

激光与光电子学进展

基于负载均衡的卫星光网络路由与波长分配方法研究

王蔚龙^{1*}, 李勇军¹, 赵尚弘¹, 辛宁², 赵海燕¹

¹空军工程大学信息与导航学院通信系统教研室, 陕西 西安 710038;

²中国空间技术研究院通信卫星事业部, 北京 100094

摘要 提出基于用户业务分布的卫星光网络负载均衡路由与波长分配(LBRWA)算法,利用蚁群算法寻找最优光路径,实现了卫星光网络负载平衡。建立基于全球用户业务分布的卫星光网络 LBRWA 优化模型,根据链路持续时间和波长空闲率搜寻下一跳链路,同时引入随机扰动,避免局部最优。利用全球用户流量强度分布模型修正统计平均光路径成本,实现链路状态更新,将流量引向非热点区域卫星节点,为用户请求寻找负载均衡的最优光路径。研究表明,与传统基于链路状态的弹性负载均衡(ELB)算法相比,LBRWA 算法将拥塞率降低了 20.49%,且在资源利用率、业务分布指数和最大归一化星间链路负载方面具有更好的性能,有效地实现了卫星光网络负载均衡。

关键词 光通信; 卫星光网络; 路由与波长分配; 波分复用; 负载均衡; LEO 卫星星座; 蚁群算法

中图分类号 TN929.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0706004

Routing and Wavelength Assignment Based on Load Balance for Optical Satellite Network

Wang Weilong^{1*}, Li Yongjun¹, Zhao Shanghong¹, Xin Ning², Zhao Haiyan¹

¹Communication System Department, Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China;

²Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

Abstract A load balancing-routing wavelength assignment (LBRWA) algorithm based on user traffic distribution for satellite optical networks (OSNs) is proposed. The ant colony algorithm is employed to find the optical path so that the OSNs can achieve effective load balancing. The LBRWA optimization model in the OSNs based on global user traffic distribution is established. It searches for the next-hop link according to the link duration and wavelength idle rate and introduces random disturbance to avoid local optimum. The statistical average optical path cost corrected by the user traffic intensity is employed to update the link status; the traffic is directed to the satellite nodes in the non-hot spot area to find the load balancing optimal optical path for user requests. Numerical simulation results show that compared with traditional elastic load balancing(ELB) algorithm based on link-state, LBRWA algorithm reduces the congestion rate by 20.49%. In addition, LBRWA has better performance in terms of resource utilization, traffic distribution index, and max normalized inter-satellite link load, thereby effectively realizing load balancing in OSNs.

收稿日期: 2020-09-01; 修回日期: 2020-09-10; 录用日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(91638101)、国家自然科学基金青年科学基金(61701522)

*E-mail: wwlwangyi@126.com

Key words optical communications; optical satellite network; routing wavelength assignment; wavelength division multiplexing; load balancing; LEO satellite constellations; ant colony algorithm

OCIS codes 060.4510; 060.4251; 060.4256

1 引言

当前宽带卫星光通信网络是基于单波长星间链路(ISL)和星上电子交换技术来实现数据的传输,中继卫星需要对经过的数据包进行复杂的光-电-光交换处理,这势必会造成数据传输延迟和延迟抖动,对用户的服务质量(QoS)造成了较大的影响^[1-2]。采用波分复用(WDM)技术,在星间建立多波长光通道,组成了透明光传输网^[3]。路由选择时采用路由与波长分配(RWA)技术,不仅可以满足未来高速宽带通信要求,还可以大大减少中间节点的处理时间,这在很大程度上消除了延迟和延迟抖动,满足用户的服务质量^[4]。空间光通信技术的发展为星上多波长全光透明传输的实现提供了保障^[5-6]。因此,基于WDM的卫星光网络可以简化路由选择决策,是解决上述问题的最佳方案之一^[7]。卫星光网络RWA系统能够按照用户通信请求快速灵活地建立光路径,对上层业务提供全光透明传输,并且根据链路资源使用情况与服务质量需求,能够完成网络资源分配和路由选择等操作^[8-9]。

在WDM卫星光网络中,RWA问题的核心是为用户传输业务寻找光路径并合理分配波长资源^[10]。从网络优化的角度出发,RWA就是在波长资源受限和波长连续性约束条件下寻找链路成本最小的路由,以使通信拥塞率最小或波长资源利用率最高^[11]。Dijkstra算法^[12]和蚁群算法^[13-14]已被用来解决卫星光网络中的RWA问题。文献[12]提出基于Dijkstra算法的最小成本路由策略,有效提升了LEO星座网络的连通性和网络连接的稳定性。文献[13]考虑多普勒波长偏移和传输延迟,采用跨层优化算法提升了通信成功率。文献[14]在蚁群优化中引入流量强度挥发系数和随机干扰机制,明显降低了卫星网络的传输延迟。这些方法从不同角度为卫星光网络RWA问题提供了解决方案,但是网络中还存在流量负载不均的问题。

由于地理位置、人口分布、经济和技术发展程度的不同,卫星用户业务请求的分布存在较大的差异^[15],大多数用户热点区域都位于北半球,因此卫星网络系统面临覆盖热点区域的卫星拥塞而其他

卫星却未得到充分使用的网络负载不均问题^[16]。LEO星座轨道高度较低,卫星数目较多,覆盖的地面服务区域较小,这使得路由问题更加突出,因此需要有效的路由算法来缓解因网络流量分配不均而在流量集中区域造成的网络拥塞^[17]。为了在LEO卫星网络上实现有效的负载均衡,目前已经提出了很多路由方案^[18-19],主要有集中式和分布式两种。集中式负载均衡方法由入口节点^[20]或中央节点^[21]计算路由,这种集中式方案过于依赖网络收集流量信息的能力,较高的传输延迟会导致星座的实际状态无法及时反映到计算节点。分布式负载均衡方案中每个卫星都可以决定数据包的下一跳,能够对流量变化做出快速反应,但是在节点遇到一定程度的拥塞之前,不会采取平衡负载的措施^[15]。上述方案大多使用本地流量信息,没有考虑用户业务请求的地理特征,这可能无法反映网络整体的流量负载分布,负载均衡的性能不可避免地受到了限制。因此,LEO卫星网络整体的负载均衡需进一步优化。

本文基于全球地面用户业务分布,提出了LEO卫星光网络负载均衡的路由与波长分配(LBRWA)算法。建立基于全球用户业务分布的波长路由分配优化模型,利用蚁群算法连接请求光路径成本最小的传输路径,将业务引向用户流量强度较低的非热点区域。提出的LBRWA算法选路时优先选择星间距离短、链路持续时间长和波长空闲率大的光路径,同时增加随机扰动以避免过早陷入局部最优;利用用户流量强度分布修正统计平均光路径成本,根据光路径成本更新路径上的信息素,寻找最优传输路径,使卫星光网络实现负载均衡。

