

文章编号: 2095-4980(2024)05-0485-10

基于 TDD 的低轨卫星跳波束资源分配算法

邹安银^{a,b}, 张晨^{*a,b}, 张更新^{a,b}

(南京邮电大学 a.通信与信息工程学院; b.通信与网络技术国家工程研究中心, 江苏 南京 210003)

摘要: 低轨(LEO)卫星跳波束技术可以灵活分配系统资源, 适用于业务分布不均匀的场景。时分双工(TDD)方式可以减少星载和地面终端设备的天线数量, 有效降低其复杂度, 并有利于开展上下行非对称业务。本文提出一种基于 TDD 的 LEO 卫星跳波束资源分配算法, 在满足业务需求的基础上, 以最小化时域资源消耗为目标, 建立支持跳波束和多频时分多址接入(MF-TDMA)机制的 LEO 卫星反向链路资源分配模型; 综合考虑星地动态时延补偿, 采取一种多层次的跳波束时隙架构设计, 以最大化可用时隙为目标, 建立上下行时隙切换模型, 并提出一种基于 TDD 的跳波束时隙排布优化方法。仿真结果表明, 对比于传统的 MF-TDMA 资源分配方法或固定多波束均分算法, 本文提出的算法能有效提高系统的时隙利用率和吞吐量。

关键词: 低轨卫星网络; 跳波束; 资源分配; 时分双工; 多频时分多址接入

中图分类号: TN927^{*.2}

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023438

Novel research on beam hopping resource allocation algorithm of Low Earth Orbit satellite based on TDD

ZOU Anyin^{a,b}, ZHANG Chen^{*a,b}, ZHANG Gengxin^{a,b}

(a.College of Telecommunications and Information Engineering; b.National Engineering Research Center for Communication and Network Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China)

Abstract: In the Low Earth Orbit(LEO) scenario, beam hopping technology can flexibly allocate system resources and is suitable for the scenario of uneven service distribution. Time Division Duplex (TDD) mode has low requirements on the terminal and is conducive to the development of upstream and downstream asymmetric services. Therefore, a resource allocation algorithm is proposed for low-orbit satellite beam hopping based on TDD. Firstly, the resource allocation model of LEO reverse link supporting beam hopping and Multifrequency-Time Division Multiple Access(MF-TDMA) is established to minimize the time domain resource consumption in condition of satisfying the service requirements. Secondly, considering the dynamic time-delay compensation of satellite and earth, a multi-level beam hopping time slot architecture design is adopted to maximize the available time slot. The upstream and downstream time slot switching model is established, and a beam hopping time slot scheduling optimization method is proposed based on TDD. Simulation results show that compared with traditional MF-TDMA resource allocation method or fixed multi-beam splitting algorithm, the proposed algorithm can effectively improve the time slot utilization and throughput of the system.

Keywords: Low Earth Orbit satellite network; beam hopping; resource allocation; Time Division Duplex; Multifrequency-Time Division Multiple Access

随着移动通信业务的快速发展, 地面移动通信系统已不能满足偏远地区、山区、海岛、灾区、海上航行船舶等的通信需求。卫星通信系统因具有覆盖范围广, 传输容量大, 可靠性高, 组网灵活等诸多优点, 已成为现代无线通信的重要手段之一。低轨道(LEO)卫星时延短, 成本低, 体积小, LEO 通信系统可以提供全球宽带接入

收稿日期: 2023-12-28; 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 国家重点研发计划重点专项资助项目(2022YFB2902600); 国家自然科学基金资助项目(61901230; U21A20450)

*通信作者: 张晨 zhangchen@njupt.edu.cn

服务, 是对现有地面移动通信系统的补充, 也是目前卫星通信系统的重点研究方向。跳波束技术^[1]通过相控阵天线控制波束方向, 基于时间分片思想, 动态分配卫星的带宽和功率资源, 满足用户的非均匀动态业务需求, 提高卫星的资源利用率和服务能力^[2]。由于 LEO 星上资源严重受限, 广大研究学者已着眼于将跳波束技术用于 LEO 场景。时分双工(TDD)和频分双工(Frequency Division Duplex, FDD)是两种不同的双工方式, 其中 TDD 模式的通信双方使用同一频段, 发送和接收是在同一个频段上交替进行, 通过时间划分方式进行处理, 只需一副天线即可完成发送和接收操作, 减少了星载和地面终端设备的天线数量, 并有效降低复杂度; FDD 模式的通信双方工作在对称频段, 需使用不同的频段分别进行发送和接收操作, 因此需要两副天线, 一副用于发送, 一副用于接收, 即终端需要更多的天线资源, 满足同时进行发送和接收的要求。相较于 FDD, TDD 对星载和地面终端设备的要求更低; 此外, FDD 模式上下行带宽不可动态改变, 而 TDD 模式可以通过时间划分灵活分配上下行带宽, 因此 TDD 模式更有利于建立上下行非对称业务, 在业务适配中具有更高的灵活性和更好的匹配度。

