

激光与光电子学进展

面向卫星互联网的弹性光网络动态路由和
频谱分配算法研究(特邀)

李海*, 李勇军, 刘元皓, 李信, 李玉, 赵尚弘

空军工程大学信息与导航学院通信系统教研室, 陕西 西安 710077

摘要 卫星弹性光网络(SEON)具有容量大、抗干扰能力强和资源管控灵活等优点,是卫星互联网重要的发展方向。路由和频谱分配(RSA)问题是SEON的核心关键问题之一,针对SEON中的RSA问题,提出了一种基于路径状态感知的动态路由和频谱分配算法(PIV-SSA),PIV-SSA算法由分段频谱分配(SSA)算法和基于路径影响值的路由选择(PIV)算法组成,在SSA算法中,根据业务所需要的传输速率来分配不同位置的频谱资源,在PIV算法中,基于SSA算法预分配频谱结果,综合考虑频谱资源消耗、链路频谱状态和路径存活时间等因素来选择最佳传输路径。仿真实验结果表明,在不同负载强度下,相较于经典的KSP-FF算法,PIV-SSA算法在网络阻塞率上平均降低了4.60%以及在网络频谱利用率上平均提高了4.78%。

关键词 卫星互联网; 卫星弹性光网络; 路由和频谱分配; 分段频谱分配; 路径影响值

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP240526

Dynamic Routing and Spectrum Allocation Algorithms in Elastic Optical
Networks for Satellite Internet (Invited)

Li Hai*, Li Yongjun, Liu Yuanhao, Li Xing, Li Yu, Zhao Shanghong

College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China

Abstract Satellite Elastic Optical Network (SEON) is an important development direction of satellite Internet with the advantages of large capacity, strong anti-interference ability and flexible resource management and control. The routing and spectrum allocation (RSA) problem is a critical issue in SEON. To solve the RSA problem in SEON, a dynamic routing and spectrum allocation algorithm based on the path state-aware (PIV-SSA) is proposed. The PIV-SSA consists of a segmented spectrum allocation (SSA) algorithm and a path influence value routing selection (PIV) algorithm. In the SSA, the location of the spectrum resources allocated to the services are determined by the transmission rate it requires. In the PIV, the optimal transmission path is selected by comprehensively considering factors such as spectrum resource consumption, link spectrum status, and path survival time based on the pre-allocation results of the SSA algorithm. The results of the simulation experiments show that, compared to the classical KSP-FF algorithm, the PIV-SSA algorithm reduces the network blocking rate by an average of 4.60% and achieves an average improvement of 4.78% in network spectrum utilization under different load intensities.

Key words satellite internet; satellite elastic optical network; routing and spectrum allocation; segmented spectrum allocation; path influence value

1 引言

卫星互联网是由成千上万颗分布在各个轨道上的通信卫星组成的大规模卫星网络,能够实现全球通信覆盖,为全球用户提供宽带和高速通信接入,在应急通信、农村等边远地区宽带接入和军事通信等发挥着重

要的作用。2020年,国家发展和改革委员会正式将卫星互联网纳入首批新型基础设施范围,自此卫星互联网建设成为了国家的战略性工程^[1]。传统的卫星网络通过微波通信链路传输数据,微波通信具有功耗大、通信带宽和速率受限等缺点,难以满足卫星互联网海量增长的业务需求,尤其是难以支撑对通信容量、数据速

收稿日期: 2024-01-15; 修回日期: 2024-02-05; 录用日期: 2024-02-20; 网络首发日期: 2024-02-27

通信作者: hai_li@aliyun.com

率和时延等要求更高的新兴业务如在线会议和短视频等。卫星激光通信具有功耗低、通信容量大、天线尺寸小和抗干扰能力强等优点,在卫星互联网领域具有广泛的应用前景,世界上最主要的卫星互联网星座均部署或计划部署卫星激光通信链路,由此可见,卫星光网络将是未来卫星互联网的基础架构之一^[2]。

随着卫星互联网和 6G 非地面网络(NTN)应用的进一步推广^[3-5],卫星互联网中业务需求呈现爆发式增长而且业务需求之间的差异更加显著,传统的基于波分复用的卫星光网络由于资源管控粒度较大难以充分利用稀缺的卫星通信资源。卫星弹性光网络是以卫星为节点,星间激光通信链路为边,并且应用频分复用等弹性光网络关键技术而组成的卫星通信网络,卫星弹性光网络可根据业务需求速率和传输距离来自适应选择调制等级和灵活分配频谱资源,能够极大地提高卫星光网络的频谱利用率。为了最大化频谱等资源的利用效率,具备灵活资源管控能力的卫星弹性光网络是卫星光网络发展的必然趋势。

