

光电混合网络中基于 QoS 分层图模型的路由算法

梁薇, 黎军, 张怡, 李静玲, 崔涛

(中国空间技术研究院五院西安分院 空间微波技术国家级重点实验室, 西安 710100)

摘要: 针对在光电混合网络架构下服务质量(QoS)需求迥异的异质业务路由的问题, 提出一种基于 QoS 分层图模型的路由算法。该算法将网络中的异构链路与异质业务建立 QoS 等级映射关系, 并根据 QoS 等级建立一种 QoS 分层图模型, 完成网络虚实资源的融合。仿真结果表明: 该算法有效实现了光电异构资源的联合优化, 降低了阻塞率, 可为不同 QoS 需求的业务提供差异化服务, 优先保证高 QoS 等级业务的阻塞率性能。

关键词: 光电混合网络; QoS 分层图; 路由; 阻塞率

中图分类号: TN915 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)03-0054-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Routing algorithms based on QoS hierarchical graph model in hybrid optoelectronic networks

LIANG Wei, LI Jun, ZHANG Yi, LI Jingling, CUI Tao

(National Key Laboratory of Science and Technology on space Microwave,
Xi'an Branch of the Fifth of China Academy of Space Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: To solve the problem of heterogeneous service routing with different quality of service(QoS) requirements under hybrid optoelectronic network architecture, an routing algorithm based on the model of QoS layered-graph is proposed. The algorithm establishes a QoS level mapping relationship between heterogeneous links and heterogeneous services in the network, and establishes a hierarchical graph model of QoS according to the level of QoS to achieve the integration of virtual and real resources in the network. The simulation result shows that the algorithm effectively achieves the joint optimization of heterogeneous optical/electrical resources, reduces the blocking rate, can provide differentiated services for different QoS needs of the traffic, giving priority to ensuring the blocking performance of high-QoS-level services.

Key words: hybrid optoelectronic network; QoS layered-graph model; routing; blocking probability

0 引言

光电混合网络是一种联合电网络接入灵活、高链路利用率、光网络高带宽和高质量为一体的网络。由于兼容了光电网络的优点, 弥补了光、电网络各自的不足, 可满足多种异质业务的传输、汇聚和分发需求, 因而在空间信息网、数据中心网等应用场合受到广泛关注^[1-6]。在光电混合网络中, 由于网络节点和链路均

呈现异构特征, 通过业务聚合/疏导等控制技术在节点内可实现光电交换技术的融合^[7,8], 因此造成异构链路尤其是光电链路之间的互连互通操作复杂, 使类型多样且服务质量(Quality of Service, QoS)需求迥异的数据业务的跨层跨域路由面临困难^[9]。传统层叠式或分离式的路由算法在混合网络中存在以下缺陷: 在资源多样的条件下对不同的链路资源采用不同的路由算法, 造成算法零散、技术实现复杂等问题; 层间资源缺乏必要的协调, 难以适应光电混合网络业务类型、资源状态动态变化的特性。

目前, 针对异质业务请求的处理方法中性能较好的为基于 QoS 的业务区分处理方法^[10,11], 其基本思想是通过一定策略对到达网络的异质业务请求划分服务等级。如何对不同业务进行优先级确定以保证 QoS 需求的问题, 文献[12]提出了一种基于层次分析法的

收稿日期: 2018-04-28。

基金项目: 稳定支持基金(2018SSFNKLST-12)资助。

作者简介: 梁薇(1986-), 女, 陕西淳化人, 硕士。主要从事卫星数据交换及空间网络等方面的研究。承担“十二五”、“十三五”多项基金任务, 部分成果通过省部级鉴定。负责申请发明专利 3 项, 发表学术论文多篇。



改进 TOPSIS 算法,满足不同业务的 QoS 需求。文献[13]提出了一种考虑多个优先级 LSP 及其 QoS 的区分综合路由算法,通过划分标记交换路径的优先级来保证单个路径的 QoS。对于混合网络的路由问题,跨层跨域的联合路由机制或算法是能够解决异构链路资源互通的有效方法。文献[14]提出了将 IP 层和波分复用(WDM)层资源以代价函数形式给出,并将因网络拓扑结构和网络负载分布不均衡等产生的瓶颈链路和带宽碎片问题也统一纳入考虑,实现了 IP 和 WDM 2 层资源的联合优化。文献[15]提出了 IP/MPLS over SDH over WDM 3 层动态网络的联合优化选路算法,建立上层阻塞业务利用下层空闲资源、综合网络选路 2 种模式,充分利用了 3 层网络资源。文献[16]将混合链路分为光路、WDM 层内链路和 IP/WDM 层间链路,利用业务流持续时间已知信息,完成了低速业务流到光路的复用。但是,以上路由算法侧重于多种链路、多种资源的联合利用,对于 QoS 需求迥异的异质业务,并没有与异构链路建立直接的映射关系,且未综合考虑光电转换、波长转换和跨层疏导业务量对网络阻塞率的影响,难以直接应用于具备多颗粒度交换能力的光电混合网络。