2 系统模型

2.1 卫星光网络RWA模型

卫星光网络RWA系统结构如图1所示,卫星光网络内部节点之间通过ISL连接,卫星网络与用户通过星地链路连接,提供全球通信服务。卫星光网络包含两种ISLs,同一轨道面上的ISLs稳定不变且传输延迟固定,而轨道间ISLs的长度和卫星的传输延迟都会随卫星的运动而变化。采用具有路由和

波长分配(RWA)功能的 WDM 架构建立具有相同波长数的 ISLs, 多个光路可以共享同一条物理链路, 并且需要分配不同的波长。卫星节点配备有 WDM 光交换装置, 星间光信号的转发与接收由光中继线负责, 星地光信号和微波信号的发送与接收分别由光和微波接入端负责, 中间交换单元负责信号从输

入端到输出端的转换。每颗卫星最多可以与其相邻的卫星建立 4 条链路, 卫星网络节点没有波长转换器, 因此数据传输时应遵循波长连续性原则。如图 1 所示, 当有用户需要从初始节点 s 发送数据到目的节点 d 时, 根据波长可用状态选择 λ_3 建立光路径 ($s \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow v_4 \rightarrow d$, 其中 v 为中间卫星节点)。

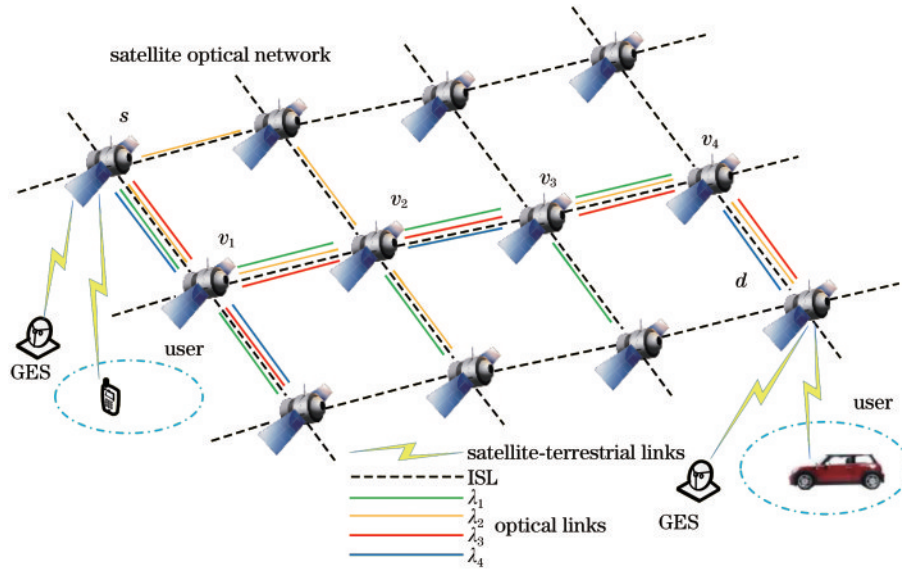


图 1 卫星光网络 RWA 系统

Fig. 1 RWA system in satellite optical network

如图 2 所示, 卫星光网络的物理拓扑由极轨道星座 (又称 π 星座) 组成, 可以将该星座视为双向曼哈顿街网络 (MSN)^[22]。卫星光网络包含 P 个轨道面, 每个轨道上有 S 颗卫星, 整个网络中有 $N=P \times S$ 个节点。将卫星光网络系统视为无向图 $G=(V, E)$, 其中 V 表示卫星节点集, E 表示 ISLs 的集合。 $\Omega_{ij}=\{\lambda_{ij1}, \lambda_{ij2}, \dots, \lambda_{ijK}\}$ 表示节点 i 与 j 间链路上的可用波长资源, K 为链路 e_{ij} 的波长总数。如果链路 e_{ij} 上的

波长 k 可用, 则 $\lambda_{ijk}=1$, 否则 $\lambda_{ijk}=0$ 。虽然卫星光网络节点位置随时间的变化而变化, 但是网络物理拓扑呈周期性变化, 卫星光网络的拓扑结构是可预测的。除了位于反向旋转接缝上的卫星, 每颗卫星可以与 4 颗相邻的卫星建立连接, 其中 2 颗在同一轨道, 另外 2 颗在相邻轨道。反向接缝上的卫星只有 3 条 ISLs, 接缝两边的卫星无法建立 ISL。当卫星运动超过极地边界 (给定纬度阈值^[23], 通常为 $\pm 60^\circ$) 时, ISLs 将被停用。通常情况下, 光网络中波长分配和路由选择是 2 个独立的步骤。为了提高算法效率, 采用对可用波长求交集的思想同时完成上述 2 个步骤。当到达一个节点时, 首先寻找各链路的空闲波长, 然后选择下一跳节点。当通往下一跳的所有链路上都找不到可用的波长时, 路由失败^[11]。如果当前节点不是目的节点, 则将其放入禁忌表 $\text{Tabu}(t)$ 中。

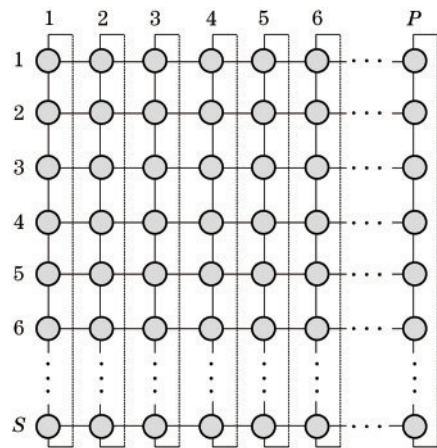


图 2 极轨道星座拓扑图

Fig. 2 Topology of polar orbit constellation

每个卫星节点都有一个路由表和一个信息素表, 这两个表根据网络状态实时更新。路由表为 $R(p_{ij})$, p_{ij} 表示位于节点 i 的蚂蚁选择下一跳为相邻节点 j 的概率, 对于任一选定的卫星 i , 都有

$$\sum_{j \in N_i(t)} p_{ij} = 1, i, j \in V, i \neq j, \quad (1)$$

式中: $N_i(t)$ 表示与节点 i 相邻的下一跳允许选择的卫星节点集合。

图 3 为波长交换节点结构模型, 由控制回路和全光交换两部分组成, DEMUX 为解复用器, DXC 为数字交叉连接器。控制回路负责整合各卫星节点状态和交换请求信息, 完成光信号的路由交换, 它是路由波长交换的中枢系统。光交换部分根据控制回路指示, 负责光信号从输入端口到输出端口的路由交换。状态转换和更新规则都会使用到信息素表 (PT), 信息素的值与特定的路由交换配置有关, 即对于节点的输入/输出端口和波长, PT 中都存在对应的信息素。对于图 3 所示结构, 信息素表中的值 V_{xyk} 具有如下含义: x 表示输入链路, y 表示输出链路, k 是在两个端口之间光开关矩阵的波长。