路由和频谱分配(RSA)问题是弹性光网络的核心关键问题之一,直接影响卫星弹性光网络的性能表现,为了充分发挥弹性光网络可灵活动态分配频谱的优势,目前提出了大量 RSA 算法,文献[6]基于频谱分配状况和路径负载情况提出了一种碎片感知的路由和频谱分配算法。文献[7]针对 RSA 问题分别提出了一种高效的多约束路由算法来寻找最短可行路径,以及一种基于固定分割和自适应分割的频谱分配策略。文献[8]提出了一种基于频谱感知的路由和频谱分配算法,通过业务分割再合并的资源分配策略来降低网络的带宽阻塞率和节约网络的能耗。文献[9]通过结合在线路径计算和离线路径计算来提供更多的路径选择策略。文献[10]提出了一种基于频谱位示图的 RSA 算法来联合优化网络的阻塞率和频谱利用率以及光路的时延。文献[11]为了提高网络的频谱利用率和降低网络阻塞率,提出了一种基于频谱切片的感知路由和频谱分配算法。为了减少网络的频谱碎片,文献[12]设计了一个联合碎片度指标来评估候选频谱块从而减少网络中频谱碎片的数量,文献[13]基于业务承载力提出了一种高效的碎片感知路由和频谱分配算法。

目前提出的 RSA 算法大多是针对拓扑固定的地面光网络而设计的,由于卫星光网络拓扑动态变化等特征,现有的针对地面网络设计的 RSA 算法无法直接部署到卫星弹性光网络中。因此,为了充分发挥卫星弹性光网络的优势,针对卫星弹性光网络设计一种高效的 RSA 算法有着迫切的工程应用需求。同时,上述 RSA 算法均将 RSA 问题割裂为 2 个独立的问题,即首先进行路由选择然后基于选择的路径再分配相应的频谱,而且算法的设计主要聚焦在频谱分配算法,在路由选择阶段通常采用最短路径算法等简单的路由算法,这些路由选择算法只考虑了备选路径当前的特征,没

有分析备选路径在分配频谱后给网络带来的影响,从而难以全面有效地评估备选路径和业务之间的适配度,因此在一定程度上限制了 RSA 算法的性能表现。

针对卫星弹性光网络中动态 RSA 问题,本文首先设计了一种分段频谱分配(SSA)算法,然后综合考虑资源消耗、路径空闲频谱的分布状况、路径存活时间等因素设计了路径影响值这一指标来评估备选路径的质量,并且提出了一种基于路径影响值的路由选择算法(PIV),在 SSA 算法和 PIV 算法的基础上进一步提出了一种基于路径状态感知的 RSA 算法,即 PIV-SSA 算法。在 PIV-RSA 算法中,基于 K 最短路由算法离线计算出 K 条最短备选路径,动态业务到达时,首先提取出该业务对应的 K 条最短备选路径,然后通过分段频谱分配算法(SSA)提前为 K 条最短备选路径预分配动态业务需要的频谱块,再依次计算 K 条备选路径占有 SSA 算法预分配频谱块后的路径影响值,最后选择路径影响值最小的路径以及其对应的预分配频谱块来建立光路。相较于现有的 RSA 算法,PIV-SSA 算法通过将频谱分配算法耦合到路由选择过程中,从而能够为动态业务分配最佳的传输光路和频谱。仿真实验结果表明,相较于几种经典的 RSA 算法,PIV-SSA 算法的业务阻塞率更低,网络中频谱利用率更高。

2 卫星弹性光网络路由和频谱分配模型

为了有效表征周期性动态变化的卫星网络,降低卫星网络中路由建模的复杂度,我们将卫星弹性光网络拓扑划分为一系列虚拟拓扑快照,假设在划分的虚拟拓扑快照内 SEON 拓扑结构保持稳定。弹性卫星光网络拓扑可表示为 $G=(S, E(l), F(l)|1 \leq l \leq L)$,其中, S 表示 SEON 中卫星节点集合, $E(l)$ 是 SEON 的第 l 个拓扑快照的星间链路集合, $F(l)$ 表示在第 l 个拓扑快照中 SEON 的星间光链路的频谱状态, L 是 SEON 在一个周期内的拓扑快照总数,频谱资源在每个星间链路上被划分为 N_F 个频隙(FS),频隙是频谱资源的最小单元。第 i 个业务请求 t_i 可表示为 $t_i=(s_i, d_i, t_{ar}, t_{dur}, c_i, n_{f_i})$,其中, s_i 和 d_i 分别为业务 t_i 的源卫星节点和目的卫星节点, t_{ar} 是业务 t_i 的到达时间, t_{dur} 表示业务 t_i 的持续服务时间, c_i 表示业务 t_i 所需传输速率, n_{f_i} 是业务 t_i 所需传输速率对应的 FS 数量。 n_{f_i} 的计算公式为

$$n_{f_i} = \left\lceil \frac{c_i}{M \cdot c_{\text{unit}}} \right\rceil, \quad (1)$$

式中: M 表示业务所选路径的调制格式等级,由于在卫星互联网星座中星间链路(ISL)距离较长且距离差异较小,假设在 SEON 中所有星间激光通信链路的调整格式等级相同; c_{unit} 表示单个 FS 的容量; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。给动态业务分配频谱时需要满足 3 个约束:

1) 频谱连续性约束, 必须为每个业务请求分配连续的 FS; 2) 频谱一致性约束, 必须保证在传输业务的光路对应的每条链路上都能够分配相同位置的连续 FS; 3) 频谱不重叠约束, 不能将链路上同一个 FS 分配给多个业务请求。

3 算法描述

本文提出的基于路径状态感知的动态路由和频谱分配算法由 2 部分组成: SSA 算法和 PIV 算法, 本节首先分别介绍 SSA 算法和 PIV 算法, 然后进一步介绍 PIV-SSA 算法的整体运行流程图。