在理论和技术研究方面, 文献[3]提出了宽波束结合动态点波束的 LEO 跳波束接入方案, 由宽波束获取指令信息, 辅助点波束进行跳波束按需服务用户业务, 但并未考虑干扰避免等实际问题。文献[4]建立了初步的跳波束资源分配模型, 并采用启发式算法, 提高卫星系统前向链路的系统吞吐量。文献[5-6]分别建立了以最小化同频干扰和最大化信干噪比为目标函数的跳波束资源模型, 并设计了初步的跳波束图案规划方案。虽然限制了同频干扰, 但未考虑波束间断带来的时隙同步问题。文献[7]提出了一种基于分簇的全频带跳波束图案优化方案, 降低了同频干扰和波束的频繁切换, 但仿真场景针对的是高轨卫星通信系统, 在低轨卫星场景下仍需作进一步研究。文献[8]针对控制信令随业务波束的场景提出一种联合优化的跳波束图案设计方案。采用凸优化算法, 并综合考虑同频干扰、波束重访时间、系统同步等因素, 对时隙分配结果进行联合优化, 解决了波束间断带来的同步问题。文献[9]探索了一种结合学习和优化的方法, 为跳波束调度提供了一个快速、可行和接近最优的解决方案。文献[10]以最小化卫星上数据包平均时延为目标, 建立支持跳波束技术的低轨卫星资源分配优化模型, 并将迁移学习和深度强化学习算法相结合, 优化了卫星服务过程中的时隙分配, 减小了数据包的平均传输时延, 有效提高了系统的吞吐量和资源利用效率, 但其算法复杂度高, 网络训练时间长。

现有关于 LEO 跳波束场景的资源分配算法研究主要集中在前向链路, 对 LEO 跳波束反向链路资源分配的研究还不够充分; 并且现有 LEO 跳波束场景大多采用 FDD 方式, 卫星和终端双方工作在对称频段, 不利于开展上下行非对称业务。为此, 本文提出一种基于 TDD 的跳波束时隙优化排布算法, 设计一种交替形式的上下行时隙切换机制, 以最大化可用时隙为目标, 建立可靠的时隙切换模型。仿真结果表明, 同 MF-TDMA 的传统装箱算法相比, 本文提出的算法大幅减少了 LEO 跳波束反向链路的波束驻留时间, 提高了时隙资源利用率; 同传统固定多波束策略相比, 本文提出的基于 TDD 的 LEO 跳波束资源分配方案, 在系统吞吐量和资源利用率性能方面的效果更显著。

1 系统模型

如图 1 所示, 基于 TDD 的 LEO 跳波束卫星系统主要由 LEO 卫星、网络控制中心、信关站和用户终端组成。前向链路遵循 DVB-S2X(Digital Video Broadcasting-Satellite-Second Generation Extensions)协议^[11-12]支持的跳波束工作方式: 信关站将数据通过时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)方式传送给 LEO 卫星, LEO 卫星的跳波束控制器将不同的数据流切换到相应的波束; 反向链路则遵循 DVB-RCS(Digital Video Broadcasting-Return Channel via Satellite)协议^[13-14]: 用户终端通过 MF-TDMA 方式接入 LEO 卫星, LEO 卫星将数据透明传送至地面信关站或网络控制中心, 由此实现用户终端之间的通信链路。前向链路和反向链路采用不同的算法分配跳波束驻留时隙, 但由于通信双方工作在同一频段, 因此前向链路和反向链路的跳波束驻留时隙不再独立进行时隙规划, 而是统一在跳波束周期内的不同时间段内进行跳波束图案规划。由于上下行业务的非对称性, 前向时隙会多于反向时隙。由于 LEO 的动态性, 上下行时延不断变化, 因此要在星历和用户位置的辅助下, 进行动态时延补偿, 并在上下行时隙之间设置保护间隔, 避免上下行同频干扰。

1.1 前向链路

在 FDD 和 TDD 模式下, LEO 卫星跳波束前向链路均可采用单载波 TDM 机制。因此, 本文借鉴 FDD 模式的前向链路相关资源分配算法, 参考文献[15], 以二阶差分为目标函数, 采用凸优化算法求解跳波束时隙。

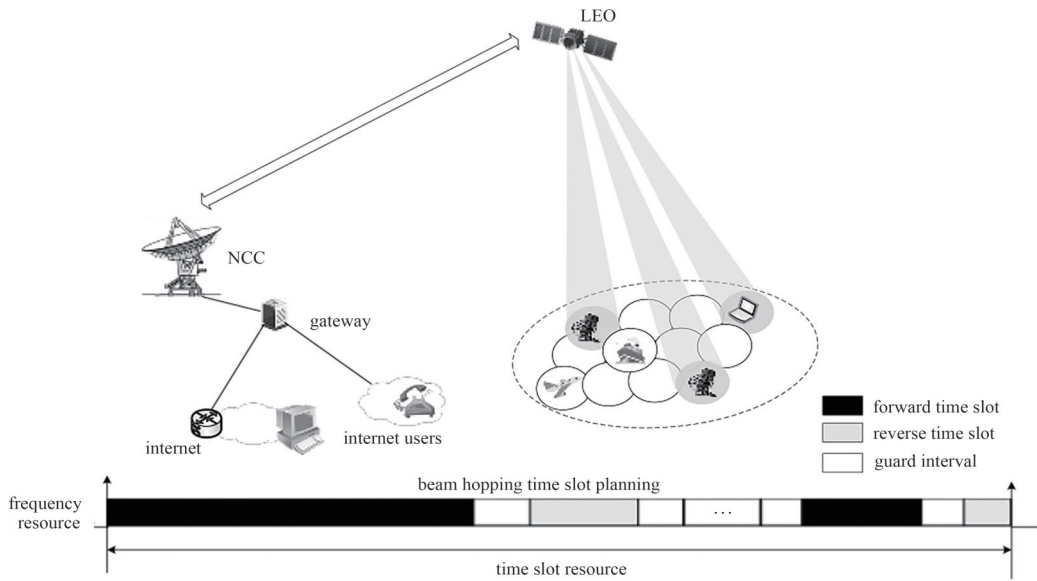


Fig.1 System model
图1 系统模型

1.2 反向链路

LEO跳波束反向链路从地面用户端出发，传输速率更低，地面终端发射信号的功率较小，数据传输质量受天气等自然因素的影响，易受到干扰。MF-TDMA采用频分和时分相结合的二维多址接入方式，将信道划分成不同的载波，然后在每个载波内进行时隙划分，每个用户在一定的时间内拥有指定的带宽，如图2所示。该体制允许众多用户终端共享一系列不同速率的载波^[16]，因此，本文采用跳波束和多载波结合机制，使用MF-TDMA多址接入方式，综合调度时频二维资源，提高用户的业务满意度和资源利用率。