因此,本文提出一种基于 QoS 分层图模型的光电混合网络路由算法,可实现光电虚实资源的深度融合,完成多种类型、多种粒度和多种 QoS 需求业务的快速路由,使异构的网络路径资源信息按照不同的 QoS 等级实现共享。

1 基于 QoS 分层图模型的混合路由算法

1.1 光电混合网络 QoS 分层图模型

在建立网络模型的过程中,为了将多种颗粒度、多种 QoS 需求的业务与异构链路快速建立映射关系,我们借鉴了 DiffServ 模型的概念。本文设计的基于 QoS 的业务分类和链路分类策略如表 1 和表 2 所示。

由表 1 可知,数据业务根据其业务特征、QoS 特性和优先级,可划分至不同的 QoS 等级。

由表 2 可知,通过整理混合网络拓扑信息和可用路径资源信息,包括光路径的波长数、单波长的传输带宽、虚路径的传输速率和节点内聚合疏导链路的类型等,可将链路分为节点间的传输链路和节点内层间

表 1 业务服务等级分类

服务等级	BER 性能	延迟	丢包	安全性	优先级
QA	好	最小化延迟	无丢包	确保	高
QB	良好	延迟有上界	丢包有上界	一般	一般
QC	一般	与网络负载相关	与网络负载相关	不确保	低

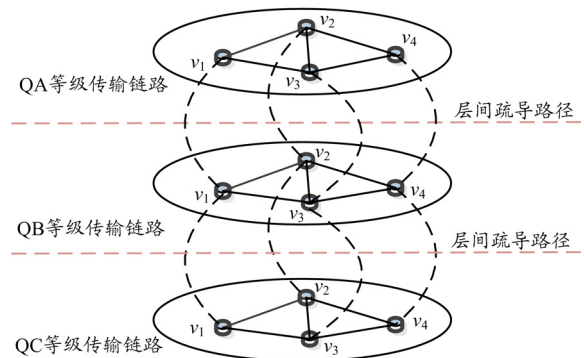
表 2 链路服务等级分类

路径类型	服务等级	丢包率	时延	BER 性能	安全	类型
传输链路	QA	敏感	敏感	好	安全	—
	QB	敏感	敏感	良好	安全	—
	QC	不敏感	不敏感	一般	一般	—
虚链路	QA/QB/QAQB/QBQA	—	—	—	—	波长转换链路
	QC	—	—	—	—	组包/拆包资源
	QBQC/QCQB	—	—	—	—	OE/EO 链路

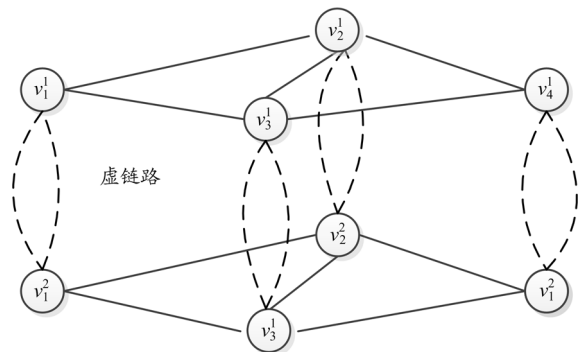
交互的虚链路。其中,虚链路的服务等级与它连接的传输链路的服务等级相关。

基于 IP over WDM 的分层图理论和根据不同链路提供的 QoS 等级,本文建立了光电混合网络 QoS 分层图模型和 QA 平面如图 1 所示。

QoS 分层图模型 $LG(V^*, E^*)$ 。其中, V^* 、 E^* 分别表示节点集合和链路集合,即图 1 中的所有实线、虚线的



(a) 分层图模型



(b) QA 平面

图 1 光电混合网络 QoS 分层图模型和 QA 平面

集合,包括节点间链路和节点层间疏导链路。QoS 分层图模型中,每一层都为具备相同 QoS 等级的节点间链路的集合,包含多条波长链路或不同传输速率的电链路;QoS 分层图模型中层间连线是节点对应的层间疏导链路。该模型为数据业务提供了 6 种不同 QoS 需求的链路:QA、QB、QC、QA→QB、QB←QC 和 QB→QC。其中,QA 平面层的链路可以提供高质量服务;QB 平面层的链路可以提供中质量服务;QC 平面层的链路可以提供低质量服务。每一平面中还包含多条节点间及节点内的虚实链路。

