

软件定义卫星光网络蚁群优化波长路由技术

石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 王蔚龙

(空军工程大学 信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对卫星光网络中网络拓扑动态时变和业务类型多样化的问题,研究了在软件定义网络架构下保障服务质量的路由技术,提出了一种基于多业务的卫星光网络蚁群优化波长路由算法。通过改进蚁群算法的启发函数,将波长空闲率、时延、时延抖动、丢包率作为蚂蚁选路的重要依据,为业务选择了满足多种服务质量的最优路径;采用分组波长分配方法对不同等级的业务进行了区分服务,为不同业务分配了不同的波长集。仿真结果表明:与 CL-ACRWA 算法和 Dijkstra 算法相比,降低了卫星光网络的平均时延、平均时延抖动、平均丢包率,提高了波长利用率,同时也降低了高优先级业务的网络拥塞概率。

关键词: 卫星光网络; 波长路由算法; 软件定义网络; 服务质量; 蚁群算法
中图分类号: TN929.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200125

Ant colony optimization routing and wavelength technology for software-defined satellite optical networks

Shi Xiaodong, Li Yongjun, Zhao Shanghong, Wang Weilong

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the problem of dynamic time-varying network topology and diversified service types in satellite optical network, the routing technology was studied to guarantee quality of service (QoS) under the framework of software-defined network (SDN), and a multi-service based ant colony optimization wavelength routing algorithm for satellite optical network was proposed. The heuristic function of ant colony algorithm was improved. The wavelength idle rate, time delay, time delay jitter and packet loss rate were taken as the important basis of ant routing, and the optimal path satisfying various QoS was selected for business. The group wavelength assignment strategy (GWAS) was used to distinguish services of different levels. Different sets of wavelengths were assigned to different services. The simulation results show that compared with CL-ACRWA algorithm and Dijkstra algorithm, the average delay, average delay jitter and average packet loss rate of satellite optical network are reduced. The wavelength utilization is improved. The network congestion probability of high-priority services is reduced.

Key words: satellite optical network; routing and wavelength assignment; software-defined network; quality of service; ant colony algorithm

收稿日期:2020-04-11; 修订日期:2020-05-12

基金项目:国家自然科学基金(91638101, 61701522)

作者简介:石晓东(1997-),男,硕士,主要从事卫星光通信与网络方面的研究。Email: 2272731016@qq.com(通讯联系人)

0 引言

随着近些年数据业务的爆发式增长,采用微波通信技术的卫星网络遇到了一些新问题,如微波频带资源有限、传输方向性不好、通信容量不够等。而相比于微波,激光则具有波长更短,带宽更宽的特性,因此可以使用激光链路代替微波链路,组建卫星激光通信网络。基于激光链路的卫星网络具有极强的保密性和抗电磁干扰能力,同时,它还具有宽带宽、高速率、大容量、低功耗和小体积等优点,是实现空天一体全球宽带互联的理想选择,拥有广泛的应用前景^[1-5]。

现有的卫星光网络多采用分布式的网络架构,很难产生最优化的路由策略。如果将软件定义网络(Software Defined Network, SDN)的网络架构思想应用于卫星光网络^[6],高轨道卫星可以作为控制器对低轨道的卫星光网络进行集中控制,实时掌握网络中所有卫星节点的状态信息和负载情况,而低轨道的卫星节点只需要根据控制器下发的流表项进行路由转发和硬件配置工作。应用这种新型集中式的网络架构,可以极大地降低低轨道卫星的部署和升级成本,同时可以使网络配置更方便、路由策略更灵活^[7]。

在软件定义卫星光网络的网络架构下,设计一种高效、可靠、灵活的波长路由算法是研究的一大挑战。波长路由分配算法是指在光网络中给定了节点之间的连接请求后,为其选择一条合适的路由,并分配合适的波长。使用优化的波长路由算法进行路由选择,可以很好地提升网络的服务需求,降低网络时延,提高波长的利用率^[8-9]。