用户流量在全球的分布与网络支持的服务与应用类型相关。卫星网络的服务和应用分为很多种, 它们与不同的用户终端相对应。所有的终端分为便携式与移动式两种, 前者仅在静止时工作, 后者在移动和静止时都可工作。不同终端的市场应

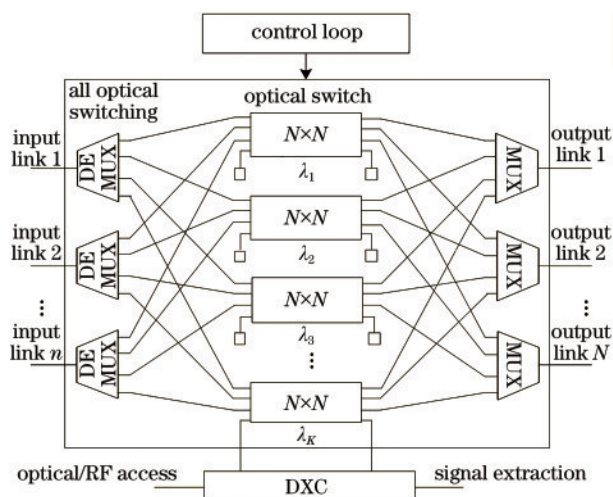


图 3 波长交换节点结构

Fig. 3 Structure of wavelength switching node

用方向不同, 便携式手持终端的服务方向主要为农村人口, 便携式个人计算机的服务方向主要为乡村办公室人员, 移动式个人计算机的服务方向为车载系统, 而移动式公文包的服务方向则为火车等公共交通场所。由于面向的市场方向不同, 各个类型的用户终端在世界各地的分布也存在差距。具体的分布情况如图 4 所示^[24]。

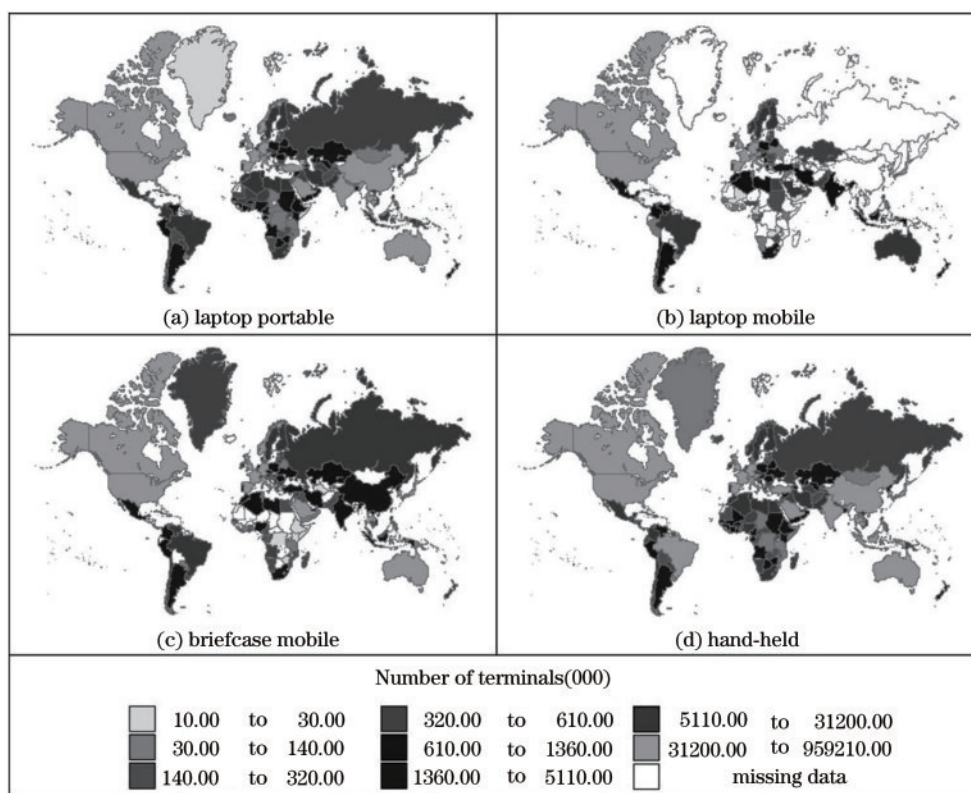


图 4 卫星用户终端分布

Fig. 4 Satellite user terminal distribution

根据全球用户终端分布的地理位置特点,卫星光网络用户的流量需求分布情况如图 5 所示^[25]。考虑到简化模型,从地理时区的角度出发,由于格林威治标准时间向东每经过经度 15°,当地时间就增加 1 h,因此在确定用户流量需求时,需要从经度和纬度方向按一定的步长生成二维业务需求分布网格。在这里按照经度和纬度每隔 15°各划分一次,全球被划分为 288 个小区域,令 $\phi(m)$ 表示地理区域的用户流量强度,其中 $m \in [1, 288]$ 。每个区域的业务强度根据全球各种类型卫星用户终端的分布情况来确定,业务强度的值各不相同,变化范围为 $[0, 8]$ 。图 5 中空白区域业务强度为 0^[24]。用 T'_i 表示第 i 颗卫星覆盖的区域集合,由于卫星覆盖范围内用户业务强度不同,对应卫星接收到的用户业务量也不相同,因此用户业务强度较高区域(即热点区域)上的卫星业务量大,更容易发生网络拥塞。在路由选径时应尽量避开覆盖用户业务强度较高区域的卫星,使路径选择趋向于非热点区,以平衡卫星光网络中的流量分布^[17]。