3.1 分段频谱分配算法

经典的启发式频谱分配算法如首次命中 (FF) 算法、尾部命中 (LF) 算法以及精确命中 (EF) 算法等容易造成大量的频谱碎片^[14-15], 为了减少频谱碎片数量和提高频谱资源利用效率, 本文提出了一种 SSA 算法, 算法的核心思想是在计算光路上可用的频谱块之后, 基于 FF 算法为需要 FS 数量较少的业务请求分配频谱块即优先分配位置靠前的频谱块, 同时基于 LF 算法为需要 FS 数量较多的业务请求分配频谱块即优先分配位置靠后的频谱块, SSA 算法的伪代码如表 1 所示。

表 1 分段频谱分配算法伪代码

Table 1 Pseudo code of segmented spectrum allocation algorithm

Algorithm 1 The segmented spectrum allocation algorithm

Input: segmented FS point α , task request t_i , routes p_i , and the topology of SEON G

Output: allocated FS block for task request t_i

```

1 for each link in routes  $p_i$  do
2   calculate the feasible FS block
3 end for
3 if no feasible FS block exist do
4   block the task request  $t_i$ 
5 else
6   If  $n_{f_i} \geq \alpha$  do
7     select the available FS block with the lowest starting index
8   else
9     select the available FS block with the highest starting index
10  end if
11 end if
    
```

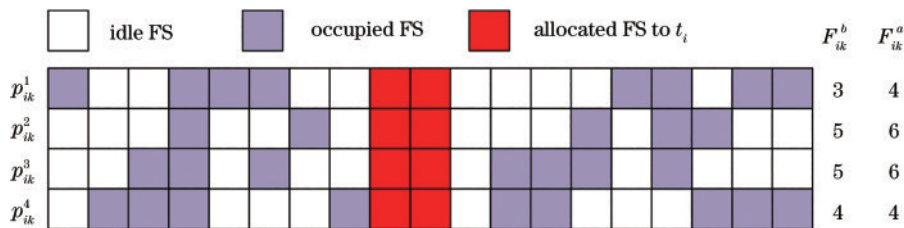


图 1 频谱碎片增加量计算示例

Fig. 1 Example of calculating the increase in spectrum fragmentation

3.2 最小路径影响值路径选择算法

目前提出的 RSA 算法大多聚焦于频谱分配问题, 而在路由阶段大多采用以跳数或距离之和最小的 K 最短路由算法^[8-13, 16-19], 这些简单的贪婪路由算法没有分析备选路径上链路的频谱特征以及忽视了备选路径占有分配的频谱后给网络的业务承载力带来的影响, 因此无法为动态业务找出最合适的路径。针对上述问题, 设计了一种基于路径影响值的 PIV 算法, 在 PIV 算法中, 综合考虑路径跳数、路径上链路的频谱分配特征、频谱分配算法和路径存活时间等影响因素, 设计了一个综合性的指标——路径影响值来衡量路径被选择后给网络服务后续业务带来的影响, 并且选择路径影响值最小的光路来传输业务。路径影响值由频谱使用量、频谱碎片增加量、路径最大承载力、链路空闲频段数量平均值和路径存活时间 5 个元素组成。

1) 频谱使用量。频谱使用量反映了动态业务在备选路径上的频谱资源消耗量, 其计算公式为

$$\phi_{ik} = n_{f_i} \cdot N_{p_{ik}}, \quad (2)$$

式中: p_{ik} 是业务 t_i 的第 k 条备选路径; $N_{p_{ik}}$ 表示业务 t_i 的第 k 条备选路径 p_{ik} 的星间激光通信链路的数量。在选择路由时, 优先选择 ϕ_{ik} 较小的备选路径可以减少对网络频谱资源的占用, 为后续动态到达的业务请求留出更多的频谱资源, 同时选择 ϕ_{ik} 较小的备选路径也可以避免业务请求选择跳数较多的路径进行传输, 从而有利于减少业务的传输时延, 当只考虑频谱使用量时, 路由选择算法等价于基于最短跳数的 k 路由算法。

2) 频谱碎片增加量。频谱块被定义为连续的可用频隙, 随着动态业务到达链路, 频谱资源被离散为多个可用的频谱块, 将离散后的频谱块定义为频谱碎片。频谱碎片增加量为在路径上的星间链路由于传输动态业务而增加的频谱碎片的数量之和, 计算公式为

$$\Delta_{ik} = F_{ik}^a - F_{ik}^b, \quad (3)$$

式中: F_{ik}^a 和 F_{ik}^b 分别表示服务业务 t_i 后以及服务前的第 k 条备选路径 p_{ik} 的频谱碎片数量之和, 图 1 展示了计算频谱碎片增加量的一个具体实例, 如图 1 所示, 第 k 条备选路径 p_{ik} 在服务业务 t_i 前频谱碎片数量为 $F_{ik}^b = 3 + 5 + 5 + 4 = 17$, 当业务到达后基于 3.1 节介绍的 SSA 算法为业务预先分配其所需频谱块后备选路径的频谱碎片数量为 $F_{ik}^a = 4 + 6 + 6 + 4 = 20$, 因此备