1.2 理论分析

依据光电混合网络 QoS 分层图模型,混合路由算法必须最小化呼叫阻塞率。首先,给出以下符号和变量: $v=|V^*|$ 和 $e=|E^*|$ 分别表示分层图的节点和边; B_{ij} 表示每条边 (i,j) 上最大可用带宽; B_l 为每条虚链路上剩余的带宽。网络的每个呼叫需要建立路径 $k, k \in K$, K 为网络所有可能路径的集合。每个呼叫可用 (s,d,b) 表示, s 、 d 和 b 分别为呼叫的源节点、目的节点和需要的带宽,到达的时间间隔为 t_k 。定义变量如下:

$$x_{ijt}^k = \begin{cases} 1, & \text{在时间 } t, \text{ 连接 } k \text{ 通过节点间链路 } (i,j) \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (1)$$

$$y_{lt}^k = \begin{cases} 1, & \text{在时间 } t, \text{ 连接 } k \text{ 通过节点内虚链路 } l \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (2)$$

其中, (i,j) 和 $l \in E^*$ 。

算法的目标是最小化阻塞率,等价于最大化连接通过率,其目标函数可描述为:

$$\sum_{k \in K} (x_{sdt_k}^k + y_{lt_k}^k) \quad (3)$$

$$b_k \times x_{ijt}^k \leq B_{ij} \quad (4)$$

$$b_k \times y_{lt}^k \leq B_l \quad (5)$$

式(3)是网络所接受连接的一个权值之和。约束式(4)和式(5)为链路带宽限制,在每个时间点,连接使用的链路带宽要小于链路剩余带宽。 b_k 表示第 k 条连接的带宽需求。

接着,对异构链路的代价函数进行具体描述,并假设 A、B 层均为波长链路,C 层为电链路。波长链路代价函数为:

$$f_{i,j}^{\lambda} = \begin{cases} \alpha, & B_{ij} = 0 \\ \infty, & B_{ij} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

对于任何服务等级的波长链路,将 B_{ij} 设为一个单位,波长链路要么被占用,要么空闲;当波长空闲时, α

为链路代价,取值由链路所占光纤的建设成本(如物理长度)决定。光路径代价函数为:

$$C_{sd}^O = \begin{cases} \sum_i \sum_j f_{i,j}^{\lambda}, f_{i,j}^{\lambda} = 1 \\ \infty, & f_{i,j}^{\lambda} = \infty \end{cases} \quad (7)$$

电链路代价函数为:

$$g_{i,j}^v = \begin{cases} \frac{b_{ij}}{B_{ij}} \beta, & B_{ij} \geq b_{ij} \\ \infty, & B_{ij} < b_{ij} \end{cases} \quad (8)$$

其中, v 表示链路可承载的最大速率, β 为常数。电路径代价函数为:

$$C_{sd}^E = \begin{cases} \sum_i \sum_j b_{i,j}^r, g_{i,j}^v \leq 1 \\ \infty, & g_{i,j}^v = \infty \end{cases} \quad (9)$$

其中, E 表示电链路。

OE 链路代价函数为:

$$C_{OE}^r = \begin{cases} \delta, & B_{OE}^r \geq 1 \\ \infty, & B_{OE}^r = 0 \end{cases} \quad (10)$$

其中, B_{OE}^r 为节点 r 上的光电转换器个数, δ 为远大于波长链路代价值的常数。

波长转换链路代价函数为:

$$C_{\lambda}^r = \begin{cases} \eta, & B_{\lambda}^r \geq 1 \\ \infty, & B_{\lambda}^r = 0 \end{cases} \quad (11)$$

其中, B_{λ}^r 为节点 r 上的波长转换器个数, η 为远大于波长链路代价值的常数。

QoS 单层内业务路径代价函数为:

$$C_{sd}^A = C_{sd}^B = \begin{cases} C_{sd}^O, & \text{单波长} \\ C_{sd}^O + C_{\lambda}^r, & \text{经节点 } r \text{ 完成波长转换} \\ \infty, & C_{sd}^O = \infty \text{ 或 } C_{\lambda}^r = \infty \end{cases} \quad (12)$$