在路由选择方面,目前的 SDN 路由算法主要可以分为两种:第一种为最短路径算法,例如参考文献^[10]就在基于 SDN 的 LEO 卫星网络中使用了最短路径中的 Dijkstra 算法。Dijkstra 算法虽然方法简单,但是没有考虑网络的状态信息,相同的源-目的节点只会选择同一转发路径,容易造成部分链路拥塞。第二种是 QoS 路由算法,即在选路时综合考虑用户的 QoS 需求。QoS 路由算法要解决的主要问题是多约束路径问题,解决这类问题的算法是众所周知的启发式算法。而蚁群算法具有正反馈机制,且收敛快、适应性强^[11],可用于求解卫星光网络中的多约束 QoS 波长路

由问题。参考文献^[8]提出了一种基于小窗策略的蚁群优化算法。引入星间距离、链路持续时间和波长空闲率等多种指标作为启发式函数,采用小窗口策略提高算法的收敛速度。通过计算空闲波长在相邻链路上的交点,实现了对单个蚂蚁的路由和波长分配。参考文献^[12]提出了一种基于跨层设计的蚁群路由和波长分配算法(Ant colony routing and wavelength assignment algorithm based on cross-layer design, CL-ACR-WA)。建立了考虑多普勒波长漂移、波长连续性约束的跨层优化模型。然后利用蚁群算法求解了跨层优化模型,得到满足上述约束条件的最优光路。但是它们都缺少时延、丢包率等 QoS 指标。

在波长分配方面,如果不对业务进行区分服务,会导致高服务质量(Quality of Service, QoS)需求的业务以及高优先级的业务不能得到及时处理,从而降低网络性能。因此,在进行路径选择和波长分配时,应充分考虑网络结构的动态变化特性、业务的差异化 QoS 需求以及网络的波长使用和阻塞情况^[13]。

文中针对卫星光网络,提出了一种基于 SDN 的蚁群优化波长路由算法(Ant colony optimization wavelength routing algorithm based on SDN, SARWA)。首先,对传统的蚁群算法进行了改进,将 4 种业务的 QoS 需求与蚁群算法相结合,作为蚂蚁选路的考虑因素,进而选出一条满足多种 QoS 的路径。其次,对业务进行分类,对不同等级业务采取分组波长分配方法,为不同业务分配不同的波长集,从而达到降低高优等级业务阻塞率的目的。

1 系统模型及问题描述

1.1 基于 SDN 的卫星光网络模型

如图 1 所示为基于 SDN 的卫星光网络逻辑架构。其中,网络架构的应用层由各种空间任务组成。控制层为整个架构的核心,由若干个 GEO 控制器组成,GEO 卫星具有全局视野,负责具体的路由策略制定。基础设施层由 LEO 卫星光网络组成,负责根据 GEO 卫星下发的流表项进行相应的数据处理和转发。在 LEO 卫星光网络中,通信链路均为激光链路,链路使用 WDM 技术在光链路中建立多波长通道,并采用优化的波长路由技术。