选路径 p_{ik} 的频谱碎片增加量 $\Delta_{ik} = 3$ 。

路径的频谱碎片增加量 Δ 越小,表明 SSA 算法分配的频谱块和此路径的星间链路之前占用的频谱资源更加邻接,选择此路径传输业务时,卫星网络整体链路上空闲的频谱资源更加连续,对路径上链路承载后续业务请求的影响更小,从而有利于 SEON 接受后续对频隙需求数量大的业务。

3) 路径最大承载力。路径最大承载力表示基于 SSA 算法为业务在当前路径上分配频谱后,路径上链路的最长频谱块长度的最小值,其值可计算为

$$\varphi_{ik} = \min(\varphi_{ik}^1, \dots, \varphi_{ik}^L), \quad (4)$$

式中: φ_{ik} 是在占有 SSA 算法分配的频谱资源后,任务 t_i 的第 k 条备选路径 p_{ik} 中第 l 条星间激光通信链路 p_{ik}^l 上空闲频谱块长度的最大值。根据卫星弹性业务传输条件可知,当业务所需的传输速率对应的频隙数大于星间激光通信链路的最长空闲频谱块长度时,业务无法在此激光通信链路上进行传输,因此路径最大承载力越小则表明此路径后续能够服务的业务需求范围越窄,后续到达的动态业务被阻塞的概率越高。路径最大承载力反应了此路径被选择后仍然能够有效承载后续业务需求的范围,因此提高卫星网络中所有光路的路径最大承载力对于降低网络阻塞率极其重要。

4) 链路空闲频隙平均值。链路空闲频隙平均值表示路径中各链路空闲 FS 数量的平均值,其计算公式为

$$\gamma_i^k = \frac{\sum_{l=1}^L \gamma_{p_{ik}^l}}{L}, \quad (5)$$

式中: γ_i^k 表示任务 t_i 的第 k 条路径 p_{ik} 中的第 l 条星间链路 p_{ik}^l 的空闲频隙数量之和; L 表示链路 p_{ik}^l 的链路数量。备选路径的链路空闲频隙数量平均值越大,表明此路径在传输当前业务后剩余的空闲频谱资源越多,后续能够承载的业务请求也越多,选择链路空闲频隙平均值 γ 更大的路径传输业务可以使卫星弹性光网络链路剩余的空闲频谱资源更加均衡,能够有效地避免由于部分链路的空闲频谱资源不足而引起的业务阻塞,从而可以减少卫星弹性光网络的业务阻塞率和提高频谱利用效率。

5) 路径存活时间。路径存活时间为路径的星间激光链路的存活时间的最小值,其值的计算公式为

$$T_{ik}^{\min} = \min(T_{ik}^1, \dots, T_{ik}^L). \quad (6)$$

由于卫星网络拓扑动态变化特性,卫星运行到高纬度时部分星间链路将发生中断^[20],在中断的星间链路上传输的业务需要重新路由和分配频谱,因此业务请求优先选择链路存活时间最小值越大的路径进行传输时,业务请求后续需要重新路由和分配频谱的概率越低,业务被成功服务的概率也越高。

基于上述介绍的 5 个组成部分,任务 t_i 的第 k 条路径 p_{ik} 的路径影响值的计算公式为

$$C_i^k = a \cdot \frac{\varphi_i^k}{\varphi_m} + b \cdot \frac{\Delta_{ik}}{\Delta_{\text{nor}}} - c \cdot \min\left(1, \frac{\varphi_{ik}^{\min}}{N_F}\right) - d \cdot \frac{\gamma_i^k}{N_F} - e \cdot \min\left(1, \frac{T_{ik}^{\min}}{T_{\text{dur}}}\right), \quad (7)$$

式中: a, b, c, d, e 为分别表示频谱使用量、频谱碎片增加量、路径最大承载力、链路空闲频隙平均值和路径存活时间在路径影响值中所占的比重。为了消除各组成部分由于量级差异带来的影响,对路径影响值的 5 个组成部分进行了归一化。 Δ_{nor} 和 T_{dur} 是频谱碎片增加量和路径存活时间的归一化值, ϕ 和 Δ 越大,表明在此路径上传输任务占有的频谱资源和产生的频谱碎片越多, φ 和 γ 越大表明此路径上链路的空闲频谱资源更加均衡, T_{ik}^{\min} 越大表明业务需要重新路由和频谱分配的概率越小,综上可知, ϕ 和 Δ 越小, φ, γ 和 T_{ik}^{\min} 越大,路径被选择进行传输后对网络的影响也越小,因此在 PIV 算法中,业务选择路径影响值最小的路径进行传输。

3.3 算法流程

基于 3.1 节和 3.2 节提出的 SSA 算法和 PIV 算法,设计了一种路径状态感知的动态 RSA 算法,该算法将频谱分配算法耦合到路由选择中,以此来全面捕捉路径的状态信息从而为业务选择最佳传输路径提供参考,算法的运行流程如图 2 所示。首先基于 k 最短路由算法提前计算卫星网络所有源-目的卫星节点间 k 条备选路径,并且限制备选路径的最多跳数为 N_L ,然后将求出的所有备选路径存储在路径集合 $p_{s,d}$,随着动态任务请求到达卫星网络,根据业务请求的源-目的卫星节点从 $p_{s,d}$ 中提取出 K 条备选路径,然后根据动态业务需要的 FS 数量选择频谱分配策略,并且在每条备选路径上为业务临时分配空闲 FS 块。如果路径上没有空闲 FS 块,则将此路径的路径影响值设置为无穷大,如果存在可行 FS 块,则计算此路径的路径影响值。最后,选择路径影响值最小的路径以及 SSA 算法在此路径上分配的 FS 块来传输业务。