其中,A、B 分别为 QoS 分层图的 QA 层和 QB 层,O 表示波长链路。

$$C_{sd}^C = \begin{cases} C_{sd}^E, & C_{sd}^E < 1 \\ \infty, & C_{sd}^E = \infty \end{cases} \quad (13)$$

其中,C 表示 QoS 分层图的 QC 层。

跨 QoS 层业务路径代价函数为:

$$C_{sd}^{AB} = \begin{cases} C_{sr}^O + C_{\lambda}^r + C_{rd}^O, & C_{sr}^O, C_{\lambda}^r \text{ 和 } C_{rd}^O \text{ 均不等于 } \infty \\ \infty, & \text{其它} \end{cases} \quad (14)$$

$$C_{sd}^{BC} = \begin{cases} C_{sr}^E + C_{rd}^O + C_{OE}^r, & C_{sr}^E, C_{rd}^O \text{ 和 } C_{OE}^r \text{ 均不等于 } \infty \\ \infty, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

图 2 为传统分离式路由算法与基于 QoS 分层图模型的光电混合路由算法流程图。可以看出,传统分离式路由算法将光链路资源和电链路资源分为相对独立的两部分,对其分别采用不同的路由算法,只考虑源、目的节点的光电转换能力,并且需要在全部光/电链路资源上进行路径计算。而本文所提算法虽然在 QoS 分层图模型的建立和维护上需要耗费网络计算资源,但当业务到来,可以提供全网多种异构资源状态,且通过去除不符合业务需求的链路,减少了路由算法的计算量。

2 仿真分析

为了验证所提算法的有效性。我们采用 16 节点的环形格网如图 3 所示,每条节点间的连线由 4 条单向光纤、1 条双向电缆组成;光链路由 2 根方向相反的单向光纤构成,每根光纤所支持的波长数为 2;电链路由支持不同数据速率的双向电缆(或电射频信道)构成,节点配置波长转换单元或光电转换单元,具备疏

导能力的节点个数 $R=16$, 每个 QoS 层内节点间的链路数量为 6;业务请求按参数为 λ 的 Poisson 过程独立地到达网络各节点,路径建立后业务的持续时间服从均值为 $1/\mu$ 的负指数分布,网络负载定义为 λ/μ ;仿真中模拟业务请求产生 10^6 次,其中 QA、QB、QC 服务等级的业务数量比例为 1:1:2;令 $\alpha=1, \beta=1, \delta=\eta=6, a=b=10, c=1$ 。

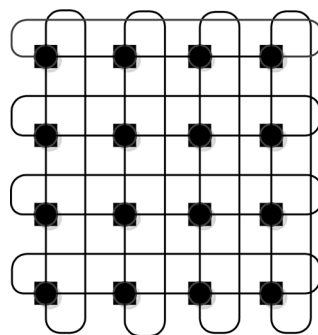
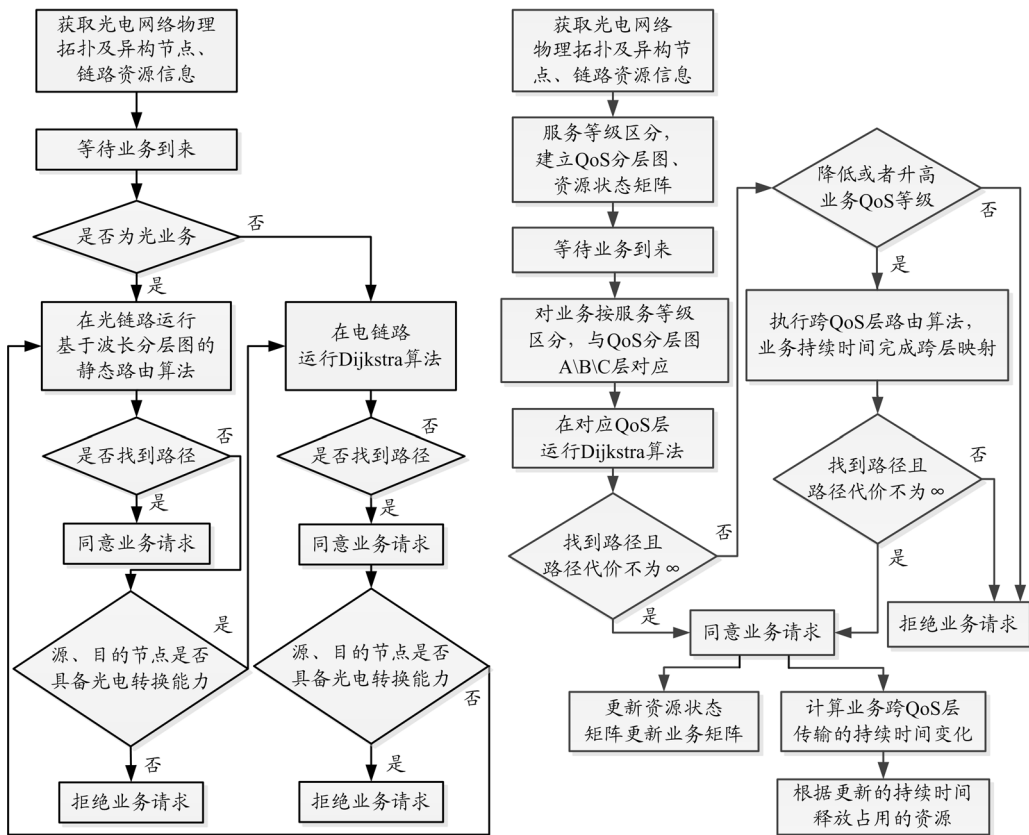