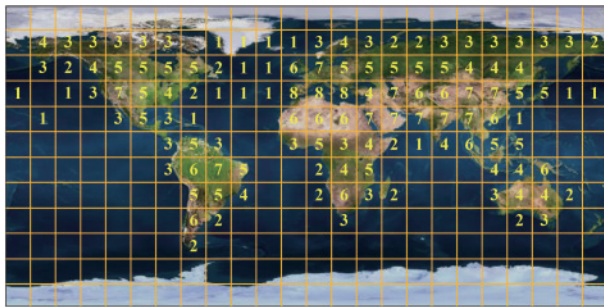


图 5 全球卫星用户流量强度分布

Fig. 5 Global satellite user density distribution

2.2 基于用户业务分布的波长路由分配优化模型

ISL 成本用端到端的总延迟表示,包含信号在链路上传输延迟和信号在节点的转发处理延迟,表达式为

$$\tau_{ij}(t) = \tau_{p,ij}(t) + \tau_{q,ij}(t), \quad (2)$$

式中: $\tau_{p,ij}$ 和 $\tau_{q,ij}$ 分别表示链路的传输延迟和处理延迟。 $\tau_{p,ij}$ 与光链路长度有关;由于 π 星座的拓扑周期确定, $\tau_{q,ij}$ 可以被预先计算。

为了将卫星光网络的业务流引向非热点区域,定义链路成本修正因子 δ 来调节路径成本,使业务更容易通过非热点区域。根据图 5 的用户流量需求分布模型,对于卫星 i ,将它覆盖区域的流量强度定义为覆盖范围内用户流量强度的总和,即

$$\Phi_i(t) = \sum_{m \in B_i} \phi(m), 0 \leq \phi(m) \leq 8, \quad (3)$$

式中: B_i 为卫星 i 覆盖的区域。一般情况下,卫星覆盖区域内有用户进行通信时 $\Phi_i \geq 1$,卫星覆盖区域内没有用户通信时 $\Phi_i = 0$ 。将通往卫星 i 的链路成本修正因子 δ_i 定义为

$$\delta_i = \begin{cases} a, & \Phi_i(t) = 0 \\ a + \exp[T_i(t)], & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (4)$$

式中: a 为修正常数; $T_i(t)$ 为卫星 i 的流量强度。当卫星 i 覆盖范围内用户流量强度为 0 时,通往卫星 i 的 ISL 成本用 $a \in (0, 1)$ 进行修正,以降低经过非热点区域的 ISL 成本;当卫星 i 覆盖范围内用户流量强度大于 0 时,通往卫星 i 的 ISL 成本随用户流量强度的增加而增加。

假设数据传输的光路径 (s, d) 为: $s \rightarrow v_1 \rightarrow \dots \rightarrow v_i \rightarrow d$, 则总的光路径成本用 $C(t)$ 表示,它为光网络波长路由分配提供了参考模型,并采用 $\delta_i(t)$ 进行修正,即

$$C_{sd}(t) = \delta_1(t)c_{sv_1}(t) + \sum_{m=1}^i \delta_m(t)c_{v_m v_{m+1}}(t) + c_{v_i d}(t), \quad (5)$$

式中: $c(t)$ 为光路径成本。

基于用户业务分布的 RWA 模型的优化目标是在卫星光网络中,为每个通信请求寻找一条满足传输延迟和波长连续性约束的光路径成本最小的路径。该模型可表示为

$$\begin{aligned} & \min C_{sd}(t) \\ & \text{s.t.} \quad \sum_{(i,j) \in (s,d)} [\tau_{p,ij}(t) + \tau_{q,ij}(t)] < \tau_{\max}, \\ & \quad \omega_{ij}(t) = \lambda_k, (i,j) \in (s,d), \end{aligned} \quad (6)$$

式中, τ_{\max} 为传输延迟门限, ω_{ij} 表示通信光路径上使用的波长。第一个约束条件表示传输延迟必须小于传输延迟门限,以满足光网络通信需求;第二个约束条件表示数据传输应遵循波长连续性原则,即数据在光路径 (s, d) 传输时,每一条光链路 e_{ij} 使用的波长 $\omega_{ij}(t)$ 必须是同一波长 λ_k 。

3 基于负载均衡的波长路由分配蚁群算法机制

卫星光网络中,存在一部分 ISLs 拥塞而另一部分空闲的情形。考虑到这种情形,根据全球业务分布状况,提出一种基于蚁群算法反馈机制的 LBRWA 算法,通过寻找光路径成本最小的路径,使网络负载均衡分配,实现光链路资源的充分利用。

LBRWA 算法分为初始化和寻路两个阶段,初始化阶段建立节点 i 的候选集 $N_i(t)$ 、链路 e_{ij} 的可用波长 Ω_{ij} 和信息素表 PT,寻路阶段主要包含状态转移规则和路由更新规则。

3.1 光链路状态转移规则

寻路阶段开始后,前向蚂蚁从 s 出发,按照状态转移规则选择下一跳的链路 e_{ij} 与波长 k 。状态转移规则可表示为

$$p_{ijk}(t) = \begin{cases} 1, & q \leq q_0 \text{ and } \langle j, k \rangle = \arg \max_{j \in N_i(t)} \{ \tau_{ijk}^\alpha(t) T_{ij}^\gamma(t) I_{ij}^\sigma(t) / D_{ij}^\beta(t) \} \\ 0, & q \leq q_0 \text{ and } \langle j, k \rangle \neq \arg \max_{j \in N_i(t)} \{ \tau_{ijk}^\alpha(t) T_{ij}^\gamma(t) I_{ij}^\sigma(t) / D_{ij}^\beta(t) \} \\ \frac{V_{ijk}^\alpha(t) T_{ij}^\gamma(t) I_{ij}^\sigma(t) / D_{ij}^\beta(t)}{\sum_{c \in N_i(t)} V_{ic}^\alpha(t) T_{ic}^\gamma(t) I_{ic}^\sigma(t) / D_{ic}^\beta(t)}, & q_0 < q \leq q_1 \\ \frac{1}{|N_i(t)|}, & q > q_1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中: α 反映了之前留下的信息素对当前蚂蚁路由波长选择的影响程度; β 、 γ 和 σ 反映了启发式信息在蚂蚁路径选择中的重要性; q 为随机变量; q_0 为常数; $V_{ijk}(t)$ 为链路 e_{ij} 中波长 λ_k 上的信息素,用于表征访问该波长链路的期望程度; $D_{ij}(t)$ 、 $T_{ij}(t)$ 和 $I_{ij}(t)$ 分别指星间距离、链路持续时间和波长空闲率,三者统称为启发函数,用于表征网络状态对蚂蚁选路的影响; $|N_i(t)|$ 为下一跳允许选择的相邻卫星节点数目。信息素是蚂蚁选路后信息的累积结果,它的值随着路径被蚂蚁选中次数的增多而增加。 $D_{ij}(t)$ 随着时间的变化而变化,表示 t 时刻链路 e_{ij} 的长度。 $T_{ij}(t)$ 表示链路 e_{ij} 从当前时刻 t 算起可以持续的时间,不同轨道的两个卫星朝极地区域运动时 $T_{ij}(t)$ 不断减小。 π 星座中的卫星超过极地边界时,卫星相对运动速度较高,此区域内的轨间链路关闭。因此位于不同维度卫星的轨间链路可持续时间不同。 $I_{ij}(t)$ 表示 t 时刻链路 e_{ij} 上波长空闲的概率,即