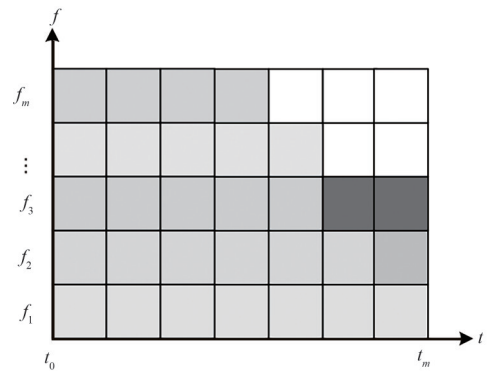


Fig.2 Structure of MF-TDMA
图2 MF-TDMA结构

2 算法及分配方案

2.1 系统算法流程

如图3所示，本文先根据文献[15]提出的凸优化算法求得前向跳波束驻留时隙，再根据载波最大剩余时隙优先算法求得反向跳波束驻留时隙，之后对跳波束上下行时隙进行统一架构设计，并进行跳波束上下行时隙排布优化。

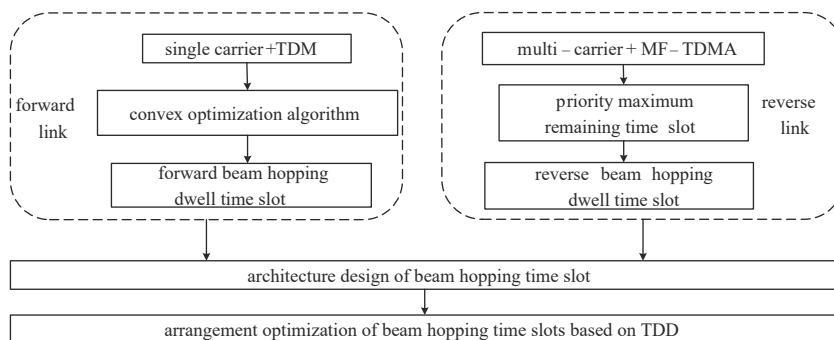


Fig.3 Design flow of system algorithm
图3 系统算法设计流程

2.2 MF-TDMA 载波/时隙分配

MF-TDMA 作为目前宽带卫星互联网采用的主流体制，允许众多用户终端共享一系列不同速率的载波。传统 MF-TDMA 资源分配方式^[17]大多以尽可能地减少使用载波数为目的，而跳波束基于时间分片，旨在一个跳波束周期内服务尽可能多的波位。若将跳波束与 MF-TDMA 相结合，则需着重从时域上考虑，通过合理的载波/时隙分配方法，使每个波位的跳波束驻留时隙尽可能少，则在一个跳波束周期内能服务的波位数就更多，以此提高用户的业务满意度和系统的资源利用率，尽可能地减少时域资源的浪费。

本文建立相关的数学模型和目标函数，尽可能地减小每个上行波束的最大驻留时间，提高资源利用率。

$$\begin{cases} \min(T_m - T_0) = \min(\max_{i \in \phi} (N_i \tau) - T_0) \\ \text{s.t.} \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^n x_{i,j} \leq 1 \\ \sum_{i=1}^n N_i \cdot x_{i,j} \leq M y_j \\ P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^M x_{i,j} \leq P_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中： T_m 为用户需要的最大时隙； T_0 为载波分配给用户的起始时间(可设置为 0)； N_i 为第 i 个用户待分配的时隙数量； τ 为每个载波时隙的时间， $\tau = T_{sf}/(N_c M)$ ，其中 T_{sf} 为帧长时间； N_c 为最大载波数， M 为每个载波能够承载的最大时隙数量； y_j 表示第 j 个载波信道是否被占用：

$$y_j = \begin{cases} 1, \text{载波信道} j \text{ 被占用} \\ 0, \text{载波信道} j \text{ 未被占用} \end{cases}; x_{i,j} \text{ 表示第 } i \text{ 位用户占用第 } j \text{ 个载波}$$

波时隙的状态： $x_{i,j} = \begin{cases} 1, \text{第 } i \text{ 个用户占用第 } j \text{ 个载波的时隙} \\ 0, \text{第 } i \text{ 个用户不占用第 } j \text{ 个载波的时隙} \end{cases}$ ； n 为用户数量； ϕ 为用户集合； P 为每个载波分配的功率； P_{\max} 为系统最大功率。

约束条件如下：

- 1) 根据 DVB-RCS 标准，每个用户分配到的时隙必须连续且必须在同一个载波信道中，以减小信令开销，提高传输效率；
- 2) 每个载波信道所能容纳的时隙容量是有限的，每个载波能够分配的用户时隙不能超过载波的最大时隙数；
- 3) 每个载波信道上分配的功率不能超过其最大功率，确保系统不会超出功率限制。

假设载波宽度相同，设 n 位用户的上行链路传输速率分别为 R_1, R_2, \dots, R_n (kbps)，则第 i 位用户待分配的载波时隙数为：

$$N_i = \text{ceil} \left[\frac{R_i T_{sf}}{C_0} \right] \quad (2)$$

根据 DVB-RCS 标准， T_{sf} 为帧长时间，每个时隙内都包含一个 ATM(Asynchronous Transfer Mode)信元(cell)，即大小为 53 字节的数据^[18]。