图 3 格形环网

传统光电分离式路由算法和基于 QoS 分层图模型的混合路由算法在相同条件下的阻塞率比较情况如图 4 所示。可以看出,不论网络是高负载或低负载,在相同负载的情况下,考虑 QoS 区分的光电混合路由算法的阻塞率性能要优于传统的光电分离式路由算法,这是因为本文提出的算法是基于 QoS 分层图模型,为异质业务和异构链路建立了映射关系,能更好地整合全网异构资源,并可通过对业务 QoS 的等级调整,尽可能地降低网络阻塞率。

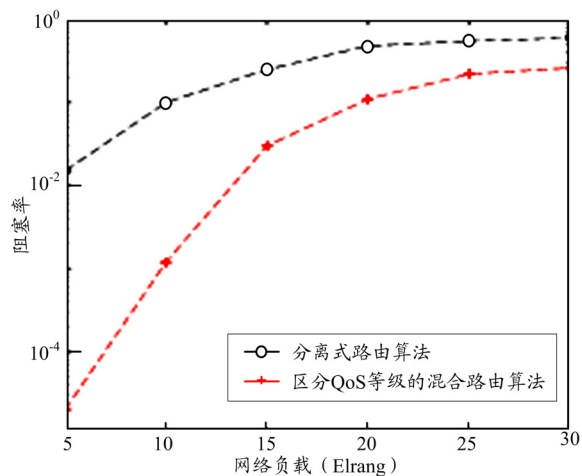
同时,我们还研究了不同 QoS 等级业务的阻塞率。令 QA、QB、QC 服务等级的业务数量比例为 1:1:1,波长转换及光电转换单元在网络中均匀配置,仿真中模拟业务请求产生 10^5 次。图 5 为不同服务等级的业务在相同条件下阻塞率的比较图。可以看出,不同服务等级的业务均能达到一定的阻塞率性能,且服务等级较高的业务其阻塞率性能越好。这是因为在业务的跨层疏导中,高服务等级业务在业务量较大、资源紧张时会占用低等级链路,优先保证高服务等级业务的阻塞率性能,光业务的跨层路由对电业务影响较大。