4 仿真实验及数据分析

4.1 仿真设置

铱星是一种经典的卫星星座,被广泛用于卫星光网络相关研究的仿真实验^[21-23]。本文以典型的卫星星座——铱星为例来进行仿真实验,铱星星座由 66 颗卫星星座组成,星座包括 6 个轨道面,每个轨道面包括 11 个卫星节点,反向缝两侧的卫星存在 2 条轨内和 1 条轨间的星间链路,其他卫星存在 2 条同轨和 2 条异轨的星间链路。假设卫星弹性光网络中每条星间链路带宽为 2.5 THz,在基于正交频分复用的弹性光网络中,频隙的大小被设置为 12.5 GHz,因此每条星间激光通信链路存在 200 个频隙,星间激光链路均采用相同的调制格式。每个业务请求到达服从泊松分布,平均每分钟

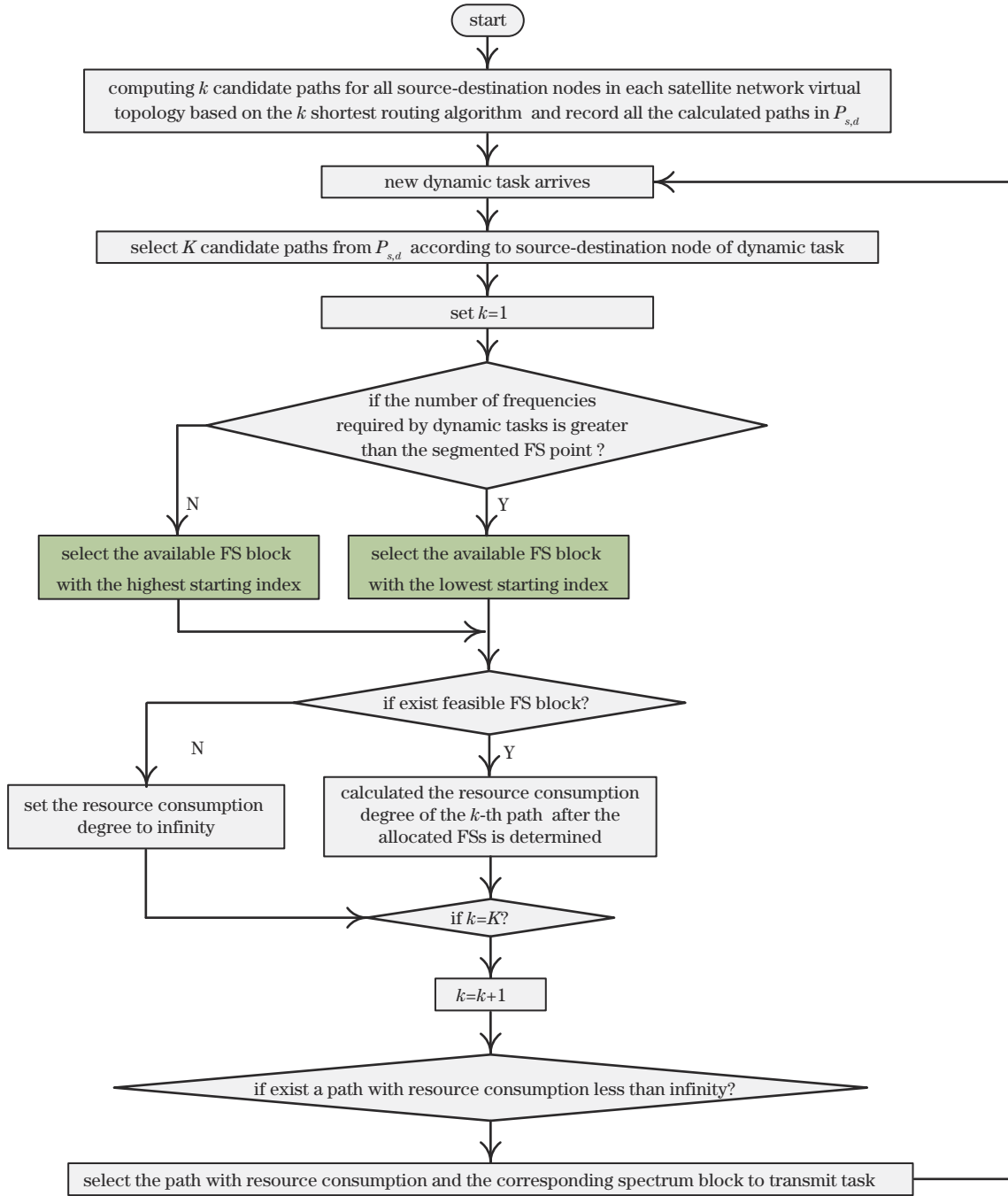


图 2 PIV-SSA 算法流程图
Fig. 2 Flow chart of the PIV-SSA algorithm

到达 λ 个业务请求,且每个业务请求的持续时间服从负指数分布,负指数分布的平均值为 $1/\mu$,综合业务请求的到达率和服务时间分布,整个网络的业务负载强度为 λ/μ 。同时,业务请求的源-目的卫星节点在卫星网络中随机选择,请求速率服从范围为 $[12.5, 250]$ 的均匀分布,因此业务需要的频隙数量均匀分布在 $[1, 20]$ 。提前计算卫星网络所有虚拟拓扑中任意 2 卫星节点间的 k 条备选路径,并且存储在集合 $P_{s,d}$ 中。