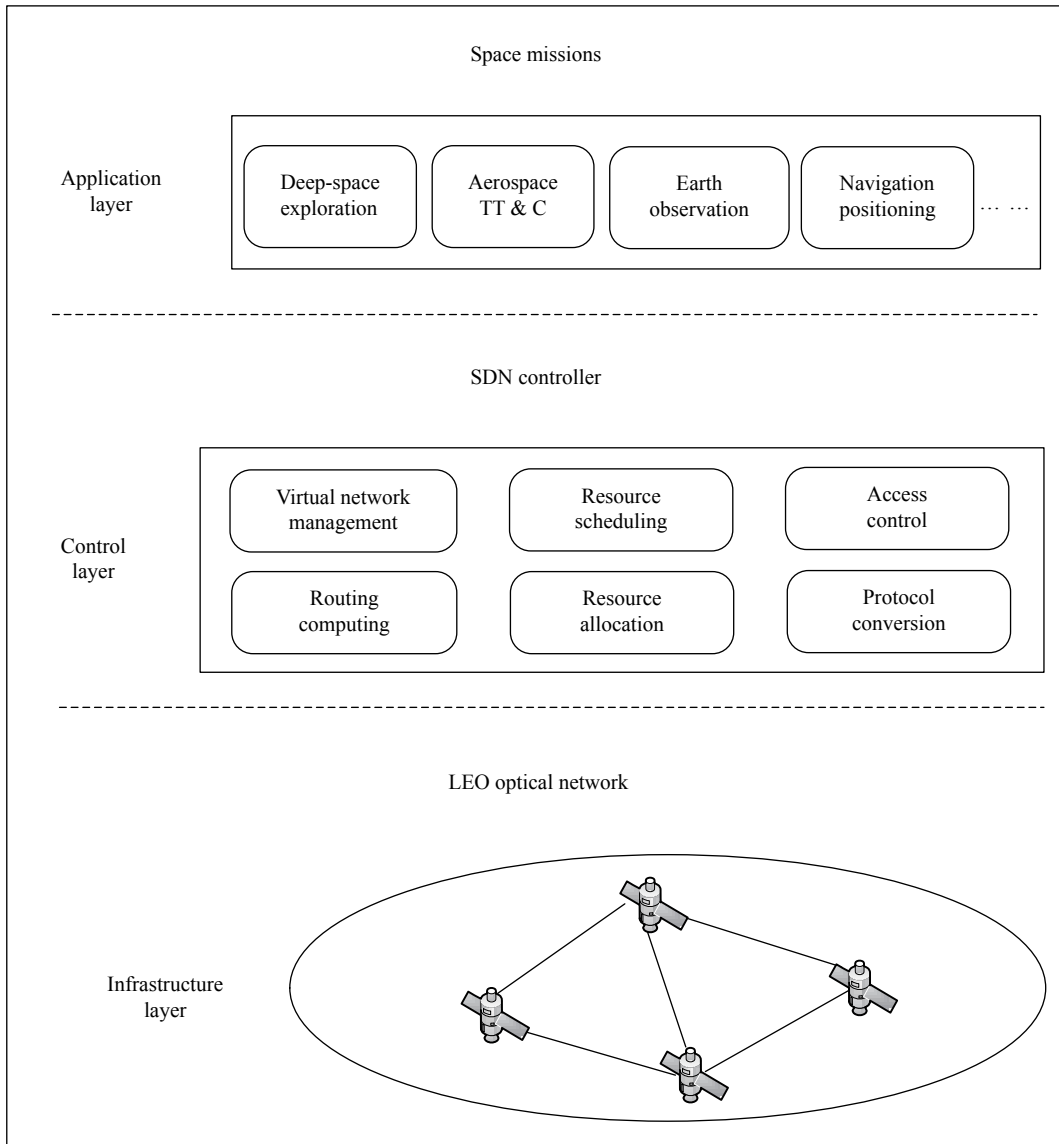


图 1 基于 SDN 的卫星光网络逻辑架构

Fig.1 Logical architecture of satellite optical networks based on SDN

1.2 基于 SDN 的卫星光网络路由机制

如图 2 所示为基于 SDN 的卫星光网络路由机制的基本过程。GEO 卫星作为 SDN 控制器与 LEO 卫星光网络通过南向接口进行数据通信。首先, GEO 卫星需要与 LEO 卫星光网络中的每一个卫星节点进行信息交互, 得到全局的拓扑状态以及节点链路信息。然后, 通过部署在 GEO 卫星中的波长路由算法处理这些信息, 实时计算出最优传输路径, 并通过南向接口, 统一将路径信息分配给网络中的每一个卫星节点, 整个网络路由过程体现了 SDN 对网络的集中控制及管理的特点。

在 LEO 卫星网络中, 卫星节点的运行具有时变性, 周期性, 节点与节点之间不断处于连接-断开-连

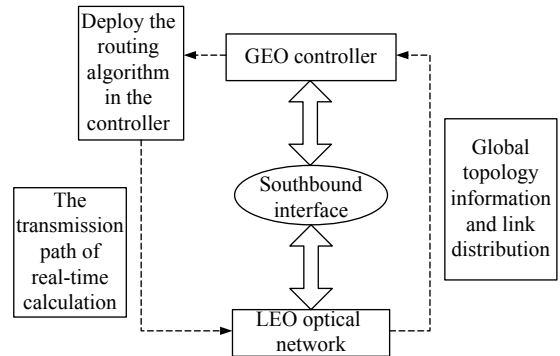


图 2 基于 SDN 的卫星光网络路由算法

Fig.2 Satellite optical network routing algorithm based on SDN

接的状态。但是在一定的时间段内,如果网络中各个节点之间的连接关系没有发生,这个时间段的网络拓扑可以看成是静止的。因此,可以采用虚拟拓扑的思想,将卫星网络中卫星绕轨道运行一周的时间 T 划分成若干个时间片,在每个时间片内,网络拓扑静止不变,这样就有效地屏蔽了卫星网络拓扑的高动态性。当数据包进行转发时,只需确定源节点和目的节点,再根据相应的时间片计算路由信息,即可完成数据转发,具体过程如图 3 所示。采用这种方法可以大大降低 LEO 卫星网络中卫星节点的路由计算开销,同时也提高了数据包转发效率,增大了数据传输时延。