$$I_{ij}(t) = \frac{\sum_{k=1}^K \lambda_{ijk}(t)}{K}, \quad (8)$$

式中 $\sum_{k=1}^K \lambda_{ijk}(t)$ 表示链路 e_{ij} 上空闲的波长数。

p_{ijk} 由随机数 $q \in (0, 1)$ 来确定, $q_0 \in (0, 1)$ 和 $q_1 \in (q_0, 1)$ 是给定的参数。当 $q < q_0$ 时始终选择 $\tau_{ijk}^\alpha(t) T_{ij}^\gamma(t) I_{ij}^\sigma(t) / D_{ij}^\beta(t)$ 值最大的波长链路 e_{ijk} ; 当 $q \in (q_0, q_1)$ 时,根据(7)式中给出的概率函数选择波长链路; 当 $q > q_1$ 时,引入随机扰动,在候选节点中随机选择下一个节点,以避免迭代次数较少时路径搜索过早收敛于局部最优解。 $N_i(t)$ 是时变的,其中的卫星不能被蚂蚁访问且 $\Omega_{ij} \cap \Omega \neq \emptyset$ (即必须存在至少一个可用波长), Ω 为卫星可用波长, $N_i(t) = \emptyset$ 时蚂蚁被阻塞。

3.2 光网络路由更新规则

光网络路由更新包括光路径成本更新和信息素更新。光路径成本为一个卫星到其他卫星的统计学光路径成本,而信息素则根据在每个循环结束时产生的路径方案进行更新,逐渐反映出对路径方案的全局偏好。

假设前向蚂蚁到达目的卫星 d 后,转变为反向蚂蚁,并沿着前向蚂蚁找到的路径原路返回源节点。如果反向蚂蚁 t 时刻从目的地 d 移动到中间卫星节点 $v \in \{s, v_1, \dots, v_m\}$, 那么它走过的光路径为 $d \rightarrow \dots \rightarrow v_j \rightarrow v_i, d_s \in \{v_i, v_j, \dots, d\}$ 。将 t 时刻的统计平均光路径成本 $C_{vd}^s(t)$ 定义为

$$C_{vd}^s(t) = (1 - \varphi) C_{vd}^s(t - \Delta t) + \varphi C_{vd}^s(t), \quad (9)$$

其中 $\varphi \in (0, 1)$ 表示学习速率, $t - \Delta t$ 表示前一个蚂蚁到达 v 的时刻。参考(5)式,根据网络传输延迟、用户业务强度和波长使用情况计算出 $C_{vd}^s(t)$ 。

前向蚂蚁到达 d 或者被阻塞时,反向蚂蚁按原路径返回的同时更新沿途信息素,更新规则如下:

$$\tau_{ijk}(t + \Delta t) = (1 - \rho) \tau_{ijk}(t) + \theta \Delta \tau, \quad (10)$$

$$\Delta \tau = \exp \left[-\omega C_{vd}^s(t) / C_{vd}^s(t) \right], \quad (11)$$

式中, ρ 表示光路径上信息素衰减速率的参数, $\Delta \tau$ 表示蚂蚁新释放的信息素, ω 为指数衰减常数, $\theta \in \{-1, 1\}$ 表示蚂蚁释放的信息素是负反馈还是正反馈。如果前向蚂蚁到达目的卫星且满足(6)式中延时门限和波长连续性约束条件,则 $\theta = 1$, 蚂蚁释放的信息素为正反馈; 如果前向蚂蚁被阻塞或超过延时门限,则 $\theta = -1$, 光路径上的信息素被减弱。

根据上述讨论,卫星节点覆盖热点区域时光路径成本上升, $\Delta \tau$ 降低,因此链路信息素减小,后续蚂蚁选路时避开热点区域卫星。LBRWA 算法具体步

骤见图 6。算法的停止条件为现有解决方案的迭代次数大于规定值。

| Algorithm: LBRWA algorithm | |
|----------------------------|---|
| 1) | initialization of LBRWA; |
| 2) | repeat |
| 3) | each ants is positioned at nodes; |
| 4) | repeat |
| 5) | each ant moves to next node according to sate transition rule (7); |
| 6) | backward ants update optical path cost and pheromone by (9) and (10); |
| 7) | until all ants have completed the tour or been blocked; |
| 8) | until the stopping criterion is met |

图 6 LBRWA 算法步骤

Fig. 6 LBRWA algorithm steps

由于网络节点没有波长转换功能,最坏的情况下,每只蚂蚁的计算复杂度为 $O(NK)$,如果每次迭代有 N_x 个蚂蚁,总共迭代 N_i 次,则 LBRWA 算法的复杂度为 $O(N_i N_x NK)$ 。

4 性能仿真分析

采用极坐标星座对 LBRWA 算法的性能进行仿真分析,星座的参数如表 1 所示。位于反向接缝两边的卫星之间没有通信链路,当卫星的纬度超

表 1 π 星座参数

Table 1 Parameters of π constellation

| Parameter | Value |
|--|--------------|
| Orbit altitude /km | 780 |
| Inclination /($^\circ$) | 86 |
| Number of orbits P | 6 |
| Number of nodes per orbit S | 11 |
| Number of ISLs | 4 |
| Link state | Impermanency |
| Polar latitude threshold /($^\circ$) | 60 |

过极地纬度阈值 60° 时轨道间的链路断开。ISL 上的可用波长数最多为 $16^{[22]}$,卫星节点的处理延迟 $\tau_{D,ij}$ 统一设定为 $10 \text{ ms}^{[26]}$,卫星光网络的传输延迟门限阈值设置为 $300 \text{ ms}^{[27]}$ 。卫星光网络的节点没有排队等待机制,路由请求受到拒绝后立马被抛弃。

地面用户分布情况如图 5 所示,每块存在陆地的小区上都分布一个用户,总计有 122 个小区,各区域地面用户的流量强度不同。光路由请求的源用户和目的用户根据表 2^[24]所示各大洲卫星网络的流量占比进行选择。算法的仿真参数设置比较重要,经过大量仿真评估,将这些参数设置为 $\varphi=0.8$, $\rho=0.7$, $\omega=5$, $a=0.5^{[17]}$, $\alpha=0.3$, $\beta=0.5$, $\gamma=\sigma=0.6$, $q_0=0.45$, $q_1=0.9^{[28]}$ 。