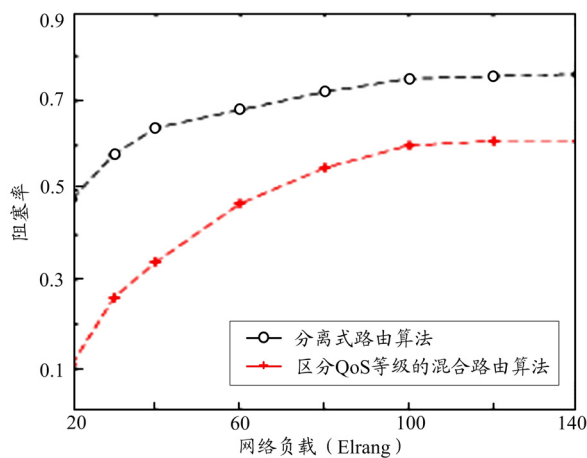
(a) 传统分离式路由算法

(b) 基于 QoS 分层图模型的光电混合路由算法

图 2 传统分离式路由算法与基于 QoS 分层图模型的光电混合路由算法流程图



(a) 网络低负载情况下



(b) 网络高负载情况下

图4 分离式算法与基于 QoS 分层图模型混合算法的阻塞率对比情况

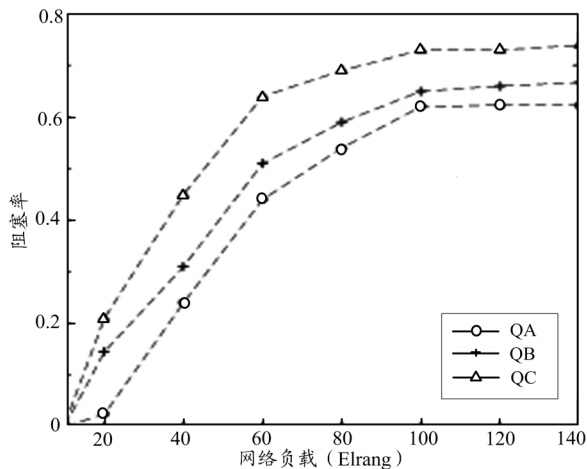


图5 不同服务等级业务的阻塞率

3 结束语

本文针对光电混合网络中异质业务面对异构链路资源的选路问题,提出了一种基于 QoS 分层图模型

的光电混合网络路由算法。该算法通过将网络中的异构链路与异质业务建立 QoS 等级映射关系,并建立了 QoS 分层图模型,解决了异构链路资源表征方式差异巨大的问题。同时,将光电转换及波长变换等虚链路资源纳入路径代价函数,完成网络虚实资源的融合及多种 QoS 需求业务的路径选择。在寻找路径失败时,允许动态调整业务的 QoS 等级,以进一步降低业务请求的阻塞率。仿真结果表明:在阻塞率性能方面,本文提出的算法比传统的分离式路由算法性能改进显著,并且高 QoS 等级业务在网络中具有更低的阻塞率。

参考文献:

- [1] CHEN Kai, SINGLA A. OSA: An optical switching architecture for data center networks with unprecedented flexibility [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2014, 22(2): 498–511.
- [2] NATHAN F, PORTER G, RADHAKRISHNAN S, et al. Helions: A hybrid electrical/optical switch architecture for modular data centers[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(4): 339–350.
- [3] 臧大伟, 曹政, 王展, 等. 基于 AWGR 的 OCS/EPS 数据中心光电混合网络[J]. 计算机学报, 2016, 39(9): 1868–1882.
- [4] 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.
- [5] 郭磊, 元伟敬, 侯维刚, 等. 空间信息网中的 FSO/RF 通信技术[J]. 科技导报, 2016, 34(16): 76–81.
- [6] 陈荷, 乔洋, 陈晶. 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): 1–6.
- [7] 张海懿, 赵文玉, 汤瑞. 大容量光电交换技术研究[J]. 2011, 17(6): 20–23.
- [8] 丁西峰, 赵尚宏, 李瑞欣, 等. 空间信息网络光 / 射频 / 分组混合交换技术研究[J]. 光通信技术, 2011, 35(6): 20–23.
- [9] SAMOUD W, WARE C, LOURDIANE M. Performance analysis of a hybrid optical-electronic packet switch supporting different service classes [J]. Optical Communications and Networking, 2015, 7(9): 952–959.
- [10] KAUR P, SACHDEVA M, KAUR G. Aggregate Flow Control in differentiated services [C]//ICAESM 2012. Nagapattinam, Tamil Nadu: EGS Pillay Engineering College, 2012: 377–382.
- [11] QU Hua, ZAHNG Ying, ZHAO Ji-hong. DiffServ resource optimization methods in hybrid networks [J]. Computer Engineering and Design. 2010, 31(21): 4579–4582.
- [12] 孙博, 李睿德, 孙文静. 空间信息网多业务传输优先级算法研究[J]. 载人航天, 2017, 23(2): 279–284.
- [13] 苏扬, 徐展琦, 刘增基. MPLS over WDM 光互联网中多优先级标记交换路径路由算法研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(1): 205–208.
- [14] 黄琼, 倪锐琛, 陈前斌, 等. 一种面向 IP/GMPLS over WDM 网络的优化综合路由算法[J]. 半导体光电, 2010, 32(4): 597–602.
- [15] 郑巍, 刘三阳, 齐小刚. 三层动态网络联合优化选路算法[J]. 中国通信, 2010, 7(3): 146–152.
- [16] 徐展琦, 丁秋菊, 陈晓辉. IP/WDM 网络中自适应区分权重的 HTA 动态业务流疏导算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2010, 37(5): 801–807.