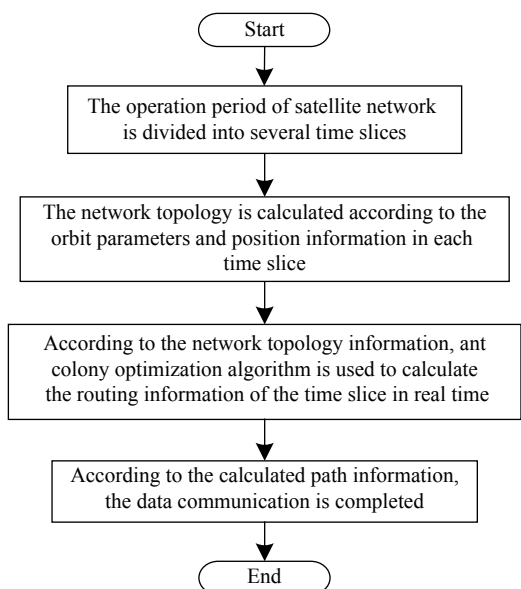


图 3 基于虚拟拓扑的路由机制

Fig.3 Routing mechanism based on virtual topology

1.3 卫星光网络多约束 QoS 路由模型

随着空间技术的迅猛发展,卫星光网络已经从仅提供传输功能的承载网络逐渐演进为需要为用户提供各类服务的业务网络。在卫星光网络中,空间业务类型主要包含控制业务、语音业务、视频业务和数据业务,不同类型的空间业务需要满足不同的 QoS 需求,只针对单个 QoS 参数进行优化的路由算法已不能满足用户的需求。卫星光网络需要支持不同 QoS 的自适应路由过程,而不是简单的尽力传输,因此在为业务进行选路过程中要充分考虑业务的动态变化特性和差异化 QoS 需求。卫星光网络 QoS 路由算法通常需要考虑以下几个因素:

(1) 波长空闲率

$$I_{ij}(t) = \frac{|N_{ij}| - n_{ij}(t)}{|N_{ij}|} \quad (1)$$

式中: $I_{ij}(t)$ 表示 t 时刻链路 (i, j) 上空闲波长数占总波长数的概率; $|N_{ij}|$ 表示链路 (i, j) 上的波长总数; $n_{ij}(t)$ 表示 t 时刻链路 (i, j) 上被占用的波长数。

(2) 时延

$$\text{delay}(\text{path}(i, j)) = \sum_{n \in \text{path}(i, j)} \text{delay}(n) + \sum_{e \in \text{path}(i, j)} \text{delay}(e) \quad (2)$$

式中: $\text{path}(i, j)$ 表示节点 i 到节点 j 之间的路径; $\text{delay}(n)$ 表示节点上的排队时延; $\text{delay}(e)$ 表示链路上的传播时延。

(3) 时延抖动

$$\text{jitter}(\text{path}(i, j)) = \sum_{e \in \text{path}(i, j)} \text{jitter}(p) + \sum_{n \in \text{path}(i, j)} \text{jitter}(q) \quad (3)$$

时延抖动是时延的变化率。式中: $\sum_{e \in p(i, j)} \text{jitter}(p)$ 和 $\sum_{n \in p(i, j)} \text{jitter}(q)$ 分别表示路径中的传播时延抖动和排队时延抖动。

(4) 丢包率

$$\text{loss}(\text{path}(i, j)) = 1 - \prod_{e \in \text{path}(i, j)} (1 - \text{loss}(e)) \quad (4)$$