由于当前还没有专门针对卫星弹性光网络提出的动态 RSA 算法,因此对比算法采用经典的启发式路由和频谱分配算法即 K 最短路由算法-首次命中(KSP-

FF)算法和最短路由算法-首次命中(SP-FF)算法。在以上仿真设置中进行仿真测试,最后的仿真实验结果取 10 次随机实验的平均值。

4.2 性能指标

本文采用的仿真性能指标为业务阻塞率、频谱利用率和链路平均碎片率。

- 1) 业务阻塞率:业务阻塞率表示被阻塞的业务占总业务数量的百分比。
- 2) 频谱利用率:频谱利用率表示网络中被占用的频隙数量占网络中总的频隙数量的百分比。
- 3) 链路平均碎片率:基于熵的概念来度量链路的

频谱碎片状态是常用的方法^[24-25],本文借助文献[13]定义的链路平均碎片化率来量化网络中链路的频谱碎片化程度,其计算公式为

$$\varphi = \frac{\sum_{l \in E} \sum_{z \in U_l} \frac{\rho_z}{F} \ln \frac{F}{\rho_z}}{L}, \quad (8)$$

式中: U_l 是链路 l 中空闲频谱块集合; ρ_z 为链路 l 中第 z 个频谱块包含的空闲FS数量。通过计算公式可知链路平均碎片化率 φ 越低,网络中链路空闲频谱资源分布更加连续,后续能够服务的业务的速率需求范围越宽。

4.3 仿真结果和数据分析

图3表示在不同网络业务强度下的网络业务阻塞率,随着业务强度的增加,所有RSA算法的网络阻塞率都随着逐渐升高。在不同网络负载强度下,PIV-SSA算法相较于所有对比算法业务阻塞率最低。具体来说,在网络负载强度为500、600、700、800、900、1000、1100、1200 Erlang条件下,PIV-SSA算法相较于KSP-FF算法在阻塞率上分别降低了10.35%、6.89%、5.46%、5.44%、4.44%、3.51%、2.44%、2.05%、1.63%,随着网络业务强度的增加,PIV-SSA算法相较于KSP-FF算法提升的幅度越来越小,这是因为随着业务强度增加,不同RSA算法服务的业务数量逐渐增加到网络可容纳的业务数量最大值,由此可知,网络容量的限制导致不同算法中阻塞业务数量之间的差异越来越小,但网络业务总数仍然保持增长,因此不同算法的网络阻塞率之间的差距也越来越小。分析不同强度下阻塞率可知,卫星网络相较于地面网络具有更大的阻塞率,这是因为在仿真实验中考虑到时延和卫星节点处理能力有限等因素,本文限制业务传输路径最大跳数为8,这导致了部分业务可用的光路较少甚至不存在小于8条的光路,从而产生了较高的业务阻塞率,也进一步限制了PIV-SSA算法相较于其他对比算法在阻塞率上降低的相对幅度。

图4表示不同算法在各种网络负载强度下的频谱利用率,容易发现,3种RSA算法的频谱利用率随着网

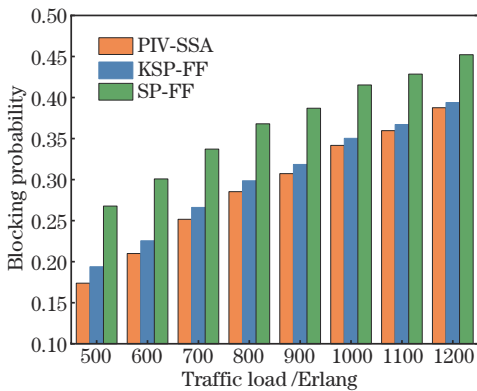


图3 不同算法的阻塞率

Fig. 3 Blocking probability of different algorithms

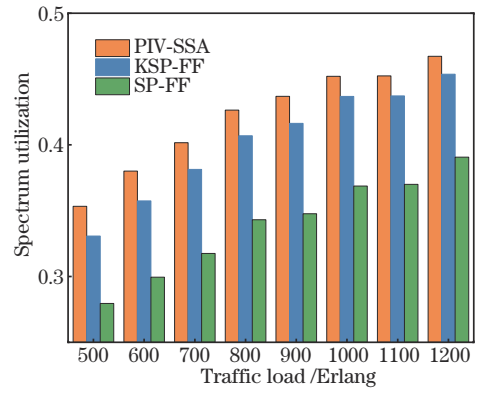


图4 不同算法的频谱利用率

Fig. 4 Spectrum utilization of different algorithms

络负载强度的增加逐渐提高,同时在相同负载情况下,PIV-SSA算法的频谱利用率更高,PIV-SSA和KSP-FF算法的频谱利用率远大于SP-FF算法,PIV-SSA算法频谱利用率更高的原因在于:1)SSA算法分配位置靠后的频谱给频隙需求量较高的业务有利于链路在频谱尾部留出较长的空闲频谱块,从而有利于网络服务后续频隙数需求较大的业务请求;2)PIV算法在路径选择时优先选择频谱碎片增加少和空闲频谱块更长的路径,因此卫星网络中链路的可用频谱更加连续以及链路的空闲频谱资源分布更加均衡,有效地减少了长度较短的频谱碎片的产生,为后续业务请求留出了更长的可用频谱块,因此能够服务传输速率需求范围更大的业务需求。