获得了用户待分配的时隙数之后，需要考虑如何将用户各自的时隙分配给频率不同的载波。本文提出一种新的离线装箱算法——载波最大剩余时隙优先算法(如图 4 所示)，算法步骤如下：

- 1) 将用户的待分配时隙块按照大小降序排列，并将载波从小到大编号；
- 2) 将排序好的时隙块按顺序依次分配给每个载波，即最大时隙块分配给 1 号载波，次之时隙块分配给 2 号载

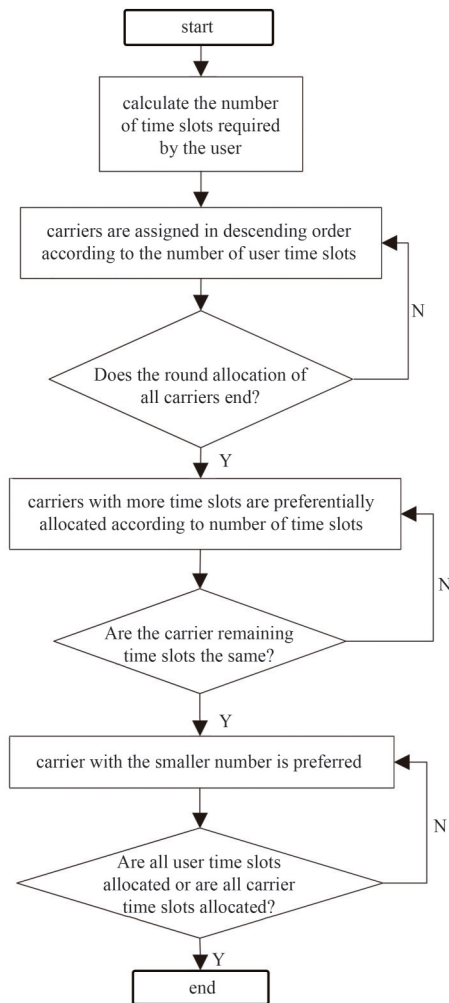


Fig.4 Flow chart of priority maximum remaining time slot
图 4 载波最大剩余时隙优先算法流程图

波，以此类推；

3) 当所有的载波被分配了一轮之后，如果还有用户时隙待分配，则继续按时隙块大小顺序分配载波，优先分配剩余时隙数多的载波。如果此时某些载波剩余的时隙数相同，则优先分配载波编号更小的那个载波；

4) 直到所有的用户时隙被分配或所有的载波时隙被分配完，结束分配。

2.3 基于 TDD 的跳波束时隙架构设计

如图 5 所示，本文采取一种多层次的时隙架构设计，实现跳波束上下行时隙划分。由文献[7]可知，根据 DVB-S2 标准，当同频复用的波束距离大于 4 倍波束半径时，可忽略干扰的影响，因此本文选取 4 倍波束半径作为频率复用距离。考虑到不同波位内的用户业务需求及同频复用距离，在每个跳波束周期内对多个波位的跳波束时隙块进行跳波束图案设计。每一个波位时隙块可划分为多个上行块、下行块和保护间隔。根据波位内不同位置的用户传输时延和用户业务需求，波位上行块内部又可分成多个用户上行时隙，波位下行块内部又可分成多个用户下行时隙，避免波位内不同位置用户的干扰和碰撞。