式中: $\text{loss}(e)$ 表示单位时间内路径 $\text{path}(i, j)$ 中链路 e 的丢包率。

针对卫星光网络的特性,适合软件定义卫星光网络的 QoS 路由算法应满足以下两个条件:(1) 能够自适应的为业务选择一条满足多个 QoS 需求的最优路径。(2) 优化网络资源使用,提高资源利用率,实现负载均衡。因此,文中将卫星光网络中光链路的 4 个 QoS 属性作为路由的约束条件,为卫星光网络找到一条能满足如下要求的路径:

$$\begin{cases} \min(I_{ij}(t)) \geq I \\ \sum \text{delay}(i, j) \leq D \\ \sum \text{jitter}(i, j) \leq J \\ \prod \text{loss}(i, j) \leq L \end{cases} \quad (5)$$

式中: I 、 D 、 L 、 J 分别表示空间任务对波长空闲率、时延、时延抖动以及丢包率的要求。

2 多 QoS 蚁群优化路由算法

传统的蚁群算法仅考虑路径距离,没有考虑业务对多种 QoS 的需求。因此需要对蚁群算法进行改进,将链路的 4 种 QoS 作为蚁群算法的启发函数,为不同业务选择满足各自需求的最优路径。改进的蚁群算法转移概率函数计算如下:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [I_{ij}(t)]^\beta \cdot [D_{ij}(t)]^\gamma \cdot [J_{ij}(t)]^\delta \cdot [L_{ij}(t)]^\varepsilon}{\sum_{l \in A_k} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [I_{il}(t)]^\beta \cdot [D_{il}(t)]^\gamma \cdot [J_{il}(t)]^\delta \cdot [L_{il}(t)]^\varepsilon}, & j \in A_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{ij}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 的转移概率; $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻路径上的信息量; α 为信息启发因子,表示信息素在转移概率中的相对重要性; $\beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ 为启发函数重要因子,表示启发函数的相对重要性; $I_{ij}(t), D_{ij}(t), J_{ij}(t), L_{ij}(t)$ 为启发函数,由公式(1)~(4)以及(7)~(9)得到。

$$D_{ij} = \frac{1}{\text{delay}(\text{path}(i, j))} \quad (7)$$

$$L_{ij} = \frac{1}{\text{loss}(\text{path}(i, j))} \quad (8)$$

$$J_{ij} = \frac{1}{\text{jitter}(\text{path}(i, j))} \quad (9)$$

在通过各个邻居找到路径偏好概率之后,源节点和中间节点现在都有多条到目的地的路径,数据会选择路径优先概率较大的路径进行传输。为了让后面的蚂蚁能够根据信息素进行路径选择,信息素还需要进行更新。如果在 t 时刻路径 (i, j) 上的信息素为 $\tau_{ij}(t)$,则在 $t + \Delta t$ 时刻:

$$\tau_{ij}(t + \Delta t) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t + \Delta t) \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t + \Delta t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (11)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/J_k, & \text{如果蚂蚁 } k \text{ 经过链路 } L_{ij} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\rho \in [0, 1]$ 表示挥发程度; $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 表示第 k 只蚂蚁在路径 (i, j) 上释放的信息素浓度; Q 表示上一代蚂蚁完成选路释放的信息素浓度之和; J_k 表示第 k 只蚂蚁经过的路径长度。

3 分组波长分配策略

在多业务的卫星光网络环境下,如果不同级别业

务采用完全共享同一分配方式占用网络资源,则可能会出现某一时刻网络资源被低优先级业务完全占据,而高优先级业务请求会因为无波长可用而造成阻塞的情况。因此需要对多业务进行区分服务,对不同等级业务采取分组波长分配方法,以达到降低高优等级业务阻塞率的目的。

针对卫星光网络中的动态 RWA 问题,文中对不同等级业务采取分组波长分配方法,以达到降低高优等级业务阻塞率的目的。其主要思想是为高优先级业务分配更多的波长,降低高优先级业务的阻塞率。

根据业务的重要性和性能指标,文中将空间业务分为 $A, B, C3$ 类业务。 A 类业务对时延有明确的要求,其业务优先级最高; B 类业务容许一定的延时,对波长的需求适当,优先级次之; C 类业务优先级最低,对时延和波长都没有特别的要求。接下来,就可以根据业务的优先级对链路中的波长进行划分。

假设卫星光网络中光链路数为 n ,每条链路间的可用波长数为 10,分别设为 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{10}$ 可用波长数分别为 8、6、4。其中, A 类业务可用波长分别为波长集 $G_A(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_8)$, B 类业务可用波长分别为波长集 $G_B(\lambda_5, \lambda_6, \dots, \lambda_{10})$, C 类业务可用波长分别为波长集 $G_C(\lambda_7, \lambda_8, \lambda_9, \lambda_{10})$ 。