PIV-SSA算法和对比算法在不同负载强度下链路平均碎片率如图5所示,PIV-SSA算法的链路碎片化率最高,SP-FF算法对应的链路的频谱碎片最少,这是因为PIV-SSA算法的业务阻塞率最低,因此服务了更多的业务,导致网络中链路的频谱碎片增加。3种RSA算法的链路平均碎片化率相差不大,而且随着业务强度增大,3种RSA算法的链路平均碎片化率差距越来越小,综合考虑RSA算法服务的业务数量可知,PIV-SSA算法在一定程度上能够减少频谱碎片的产生。

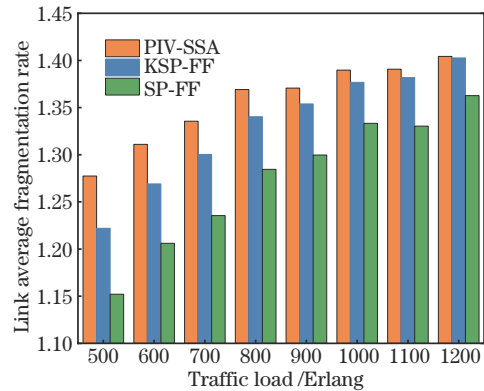


图5 不同算法的链路平均碎片率

Fig. 5 Link average fragmentation rate of different algorithms

为了对比 SSA 算法和 PIV 算法在性能提升中发挥的作用,本文对比了 PIV-SSA 算法、PIV-FF 算法、KSP-SSA 算法和 KSP-FF 算法的性能的阻塞率,PIV-FF 算法基于 PIV 算法进行路由选择以及通过 FF 算法来分配频谱,KSP-SSA 算法在路由阶段和频谱分配阶段分别采用 KSP 路由选择算法和 SSA 频谱分配算法。由图 6 可知,以 KSP-FF 算法为基准,KSP-SSA 算法相较于 PIV-SSA 算法和 PIV-FF 算法的网络阻塞率这一性能提升较少,表明 PIV 算法在 PIV-SSA 算法性能提升中发挥着主要作用。

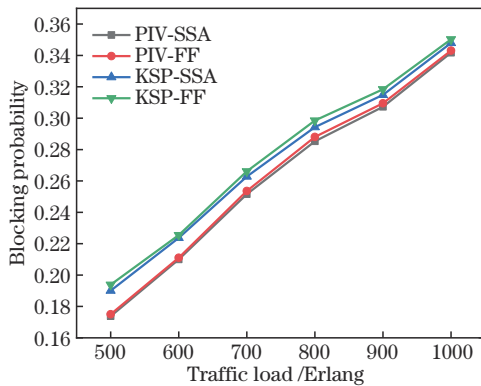


图 6 阻塞率对比曲线

Fig. 6 Blocking probability comparison curves

最后对 PIV-SSA 算法的时间复杂度进行分析, K 最短路由算法的复杂度为 $O(K|S|^2)$, 其中, $|S|$ 是卫星节点的数量, SSA 频谱分配算法的时间复杂度为 $O(N_F N_L)$, 计算路径影响值的时间复杂度为 $O(N_F N_L)$, 因此 PIV-SSA 算法的时间复杂度为 $O[K(|S|^2 + N_F N_L)]$ 。KSP-FF 算法和 SP-FF 算法的时间复杂度分别为 $O[K(|S|^2 + N_F N_L)]$ 和 $O(|S|^2 + N_F N_L)$ 。由此可知, PIV-SSA 算法的时间复杂度的量级和 KSP-FF 相当, 但 KSP-FF 算法在网络阻塞率和频谱利用率等指标上表现更好。