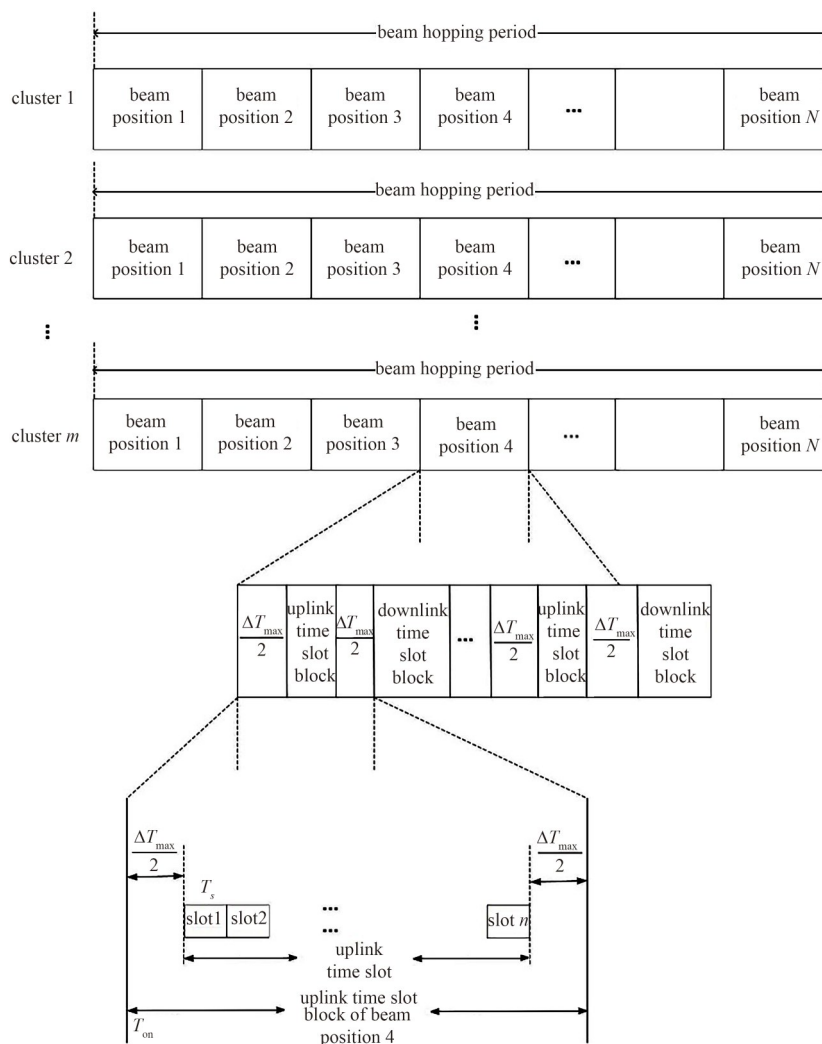


Fig.5 Up-and-down time slot architecture for beam hopping
图5 跳波束上下行时隙架构

保护间隔的主要作用是确保信号从一个传输状态切换到另一个传输状态时，有足够的时间让系统完成必要的切换操作，至少涵盖信号传播时延，即信号从发射端到达接收端所需的时间，以确保传输的连续性和数据的可靠性。定义波位的最大传输时延^[19]为：波位上距离卫星最远的地点与距离卫星最近的地点之间的星地传输时延差异。可以将每个波位的最大传输时延作为保护间隔，避免传输的中断和干扰。

如图 6 所示，地理位置的不同导致了远地端和近地端地面站与卫星之间的传输距离和时间差异。由于 LEO 的高动态性，上下行时延在动态变化，因此需要考虑星地位置，进行动态时延补偿，提高效率。

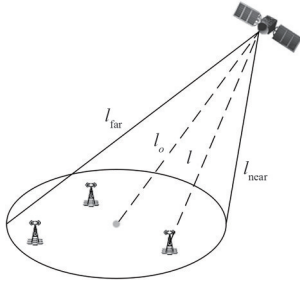


Fig.6 Ground terminals at different locations
图6 不同位置地面终端

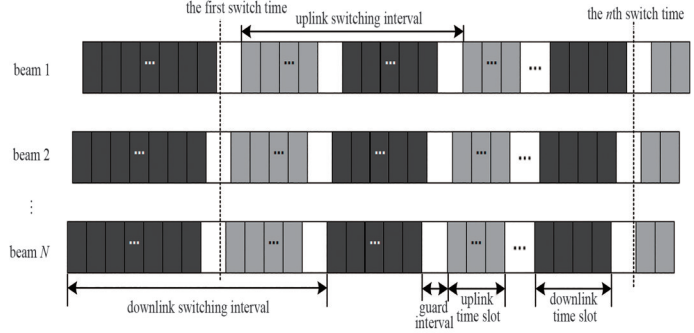


Fig.7 Upstream and downstream time slot switching for beam hopping
图7 跳波束上下行时隙切换

假设一个跳波束周期内可以服务 N 个波位, 第 i ($i=1, 2, 3, \dots, N$) 个波位时隙块又可分为上行块和下行块, 且两者之间设置保护间隔为该波位最大传输时延的一半; 在上行块或下行块内又可分为 j ($j=1, 2, 3, \dots, n$) 个用户上行时隙或用户下行时隙, 其中第 i 个波位内第 j 个用户时隙^[20]发送上行业务的时间 $T_{(i,j)}$ 为:

$$T_{(i,j)} = T_{ON} + \frac{\Delta T_{(i, \max)}}{2} + T_s \left[(j-1) + N_{(i,j)} \right] - \frac{(L_{(i,j)} - L_{(i,o)})}{c} \quad (3)$$

$$\Delta T_{(i, \max)} = \frac{L_{(i, \text{far})} - L_{(i, \text{near})}}{c} \quad (4)$$

式中: $\Delta T_{(i, \max)}$ 为第 i 个波位的最大传输时延; T_s 为每个时隙长度; $N_{(i,j)}$ 为第 i 个波位内第 j 个用户的时隙数; $L_{(i,j)}$ 为第 i 个波位内第 j 个用户的星地距离; $L_{(i,o)}$ 为第 i 个波位中心的星地距离; c 为光速。

每个用户终端根据与标准终端的星地距离差进行时间补偿, 补偿时间(提前或延迟发送时间)为 $\frac{(L_{(i,j)} - L_{(i,o)})}{c}$ 。

2.4 基于 TDD 的跳波束时隙排布优化

获得每个波位内上下行时隙经过时延补偿后的发送时间后, 为保证在同一段时间内所有波束的方向同时切换成反向, 本文对上下行时隙排布进行优化, 尽可能地满足上下行时隙需求, 提高系统吞吐量。

如图 7 所示, 上行切换间隔是指 2 次上行时隙切换之间的时间间隔, 下行切换间隔是指 2 次下行时隙切换之间的时间间隔。上下行切换间隔的长短会影响用户体验: 对于实时业务, 如语音通话或实时视频流, 用户对等待时间的容忍度较低, 等待时间超过几百毫秒甚至更短的时间, 可能会导致数据传输中断或卡顿, 影响用户体验; 而对于非实时业务, 如文件下载或网页浏览, 用户可能会容忍稍长一些的等待时间, 但如果等待时间超过几秒钟, 用户可能会感到不满, 尤其是在等待时间中无法获取任何信息或内容。

综上所述, 通常情况下, 用户等待时间超过几百毫秒至 1 s, 可能会导致数据传输不连续, 影响用户体验。设置阈值 T_n , 如果是实时业务, 可设置 T_n 为 10 ms; 如果是非实时业务, 可设置 T_n 为 2 s。

定义连续分配多个下行时隙、一次保护间隔和连续分配多个上行时隙的时间为一次上下行时隙的切换。由于互联网的下行业务量明显大于上行业务量, 采取一种交替形式的上下行时隙切换机制: 将同一时间段的波位下行时隙块统一进行时间分片, 经过保护间隔后, 统一切换成上行时隙块; 再经过保护间隔后再统一切换成仍未被满足的下行业务时隙块, 以此类推, 建立上下行非对称业务。