综上所述,通过以下步骤对波长进行分配:

- (1) 为 $A, B, C3$ 类业务划分波长集;
- (2) 为到达的业务划分类型;
- (3) 根据业务类型,在相应的波长集中寻找是否有可用波长,并采用首次命中或随机分配策略为其分配波长。

4 仿真实验

4.1 仿真场景设置

为了对算法性能进行验证,文中首先使用了 STK 对基于 SDN 的卫星光网络进行了模拟仿真,在此基础上使用了 MATLAB 对算法进行了仿真实验。

如图 4 所示为软件定义卫星光网络的仿真模型,分别由 LEO 卫星光网络和 SDN 控制器组成。

其中,SDN 控制器由 GEO 卫星组成,数据转发层由 LEO 卫星光网络组成。GEO 卫星负责收集 LEO 卫星中的节点和链路信息,制定路由策略。LEO 卫星

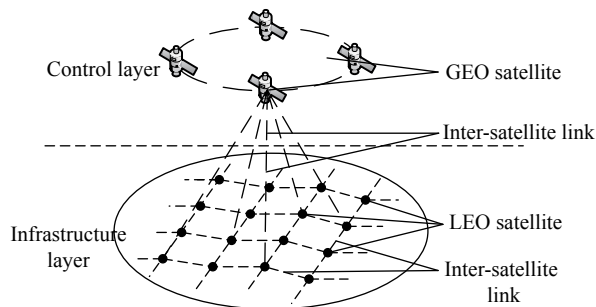


图 4 基于 SDN 的卫星光网络仿真模型

Fig.4 Simulation model of satellite optical network based on SDN

作为数据转发平面, 只需根据 GEO 卫星下发的流表项进行路由转发。

仿真选用了 Iridium 系统作为 LEO 卫星光网络的仿真场景, 参数如表 1 所示。

表 1 仿真场景参数设置

Tab.1 Parameter settings of scene simulation

Parameters	Value
Number of satellites	66
Orbit altitude	780
Number of constellation orbit	6
Number of satellites in each orbit	11
Period of revolution /min	114
Orbit inclination /($^{\circ}$)	86.4
Number of inter-satellite links	121
ISL distance/km	4 033
ISL bandwidth/Mbps	100
Number of ISL wavelength	10

仿真过程中, 在 LEO 光网络中随机选取 5 对源-目的的节点进行随机类型的业务传输请求, 并且随着时间的增加, 业务强度即每个节点的业务请求次数不断增加, 业务类型包括 A 类时延敏感型、B 类吞吐量敏感型以及 C 类尽力而为型 3 种, 优先级依次递减。在 SDN 架构中, LEO 卫星光网络的业务传输具体过程如下。首先, 需要将卫星网络中卫星绕轨道运行一周的时间 T 划分成若干个时间片, 在每个时间片内由 GEO 卫星控制器收集 LEO 网络中的节点链路信息。并由具有全局视野的 GEO 卫星根据节点和链路的状态信息制定路由和波长分配策略, 确定转发路径, 并将指令下发给相关卫星节点。LEO 卫星节点接收指令后, 负责转发相应的业务。

4.2 仿真结果分析

在基于 SDN 的卫星光网络的仿真场景中, 不同业务强度下 3 种算法在网络平均时延上的比较如图 5 所示。由图可知, 当业务强度较低时, 平均时延趋于相同, 因为 3 种算法都是基于最短路由算法, 优先为业务分配最短路径。随着业务强度不断增加, SARWA 算法的时延较低, 平均时延比 Dijkstra 算法降低了 10%, 比 CL-ACRWA 算法降低了 5%。