5 结 论

针对卫星弹性光网络中动态 RSA 问题, 本文首先提出了一种分段频谱分配 (SSA) 算法, 然后综合考虑资源消耗、频谱状态和路径存活时间等因素提出一种基于路径影响值得路由选择 (PIV) 算法, 最后提出了一种基于路径状态感知的动态 RSA 算法 (PIV-SSA 算法)。仿真实验结果表明, 相较于 KSP-FF 算法, PIV-SSA 算法在不同网络负载强度下网络阻塞率降低了 1.63%~10.35% 和频谱利用率提高了 3.00%~6.84%, 因此 PIV-SSA 算法能够在降低阻塞率的同时提高频谱利用率, 在卫星弹性光网络中具有一定的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 2020 年中国卫星应用十大事件[J]. 卫星应用, 2021(1): 20-22.
Ten events of satellite applications in China in 2020[J]. Satellite Application, 2021(1): 20-22.
- [2] 赵尚弘, 彭聪, 李勇军, 等. 面向卫星互联网的下一代卫星光网络关键技术进展[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(7): 0700001.
Zhao S H, Peng C, Li Y J, et al. Key technology progress of next-generation satellite optical network for satellite Internet[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(7): 0700001.
- [3] Fu I K, Charbit G, Medles A, et al. Satellite and terrestrial network convergence on the way toward 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 6-8.
- [4] Giordani M, Zorzi M. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 244-251.
- [5] Azari M M, Solanki S, Chatzinotas S, et al. Evolution of non-terrestrial networks from 5G to 6G: a survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(4): 2633-2672.
- [6] Yin Y W, Zhang H, Zhang M Y, et al. Spectral and spatial 2D fragmentation-aware routing and spectrum assignment algorithms in elastic optical networks[invited]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(10): A100-A106.
- [7] Wang X, Kuang K X, Wang S, et al. Dynamic routing and spectrum allocation in elastic optical networks with mixed line rates[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2014, 12(6): 1115-1127.
- [8] 刘焕淋, 徐一帆, 陈勇. 基于频谱感知的业务分割-合并的弹性光网络资源分配策略[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(4): 892-898.
Liu H L, Xu Y F, Chen Y. Spectrum-aware traffic split-merge resource allocation strategy for elastic optical networks[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(4): 892-898.
- [9] Zhu Z Q, Lu W, Zhang L, et al. Dynamic service provisioning in elastic optical networks with hybrid single-/ multi-path routing[J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(1): 15-22.
- [10] 张曙光, 李正贤, 王伟. 基于频谱位示图的联合优化路由频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 130602.
Zhang S G, Li Z X, Wang W. Joint-optimization routing and spectrum allocation algorithm based on spectrum bit diagram[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 130602.
- [11] Liu H L, Ren J, Chen Y, et al. Spectrum slicing-based fragmentation aware routing and spectrum allocation in elastic optical networks[J]. Optical Switching and Networking, 2022, 45: 100673.
- [12] 刘岩, 何荣希, 王钜霖, 等. 弹性光网络中面向立即预留请求的碎片感知路由频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 0506008.

- Liu Y, He R X, Wang J L, et al. Fragmentation-aware routing and spectrum allocation algorithm for immediate reservation requests in elastic optical networks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(5): 0506008.
- [13] 王世成, 陈晓静, 何荣希. 弹性光网络中基于业务承载力的碎片感知路由与频谱分配算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 0706007.
- Wang S C, Chen X J, He R X. Fragmentation-aware routing and spectrum allocation algorithm based on service carrying capacity in elastic optical networks[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0706007.
- [14] Rosa A, Cavdar C, Carvalho S, et al. Spectrum allocation policy modeling for elastic optical networks [C]//*High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, December 12-14, 2012, Istanbul, Turkey. New York: IEEE Press, 2012: 242-246.
- [15] Klinkowski M, Walkowiak K. Routing and spectrum assignment in spectrum sliced elastic optical path network [J]. *IEEE Communications Letters*, 2011, 15(8): 884-886.
- [16] Christodouloupoulos K, Tomkos I, Varvarigos E A. Elastic bandwidth allocation in flexible OFDM-based optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(9): 1354-1366.
- [17] Zheng W, Jin Y H, Sun W Q, et al. On the spectrum-efficiency of bandwidth-variable optical OFDM transport networks[C]//*Optical Fiber Communication Conference*, March 21-25, 2010, San Diego, California. Washington, DC: OSA, 2010: OWR5.
- [18] Jinno M, Kozicki B, Takara H, et al. Distance-adaptive spectrum resource allocation in spectrum-sliced elastic optical path network[Topics in Optical Communications [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2010, 48(8): 138-145.
- [19] Wang Y, Cao X J, Pan Y. A study of the routing and spectrum allocation in spectrum-sliced Elastic Optical Path networks[C]//*2011 Proceedings IEEE INFOCOM*, April 10-15, 2011, Shanghai, China. New York: IEEE Press, 2011: 1503-1511.
- [20] 董毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于蚁群算法的分布式卫星网络波长路由分配技术研究[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(11): 2650-2656.
- Dong Y, Zhao S H, Li Y J, et al. Research on routing and wavelength assignment based on ant colony optimization in distributed satellite optical network[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(11): 2650-2656.
- [21] Wen G L, Zhang Q, Wang H T, 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.
- [22] Li Y Q, Zhang Q, Gao R, et al. An elastic resource allocation algorithm based on dispersion degree for hybrid requests in satellite optical networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(9): 6536-6549.
- [23] Jing Y J, Yi L T, Zhao Y L, et al. Deep-learning-based path computation without routing convergence in optical satellite networks[J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2023, 15(5): 294-303.
- [24] Wright P, Parker M C, Lord A. Simulation results of Shannon entropy based flexgrid routing and spectrum assignment on a real network topology[C]//*39th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC 2013)*, September 22-26, 2013, London. London: IET, 2013: 1-3.
- [25] Chatterjee B C, Ba S, Oki E. Fragmentation problems and management approaches in elastic optical networks: a survey[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(1): 183-210.