建立以下数学模型以最大化可用时隙, 即最小化切换次数和保护间隔的乘积。

$$\max(W - N_{\text{switch}} T_{\text{guard}}) \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^{N_{\text{switch}}} (T_{\text{down}}(i) + T_{\text{up}}(i)) + N_{\text{switch}} T_{\text{guard}} \leq W \quad (6)$$

$$N_{\text{down, min}} \leq T_{\text{down}}(i) \leq N_{\text{down, max}} \quad (7)$$

$$N_{\text{up, min}} \leq T_{\text{up}}(i) \leq N_{\text{up, max}} \quad (8)$$

$$2T_{\text{guard}} + T_{\text{up}}(i) \leq T_n \quad (9)$$

$$2T_{\text{guard}} + T_{\text{down}}(i) \leq T_n \quad (10)$$

$$T_{\text{guard}} = \max(\Delta T_{j, \max}), j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

式中： W 为跳波束周期总时隙数； N_{switch} 为切换次数； T_{guard} 为保护间隔； $T_{\text{down}}(i)$ 、 $T_{\text{up}}(i)$ 分别为每次切换前分配的下行时隙数和每次切换后分配的上行时隙数； T_n 为连续 2 次切换的下行切换间隔或上行切换间隔的阈值； $\Delta T_{j, \text{max}}$ 为第 j 个波束的最大传输时延。

约束条件：

- 1) 所有切换次数内分配的上下行时隙与保护间隔的总和不能超过跳波束周期；
- 2) 每一次切换时间内分配的上/下行时隙不能低于所有波位中需求的最小上/下行时隙，不能超过所有波位中需求的最大上/下行时隙；
- 3) 上/下行切换间隔不能超过阈值，在保证数据传输连续性的前提下，尽量减小卫星/用户等待时间；
- 4) 设置上下行切换的保护间隔为所有波束中的最大传输时延。

为求解上述优化问题，每次切换分配的下行时隙数或上行时隙数采取动态的时隙数基准分配时隙。从当前所有簇点亮波位的最小波位待分配时隙数和最大时隙数之间，以最大化时隙利用率(系统实际分配的上下行时隙数与跳波束周期总时隙数的比值)为目标选择一个合适的基准：首先初始化分配时隙数为 $\min(T_{\text{待分配}})$ ，计算时隙利用率；之后将分配时隙数进行累加，再计算时隙利用率，直至分配时隙数为 $\max(T_{\text{待分配}})$ ；比较计算得到的所有时隙利用率，以最大的时隙利用率对应的分配时隙数为分配基准进行时隙分配。每次上下行切换之后一定会有部分波位时隙数没有被全部满足，则在下一次时隙分配时，更新当前所有的波位待分配时隙数，继续采用上述方式进行时隙分配，以此类推。

如图 8 所示，整体的算法流程如下：

步骤 1：根据场景生成的波位内的上行或下行业务量，采用前文提到的前向跳波束算法和反向跳波束算法，分别生成前向跳波束驻留时隙数和反向跳波束驻留时隙数；

步骤 2：根据卫星的星历，计算当前仿真时间内各个波位距离卫星的最大传输时延；

步骤 3：设置跳波束簇间同频复用距离为 4 倍波束半径^[7]，进行跳波束图案设计；

步骤 4：当多个簇同时点亮簇内波位时，将当前所有被点亮波位的下行时隙需求数或上行时隙需求数按照降序排列，采用动态时隙分配算法，并以固定时隙分配算法为对照组，在满足模型约束的前提下，最大化目标函数；

步骤 5：在分配了一定数量的下行时隙或上行时隙之后，需分配一定的保护时隙，并进行上下行时隙切换，再切换成上行时隙或下行时隙分配，以此类推；

步骤 6：如果跳波束的时隙被全部分配完或用户波位内业务被全部满足，则结束分配；否则，返回步骤 4。

3 性能与仿真分析

按照上文所述的算法进行基于 TDD 的跳波束时隙分配，如表 1 所示。以 STARLINK 星座的部分典型相关参数^[21]为仿真参数，搭建仿真场景，使用 Matlab 搭建仿真平台，联合卫星轨道仿真软件获取卫星的星历信息，最后对仿真结果进行分析。

如图 9 所示，不同位置波位的业务到达是上下波动的且各波位的业务量时间分布不均匀，下行业务量明显大于上行业务量，符合互联网业务的统计规律，具有上下行非对称业务的特性，以此建立业务模型，作为本文资源分配算法的业务输入。

为验证本文提出的载波最大剩余时隙优先算法的效果，分别采取降序首次适应、公平轮询载波和载波最大剩余时隙优先算法，在跳波束周期内对一个波束进行载波/时隙分配，结果如图 10~12 所示。

从图 10 中可以看出，传统的降序首次适应算法以最小化载波数为目的，旨在用最少的载波分配尽可能多的用户时隙，但与此同时，每个载波的全部时隙都被占用，以至于对应波位的跳波束驻留时隙数很大；图 11 的公平轮询载波算法将每个载波