表 2 卫星光网络各大洲通信流量占比

Table 2 Satellite optical network communication traffic proportion of each continent

unit: %

| Source | Communication traffic proportion for different destinations | | | | | |
|---------------|---|--------|------|---------------|--------|---------|
| | North America | Europe | Asia | South America | Africa | Oceania |
| North America | 60 | 15 | 10 | 10 | 2 | 3 |
| Europe | 40 | 40 | 10 | 5 | 2 | 3 |
| Asia | 30 | 10 | 50 | 2 | 2 | 6 |
| South America | 35 | 12 | 8 | 40 | 2 | 3 |
| Africa | 40 | 30 | 5 | 2 | 20 | 3 |
| Oceania | 40 | 10 | 12 | 2 | 2 | 34 |

采用弹性负载均衡(ELB)^[15]、ACO-original^[29]和 Dijkstra+FF^[12]作为对比项。ACO-original 利用蚁群算法寻找最优光路径,蚂蚁寻路时仅收集链路的传输延迟信息,并随机选择波长进行分配。Dijkstra+FF 简单易实现,但是无法适应限制条件较多的网络场景。ELB 算法中,流量负载较高的卫星会通知其相邻卫星降低数据转发速率。相邻的卫星会降低发往该卫星的业务传输速率,并搜索不包含该卫星的其他替代路径。

仿真使用拥塞率、资源利用率、业务分布指数和最大归一化星间链路负载 4 个指标来评价所提算法的性能。拥塞率指路径请求失败数与路径请求总数的比,资源利用率是当前网络中占用的波长信道数与波长信道总数的比。流量分布指数表示流量在整个卫星光网络中的分布情况,表达式为^[15]

$$f = \frac{(\sum_{i=1}^g x_i)^2}{g \sum_{i=1}^g x_i^2}, \quad (12)$$

式中: g 表示星间链路的数量; x_i 表示星间链路上的实际波长数量; $f \in (0, 1)$ 。流量分布指数较低时表示卫星光网络中的流量分布情况较差, 分布较不均匀。

星间链路负载用给定时间 Δt_l 内星间链路中全部波长上的累积连接请求表示, 即对经过星间链路的容量进行归一化得到归一化星间链路负载。因此最大归一化星间链路负载可表示为^[17, 30]

$$L_{\text{ISL}}^{\max} = \max_{j \in N_l} \frac{\sum_{k=1}^K R_{ijk}}{\Delta t_l K}, \quad (13)$$

式中: R_{ijk} 表示链路 e_{ij} 在波长 λ_{jk} 上累积的链路请求; l 为传输路径。最大归一化星间链路负载可以评价 LBRWA 算法在卫星光网络上利用波长资源的能力, 且值不超过 1。通常在评估路由方案提供负载均衡的能力时, 业务分布指数和最大归一化星间链路负载是两个重要的性能指标。

图 7 在极坐标星座中对比了 LBRWA, ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 4 种算法的拥塞率性能, 链路可用波长为 8。业务强度是网络每小时被占用的波长信道数与平均占用时间的乘积, 单位为 Erl^[11]。与其他 3 种算法相比, LBRWA 在不同业务强度内的拥塞率最低。当业务强度为 220 Erl 时, LBRWA 的拥塞率比 ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 分别降低了 20.49%, 49.71% 和 79.11%。LBRWA 根据卫星用户覆盖范围内用户的流量强度修正光路径成本, 此外, 在选择光路时避开了波长空闲率低和链路持续时间短的链路, 使得通信请求趋向于选择穿过非热点区且负载较低和持续时间较长的光链路, 提升了网络的拥塞性能。Dijkstra+FF 只关注链路长度信息, 该方法虽

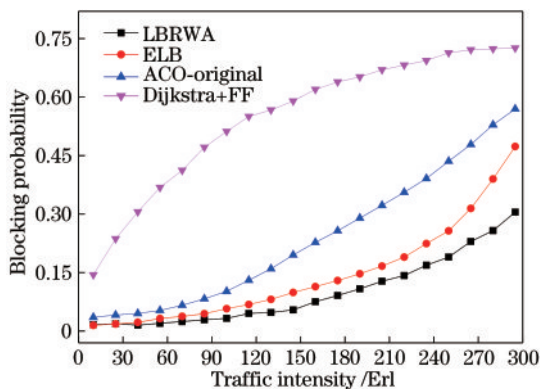


图 7 不同方法的拥塞率性能对比

Fig. 7 Comparison of blocking probability for different algorithms

然计算简单但无法适应复杂的网络条件, 拥塞率随业务强度增加而快速上升。ACO-original 寻路时仅考虑传输延迟信息, 选择路径时没有考虑地面用户的流量分布、链路持续时间和波长使用情况, 虽然拥塞率性能优于 Dijkstra+FF, 但随着业务强度的增加拥塞率上升仍然较快。业务强度较低时, LBRWA 与 ELB 拥塞率性能相差较小, 而面对较高业务强度时, LBRWA 性能优于 ELB。这是因为 LBRWA 可以将通信链路引向非热点区域, 并且具有及时获得并更新光路径成本的能力。此外 LBRWA 的状态转移规则为选路提供了多种可能, 可以更有效地适应网络状态。

图 8 在极坐标星座中对比了 LBRWA, ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 4 种算法的资源利用率性能, 网络链路的可用波长为 8。当业务强度为 235 Erl 时, LBRWA 的资源利用率比 ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 分别提升了 7.08%, 18.14% 和 45.97%。由此可以看出, 业务强度较高时 LBRWA 的资源利用率性能优于其他 3 种算法。随着业务强度的升高, 空闲的链路波长信道不断减少, 由于受制于波长连续性的原则, 源节点与目的节点相隔较远时很难建立光通信链路。LBRWA 在选路时避开了容易产生通信需求的热点区域, 趋向于选择通信压力较小区域的节点。此外, LBRWA 选择下一跳时考虑了链路波长的空闲概率, 优先选择波长空闲概率高的链路, 因此在业务强度较高时 LBRWA 的资源利用率最高。