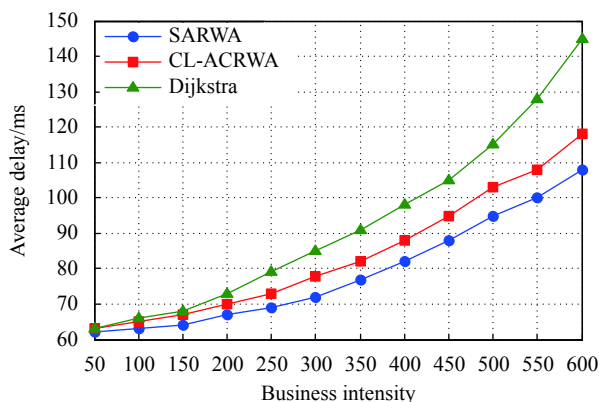


图 5 网络平均时延

Fig.5 Network average delay

在基于 SDN 的卫星光网络的仿真场景中, 不同业务强度下 3 种算法在网络平均时延抖动上的比较如图 6 所示。由图 6 可知, SARWA 算法在在抖动变化率上更为平滑。相比之下, 平均丢包率比 Dijkstra 算法低了 8 ms, 比 CL-ACRWA 算法低了 3 ms。这是因为 SARWA 算法在为业务选路的过程中将时延抖动也作为选择的依据, 因此平均时延抖动相对来说更低。

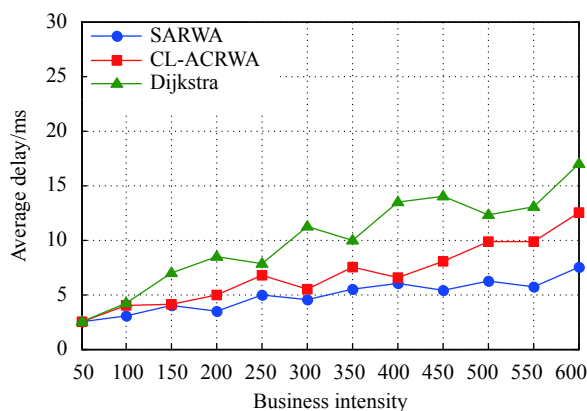


图 6 网络平均时延抖动

Fig.6 Network average delay jitter

在基于 SDN 的卫星光网络的仿真场景中,不同业务强度下三种算法在网络平均丢包率上的比较如图 7 所示。由图 7 可知, SARWA 算法在总体上比 CL-ACRWA 算法降低了 4%, 比 Dijkstra 算法降低了 7%。

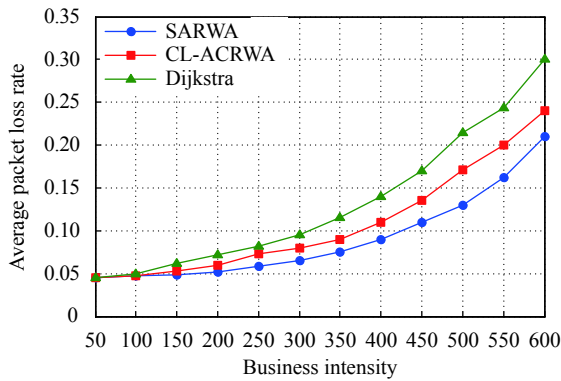


图 7 网络平均丢包率

Fig.7 Network average packet loss rate

在不同业务强度下,三种算法在网络波长利用率上的比较如图 8 所示。由于 SARWA 算法中在选路时重点考虑了链路剩余波长数,因此 SARWA 算法在不同业务强度下的波长利用率均大于 CL-ACRWA 算法以及 Dijkstra 算法。

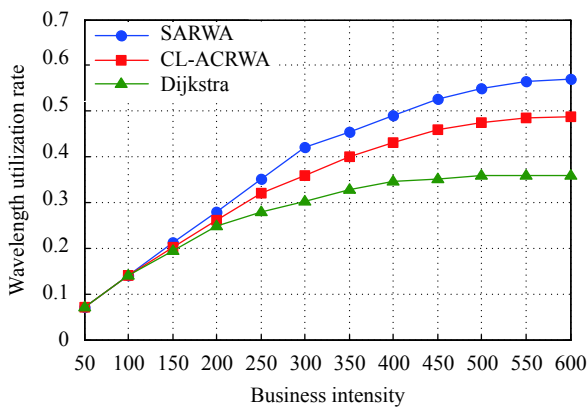


图 8 网络波长利用率

Fig.8 Network wavelength utilization rate

此外,对分组波长分配策略进行了仿真验证,不同业务强度下不同业务阻塞率的比较如图 9 所示。由图 9 可知,高优先级业务的阻塞率一直低于中优先级业务,并且远远小于低优先级业务。而随着业务强度的不断增强,3 种优先级的业务阻塞率都有所上升。总体而言,对业务进行区分服务可以有效降低高优先级业务的网络阻塞率。