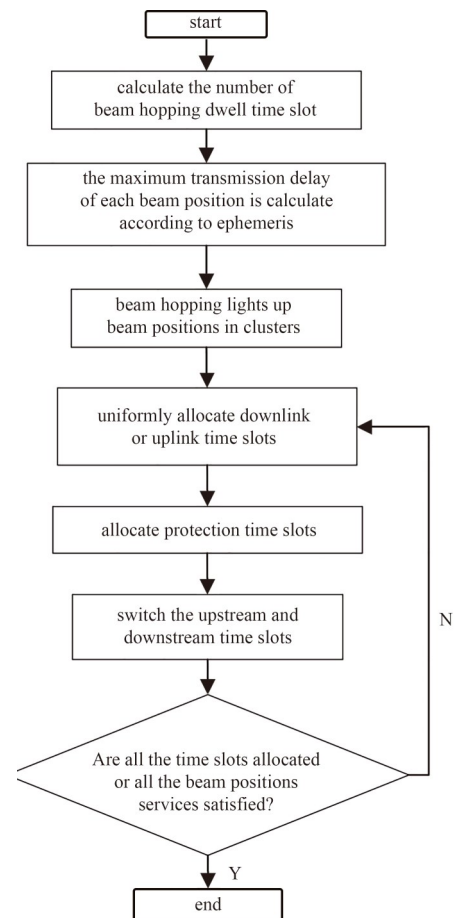


Fig.8 Process of time slot arrangement
图 8 时隙排布流程

都分配了一定的用户时隙，但每个载波的时隙尚有剩余，相较于降序首次适应算法，对应波位的跳波束驻留时隙有所减少，后续的空闲时域资源可留给其他波束的载波；图 12 为本文提出的载波最大剩余时隙优先算法，在公平轮询载波算法的基础上进一步优化，在给用户分配时隙时考虑到了每个载波当前所剩余的时隙，优先选择当前剩余时隙更多的载波，这样更能减小载波分配整体的时隙长度，压缩时域上资源的使用，以此在跳波束周期内服务更多的波位，提高资源的利用率。

表 1 主要仿真参数

Table1 Main simulation parameters	
simulation parameters	value
height/km	550
uplink frequency/GHz	14.2
downlink frequency/GHz	14.2
total system bandwidth/MHz	250
satellite transmitting gain/dBi	75
satellite receive gain/dBi	42.9
user transmitting gain/dBi	34.2
user receive gain/dBi	30
satellite transmitting power/dBW	20
user transmitting power/dBW	3.2
subcarrier bandwidth/MHz	2.5
time slot number/carrier	128
beam number	32
frame length of the reverse link/ms	24
unit time slot length/ms	1
total number of time slots	512
noise temperature/K	300
beam radius/km	25

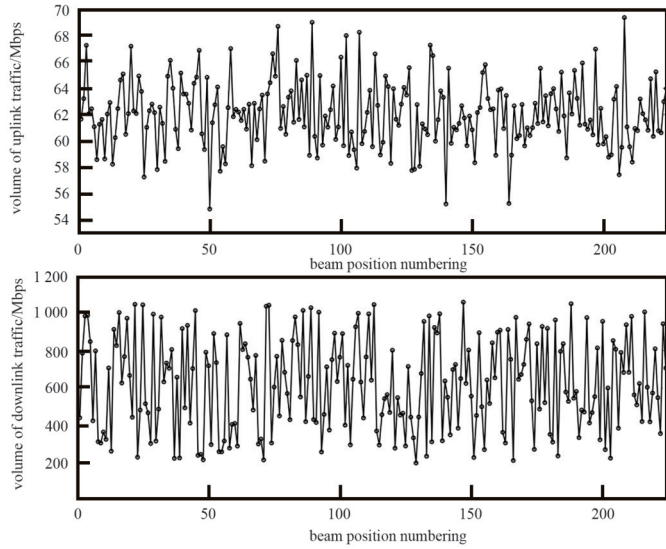


Fig.9 Upstream and downstream traffic of each beam position
图 9 各波位上下行业务量

对多个不同跳波束周期业务进行系统仿真，每个跳波束周期内的波位业务都是随机生成，并考虑干扰避免，在满足同频复用距离大于 4 倍波束半径的前提下进行跳波束图案设计。采用方法为：a) 前向链路采用凸优化算法，反向链路采用本文提出的载波最大剩余时隙优先算法，最后统一采用本文提出的动态时隙排布方法；b) 前向链路采用凸优化算法，反向链路采用公平轮询载波算法，最后统一进行固定时隙排布；c) 前向链路采用凸优化算法，反向链路采用传统的降序首次适应算法，最后统一进行固定时隙排布。如图 13 所示，由于为资源受限系统，通过计算得到上述 3 种方法在仿真时间内的平均时隙利用率分别为 0.886 8、0.728 1、0.683 1。3 种算法的时隙利用率均未达到 1，但本文算法的时隙利用率明显优于另外 2 种方法。这是因为本文算法在反向链路资源分配上以尽可能减少时隙资源消耗为目标；上下行时隙统一通过动态选择时隙分配标准，动态分配每个波位需要的上下行时隙，尽可能地减少切换次数，在跳波束周期内所需的保护时隙变少，更加适用于波位业务不均匀的场景。