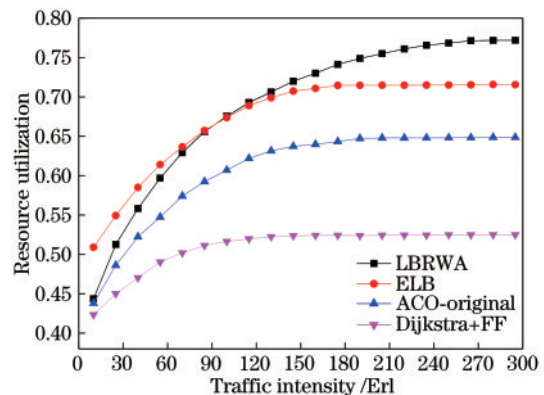


图 8 资源利用率对比

Fig. 8 Comparison of resource utilization for different algorithms

图 9 所示为网络拥塞率与链路波长数之间的关系, 此时网络业务强度为 235 Erl。从图中可以看出, 网络拥塞率随着链路波长数的增加而显著减

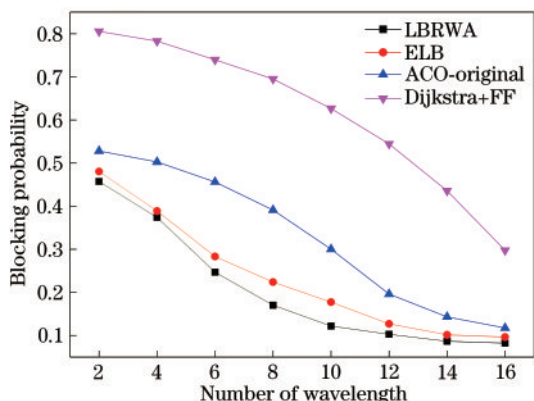


图 9 拥塞率与波长数的关系

Fig. 9 Relationship between blocking probability and number of wavelength

小;增加网络波长资源,能够有效提升网络的拥塞率性能,对于链路波长数较少时拥塞率性能较差的算法,性能改善更加明显。当波长数从 2 增加到 16 时, LBRWA 的网络拥塞率减小了 37.52%, 而 Dijkstra+FF 的拥塞率减小了 50.78%。此外,当链路波长数为 12 时, LBRWA 的网络拥塞率比 ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 分别降低了 19.18%, 47.66% 和 81.14%, LBRWA 的拥塞率性能优于其他 3 种算法。

图 10 展示了 LBRWA, ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 4 种算法最大归一化 ISL 负载随纬度的变化趋势,其中网络业务强度为 115 Erl,网络链路的可用波长为 8。如图 10 所示,4 种算法的曲线都在北纬 30°处出现了峰值,这种结果与地面用户流量强度分布情况相吻合,北纬 30°附近热点区域的用户流量强度较高,造成这一区域网络链路的负载较重, L_{ISL}^{max} 最大归一化 ISL 负载较高。在不同纬度下,

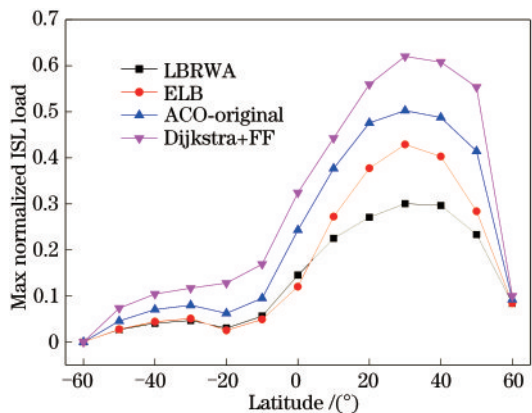


图 10 最大归一化 ISL 负载对比

Fig. 10 Comparison of max normalized ISL load for different algorithms

LBRWA 获得的 L_{ISL}^{max} 比 ACO-original 和 Dijkstra+FF 获得的 L_{ISL}^{max} 小,这是因为 LBRWA 不仅使用链路成本修正因子更新光路径成本,还在选路时考虑网络状态 [$T_{ij}(t)$ 和 $I_{ij}(t)$] 和局部最优化的影响,优先选择链路负载小且非热点区域的 ISLs,从而使网络负载较为均衡,且业务强度较高时也具有较好的网络性能。此外,在地面用户流量强度较低的南半球, LBRWA 和 ELB 的 L_{ISL}^{max} 性能相当,但在热点区域密集的北半球, LBRWA 的 L_{ISL}^{max} 低于 ELB, LBRWA, 同时其曲线比 ELB 的曲线平滑,这表明 ALBR 比 ELB 具有更均衡的负载。LBRWA 的选路较为灵活,会经过更多的节点以避免拥塞产生,而在 ELB 中,处于热点区域的卫星虽会通知相邻卫星寻找替代路径,但是 ELB 仅提供两条可选路径,在业务强度较高时还是容易发生拥塞。

图 11 所示为不同业务强度下 LBRWA, ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 4 种算法的业务分布指数曲线,卫星光网络链路的可用波长为 8。采用 4 种算法时,业务分布指数都会随着业务强度的增加而增加,但是 LBRWA 和 ELB 算法下的业务分布指数较大,曲线性能明显优于 ACO-original 和 Dijkstra+FF。这是因为 ACO-original 和 Dijkstra+FF 的路由策略仅限于找到最短路径; LBRWA 和 ELB 算法在卫星链路可用资源降低、将要拥塞时,会主动搜索可替代的光路径进行通信,使数据流量通过波长空闲率较高的链路进行传输。从图 11 中还可以看出,采用 LBRWA 算法时获得的业务分配结果比采用 ELB 算法时更好。由于 LBRWA 选择节点时考虑了地面用户的流量分布情况,趋向于将业务引向覆盖非热点区域的卫星,故该算法能够更有

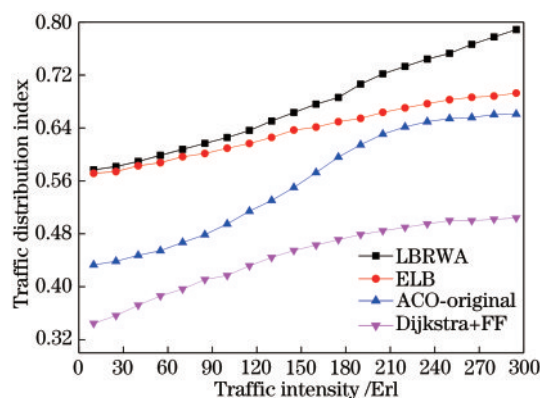


图 11 业务分布指数性能对比

Fig. 11 Comparison of traffic distribution index for different algorithms

效、更均衡地分配卫星光网络链路上的业务,使网络能够承载更多的请求。

5 结 论

考虑地面用户流量分布不均的情况,研究了一种基于负载均衡的 LEO 卫星光网络路由与波长分配方法。所提出的 LBRWA 算法利用全球用户流量强度分布状况修正统计平均光路径成本,目的是利用蚁群算法在传输延迟和波长连续性约束条件下为每个连接请求寻找光路径成本最小的数据传输光路径,使整个卫星光网络实现有效的负载均衡。LBRWA 算法中前向蚂蚁根据状态转移规则选路时趋向于选择星间距离短、链路持续时间长和波长空闲率大的光路径,同时引入随机扰动以避免过早陷入局部最优;反向蚂蚁沿着前向蚂蚁找到的路径原路返回,利用统计平均光路径成本更新沿途信息素,将通信链路引向用户流量强度较低的非热点区域,平衡卫星光网络中的流量分布。仿真结果表明,当业务强度为 235 Erl 时,与 ELB, ACO-original 和 Dijkstra+FF 算法对比, LBRWA 算法的拥塞率分别降低了 23.49%, 58.71% 和 79.11%。同时, LBRWA 算法在资源利用率、业务分布指数、最大归一化星间链路负载方面也具有更好的性能,能够更加均衡和有效地分配卫星光网络中的业务。

