Table to TPA
--SP-- FEC.dstSubnetAddress_High64bit:0xfe80000000000020
--SP-- FEC.dstSubnetAddress_Low64bit:0x0
--SP-- bandwidth:300
--SP-- outLabel:0xffff

```

图 10 节点 2 链路异常中断处理

发。节点 2 的业务在电脑中对应的 IPv6 地址为 fe80:0:0:20::, 节点 3 的业务在电脑中对应的 IPv6 地址为 fe80:0:0:30::。当业务数据到达后,网管代理下发的建路命令会触发双向 LSP 建立流程,包括标签请求、标签映射和资源相关操作。节点 2 和节点 3 生成的 FIB 表分别如图 11、图 12 所示。当业务数据达到这 2 个节点时,传送平面会根据数据所属 FEC 查询并插入标签。

```

--SP-- Mould ready to printf FIB_Table!
--SP-- mySCID:0x2 节点ID
--SP-- lineCount:0
*****
--SP-- The 1 static FIB Item=The bizard:0x0 IPv6高64位
--SP-- FEC.dstSubnetAddress_High64bit:0xfe80000000000030
--SP-- FEC.dstSubnetAddress_Low64bit:0x0 IPv6低64位
--SP-- bandwidth:200 业务带宽
--SP-- outLabel:0x7b 出标签
--SP-- outPort:0x5 出端口

```

图 11 节点 2 FIB 表

```

--SP-- Mould ready to printf FIB_Table!
--SP-- mySCID:0x3 节点ID
--SP-- lineCount:0
*****
--SP-- The 1 static FIB Item=The bizard:0x0 IPv6高64位
--SP-- FEC.dstSubnetAddress_High64bit:0xfe80000000000020
--SP-- FEC.dstSubnetAddress_Low64bit:0x0 IPv6低64位
--SP-- bandwidth:200 业务带宽
--SP-- outLabel:0x141 出标签
--SP-- outPort:0x5 出端口

```

图 12 节点 3 FIB 表

节点 1 生成的 LFIB 表如图 13 所示。当数据到达节点 2 时会根据之前数据帧的入标签查询插入对应的出标签并进行转发。

CR-LDP 将完成更新后的标签从 CPU 板下发至 FPGA 板。当业务数据到达后,FPGA 板根据业务特征进行查表转发。节点 2 收到标签为 0x201 的数据帧,通过查询 LFIB 表后,将数据标签换为 0x301,并从对应的端口发出。

FPGA 板通过 CR-LDP 生成的标签对数据完成二

```

--SP-- Mould ready to printf LFIB_Table!
--SP-- mySCID:0x1 节点ID
--SP-- lineCount:0
*****
--SP-- The 1 static LFIB Item=The bizard:0x0
--SP-- bandwidth:200 业务带宽
--SP-- inLabel:0x7b 入标签
--SP-- outLabel:0xffff 出标签
--SP-- outport:0x2 出端口
--SP-- labelType:0x0
***
--SP-- The 2 static LFIB Item=The bizard:0x1
--SP-- bandwidth:200 业务带宽
--SP-- inLabel:0x141 入标签
--SP-- outLabel:0xffff 出标签
--SP-- outport:0x4 出端口
--SP-- labelType:0x0

```

图 13 节点 1 LFIB 表

层转发,在源节点和目的节点之间建立的双向 LSP 支持 IPv6 包的传输。

5 结束语

本文设计了一种适用于卫星光网络的改进 CR-LDP,给出了具体的改进方案、资源预留、标签分配和数据转发的过程,并基于搭载 VxWorks 系统的硬件进行了验证。目前,卫星网络中无成熟的流量工程解决方案,提出的改进 CR-LDP 为卫星光网络实现流量工程奠定了基础。

参考文献:

- [1] 马广龙,汪春霆,王旭阳. 适用于卫星网环境的标签分发协议研究[J]. 无线电工程,2014,44(3):18-20,39.
- [2] 党军宏,翟立君,曹志刚. 星载交换技术发展:第六届卫星通信新业务新技术学术年会论文集[C]. 北京:中国通信学会,2010.
- [3] 翟立君. 卫星 MPLS 网络关键技术研究[D]. 北京:清华大学,2010.
- [4] 杨磊. 基于一体化卫星网络星间链路设计及网管策略研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009.
- [5] 杨军. LDP 协议和 LSP 选路研究与实现[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [6] 张宗福. IPSec 与 MPLS 技术融合构建 VPN[J]. 电脑知识与技术(学术交流),2007(12):1547-1548,1563.
- [7] SEMERIA C. Traffic engineering for the new public network [EB/OL]. [2021-08-05]. https://paginas.fe.up.pt/~jruela/DOC/TE_NPN.pdf.
- [8] JAMOSSI B, ASH J, GIRISH M, et al. Applicability statement for CR-LDP: IETF RFC 3213[S]. Wilmington: IETF, 2002.
- [9] 华为技术有限公司. 一种为双向 LSP 建立双向转发检测的方法、系统及设备:10242218.2[P]. 2010-07-07.
- [10] HUANG S G, GUO B L, YUAN Y B, et al. Control and management of optical inter-satellite network based on CCSDS protocol (Invited)[C]// IEEE. Proceedings of 2020 European Conference on Optical Communications (ECOC). Brussels: IEEE, 2020: 1-3.
- [11] ZHANG Y, YUAN Y B, GUO B L, et al. A research study on protocol stack of space-based optical backbone network[J]. Applied Sciences, 2021, 11(5): 2367-1-2367-24.
- [12] 徐皓. 导航卫星星间链路激光调制技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2016.