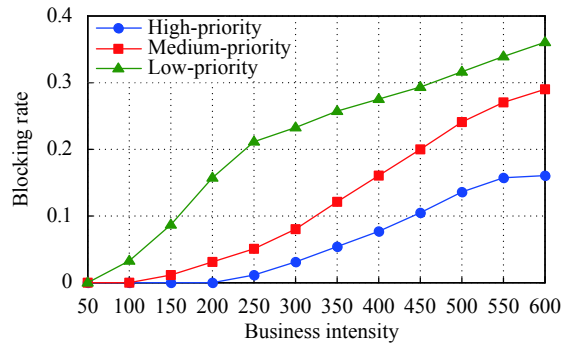


图 9 网络阻塞率

Fig.9 Network blocking rate

5 结 论

为了解决多业务卫星光网络波长路由分配复杂、波长利用率不高的问题,文中提出了基于 SDN 的卫星光网络蚁群优化波长路由算法。SARWA 算法将波长利用率、时延、时延抖动、丢包率 4 种服务质量作为蚁群算法的启发式函数,选择一条能满足多种 QoS 的路径。然后,对光链路波长按业务等级进行分配,降低了高等级业务的阻塞率。最后,对算法的性能进行了仿真分析,与 Dijkstra 算法相比,在平均时延方面降低了 10%,在丢包率方面降低了 7%,在最大时延抖动上方面降低了 8 ms。与 CL-ACRWA 算法相比,在平均时延方面降低了 5%,在丢包率方面降低了 4%,在最大时延抖动方面降低了 3 ms。在保证业务对多 QoS 需求的同时,算法还拥有更好的波长利用率,并且降低了高等级业务的阻塞率。但同时,低等级业务的阻塞率有所提高,不适用于低等级业务强度较高的网络,对此,文中算法还有待进一步优化。

参考文献:

- [1] Dong Quanrui, Chen Tao, Gao Shijie, et al. Progress of research on satellite-borne laser communication technology [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1260-1270.
- [2] Gao Duorui, Li Tianlun, Sun Yue, et al. Latest developments and trends of space laser communication [J]. *Chinese Optics*, 2018, 11(6): 901-913. (in Chinese)
- [3] Guo Chaoyong, Liu Jikui, Cheng Junbo, et al. Compound control strategy of satellite laser communication coarse tracking system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 946-953. (in Chinese)
- [4] Li Haitao. Technical approach analysis and development

- prospects of optical communication technology in China Deep Space TT&C Network [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(5): 20201003. (in Chinese)
- [5] Zhen Zheng, Wang Yingrui, Ou Wen, et al. A novel technology on infrared multi-band low-background detection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 49(5): 20190361. (in Chinese)
- [6] Nunes B A A, Mendonca M, Nguyen X N, et al. A survey of software-defined networking: past, present, and future of programmable networks [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2014, 16(3): 1617-1634.
- [7] Bertaux L, Medjiah S, Berthou P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2015, 53(3): 54-60.
- [8] Dong Y, Zhao S, Ran H D, et al. Routing and wavelength assignment in a satellite optical network based on ant colony optimization with the small window strategy [J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications & Networking*, 2015, 7(10): 995-1000.
- [9] Wang H T, Zhang Q, Xin X J, et al. Cross-layer design and ant-colony optimization based routing algorithm for low earth orbit satellite networks [J]. *China Communications*, 2013, 10(10): 37-46.
- [10] Jia M, Zhu S, Wang L, et al. Routing algorithm with virtual topology toward to huge numbers of LEO mobile satellite network based on SDN [J]. *Mobile Networks & Applications*, 2018, 23(2): 285-300.
- [11] Hu Yi, Jiang Chao, Huang Wei, et al. Optimal measurement area of articulated coordinate measuring machine calculated by ant colony algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(6): 1486-1493.
- [12] Wen G, Zhang Q, Wang H, et al. An ant colony algorithm based on cross-layer design for routing and wavelength assignment in optical satellite networks [J]. *China Communications*, 2017, 14(8): 63-75.
- [13] Shi X, Li Y, Zhao S, et al. Multi-QoS adaptive routing algorithm based on SDN for satellite network[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 768: 052035.