参 考 文 献

- [1] Bai S, Wang J Y, Zhang L, et al. Development progress and trends of space optical communications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 070001.
白帅, 王建宇, 张亮, 等. 空间光通信发展历程及趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(7): 070001.
- [2] Dong Q R, Chen T, Gao S J, et al. Progress of research on satellite-borne laser communication technology[J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1260-1270.
董全睿, 陈涛, 高世杰, 等. 星载激光通信技术研究进展[J]. *中国光学*, 2019, 12(6): 1260-1270.
- [3] Rabinovich W S, Moore C I, Mahon R, et al. Free-space optical communications research and demonstrations at the US Naval Research Laboratory [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(31): F189-F200.
- [4] Hemmati H, Caplan D. Optical satellite communications: chapter 4[M]//Kaminow I P, Li T, Willner A E. *Optical fiber telecommunications: 6th ed.* Boston:

Academic Press, 2013: 121-162.

- [5] Cao Y, Zhang X, Peng X F, et al. Cascade scheme based on multiple-input multiple-output in spatial optical communication[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0106003.
曹阳, 张勋, 彭小峰, 等. 空间光通信中基于多输入多输出的级联码方案研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0106003.
- [6] Han L Q, You Y H. Cooperative schemes in all-optical free-space optical communication system[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1006004.
韩立强, 游雅晖. 全光自由空间光通信中继协作方案的研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1006004.
- [7] Chaudhary S, Sharma A, Chaudhary N. 6×20 Gbps hybrid WDM-PI inter-satellite system under the influence of transmitting pointing errors[J]. *Journal of Optical Communications*, 2016, 37(4): 375-379.
- [8] Lyras N K, Kourogorgas C I, Panagopoulos A D. Cloud free line of sight prediction modeling for optical satellite communication networks [J]. *IEEE Communications Letters*, 2017, 21(7): 1537-1540.
- [9] Kaushal H, Kaddoum G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2017, 19(1): 57-96.
- [10] Maurya R K, Thangaraj J, Priye V. Dynamic routing and wavelength assignment using cost based heuristics in WDM optical networks [J]. *Wireless Personal Communications*, 2020, 115(2): 971-992.
- [11] Dong Y, Zhao S H, 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]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2015, 7(10): 995-1000.
- [12] Sun X, Cao S. Wavelength routing assignment of different topological optical networks based on typical leo satellite constellations [C]//Proceedings of the International Conference on Wireless and Satellite Systems, January 12-13, 2019, Harbin, China. Berlin: Springer, 2019: 612-629.
- [13] Wen G L, Zhang Q, Xin X J, et al. Cross-layer design based ant colony optimization for routing and wavelength assignment in an optical satellite network [C]//2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), September 24-27, 2016, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2016: 1-3.
- [14] Zhou W, Zhang Q, Xin X J, et al. Extended path-finding RWA algorithm based on ACO in optical satellite

- network [C] // 2019 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 5-8, 2019, Huangshan, China. New York: IEEE Press, 2019: 1-3.
- [15] Taleb T, Mashimo D, Jamalipour A, et al. Explicit load balancing technique for N GEO satellite IP networks with on-board processing capabilities [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2009, 17(1): 281-293.
- [16] Kudoh D, Kashibuchi K, Nishiyama H, et al. Dynamic load balancing method based on congestion prediction for IP/LEO satellite networks [J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2009, 92(11): 3326-3334.
- [17] Rao Y, Wang R C. Agent-based load balancing routing for LEO satellite networks [J]. *Computer Networks*, 2010, 54(17): 3187-3195.
- [18] Liu Y Q, Zhang Q, Xin X J, et al. Load balancing algorithm based on secure routing strategy in satellite optical networks [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11209: 1120913.
- [19] Wang X, Hou R H, Xu W L. Dynamic path switching technology for LEO satellite networks [J]. *Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications*, 2020, 43(2): 80-86, 109.
王璇, 侯蓉晖, 徐伟琳. 低轨卫星网络动态路径切换技术 [J]. *北京邮电大学学报*, 2020, 43(2): 80-86, 109.
- [20] Chen J, Jamalipour A. An adaptive path routing scheme for satellite IP networks [J]. *International Journal of Communication Systems*, 2003, 16(1): 5-21.
- [21] Gragopoulos I, Papapetrou E, Pavlidou F N. Performance study of adaptive routing algorithms for LEO satellite constellations under self-similar and poisson traffic [J]. *Space communications*, 2000, 16(1): 15-22.
- [22] Chan V W S. Optical satellite networks [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2003, 21(11): 2811.
- [23] Henderson T R, Katz R H. On distributed, geographic-based packet routing for LEO satellite networks [C] // *Globecom '00-IEEE*, November 27-December 1, 2000, San Francisco, CA, USA. New York: IEEE Press, 2000: 1119-1123.
- [24] Mohorcic M, Svigelj A, Kandus G, et al. Demographically weighted traffic flow models for adaptive routing in packet-switched non-geostationary satellite meshed networks [J]. *Computer Networks*, 2003, 43(2): 113-131.
- [25] Liu Z, Guo W, Deng C L, et al. Wavelength dimensioning for wavelength-routed WDM satellite network [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29(3): 763-771.
- [26] Tan L Y, Yang Q L, Ma J, et al. Wavelength dimensioning of optical transport networks over nongeostationary satellite constellations [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(4): 166-174.
- [27] 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.
- [28] Chen M T, Lin B M T, Tseng S S. Ant colony optimization for dynamic routing and wavelength assignment in WDM networks with sparse wavelength conversion [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2011, 24(2): 295-305.
- [29] Sigel E, Denby B, Le Hégarat-Masclé S. Application of ant colony optimization to adaptive routing in a LEO telecommunications satellite network [J]. *Annales Des Télécommunications*, 2002, 57(5/6): 520-539.
- [30] 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.