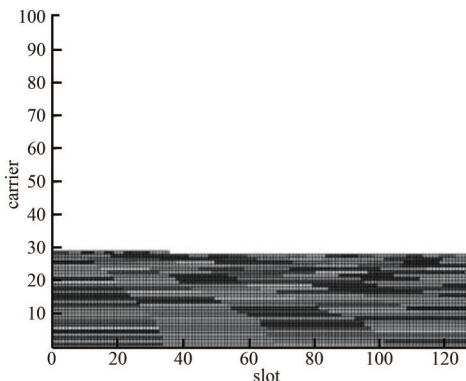


Fig.10 First-fit decreasing
图 10 降序首次适应

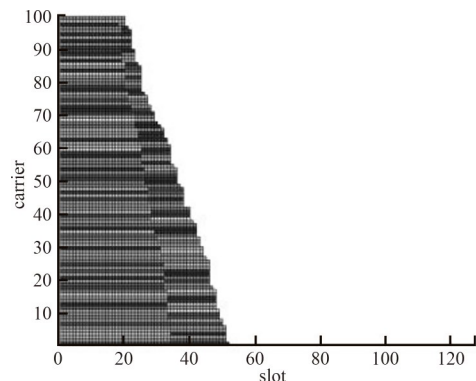


Fig.11 Fair polling
图 11 公平轮询

将上述 3 种算法与传统固定多波束均分策略的系统吞吐量进行对比，结果如图 14 所示。可以看出，在每个跳波束周期内，本文算法仿真得到的系统吞吐量明显优于另外 3 种算法。计算多个仿真周期内的系统平均吞吐量，上述 3 种算法得到的平均系统吞吐量比固定多波束均分策略分别提高了约 93.41%、80.92%、76.38%，其中本文算法计算得到的平均系统吞吐量又比另外两种算法分别提高了约 9.66%、6.91%。这是因为相对于传统固定多波束，跳波束技术更适应于业务分布不均匀的场景；且本文提出的反向链路算法在满足用户需求的前提下，

减少了时域浪费，能在一个跳波束周期内服务更多的用户；同时，在上下行时隙切换时考虑动态时隙规划，尽可能减少切换次数，最大化可用时隙，提高了系统的吞吐量。

4 结论

本文研究了基于 TDD 的 LEO 跳波束资源分配问题，重点针对反向链路场景，采用跳波束和 MF-TDMA 相结合的方式，建立可靠的数学模型，并提出一种适用于 TDD 机制的跳波束时隙架构设计和时隙规划方案。仿真结果表明，本文提出的载波最大剩余时隙优先算法能让波束内载波分配时隙更少，各波位需要的跳波束驻留时隙更少，大大减少了时域资源的浪费，提高了资源利用率；同时，本文提出的动态时隙规划方法能尽可能地减少切换次数，动态分配每个波位需要的上下行时隙，在跳波束周期内所需的保护时隙变少，更加适用于波位业务不均匀的场景，提高了系统的吞吐量。

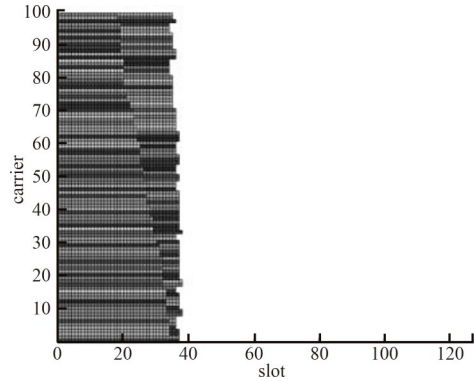


Fig.12 Priority of maximum remaining time slot
图 12 载波最大剩余时隙优先

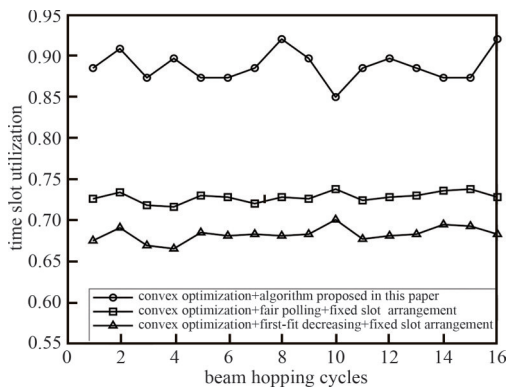


Fig.13 Comparison of time slot utilization
图 13 时隙利用率对比图

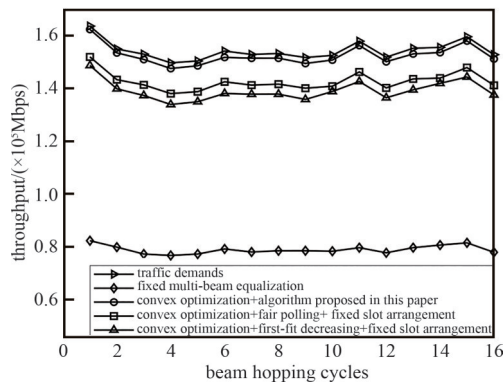


Fig.14 Comparison of throughput
图 14 吞吐量对比图

参考文献：

[1] ROSSI T, SANCTIS M D, CIANCA E, et al. Future space-based communications infrastructures based on high throughput satellites and software defined networking[C]// 2015 IEEE International Symposium on Systems Engineering(ISSE). Rome, Italy: IEEE, 2015:332-337. doi:10.1109/SysEng.2015.7302778.

[2] ZHAO Qi, HU Yiqing, PANG Zhenyu, et al. Beam hopping for LEO satellite: challenges and opportunities[C]// 2021 IEEE the 29th International Conference on Network Protocols(ICNP). Lanzhou, China: IEEE, 2022:319-324. doi:10.1109/CoST57098.2022.00072.

[3] 刘婉莹, 夏师懿, 姜泉江, 等. 低轨卫星网络基于跳波束的资源调度算法[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(6):805-813. (LIU Wanying, XIA Shiyi, JIANG Quanjiang, et al. Resource scheduling algorithm based on beam hopping in LEO satellite networks[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2020, 37(6):805-813.)

[4] ALEGRE R, ALAGHA N, CASTRO M A V. Heuristic algorithms for flexible resource allocation in beam hopping multi-beam satellite systems[C]// The 29th AIAA International Communications Satellite Systems Conference(ICSSC-2011). Nara, Japan: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2011:8001. doi:10.2514/6.2011-8001.

[5] ALEGRE G R, ALAGHA N, VÁZQUEZ C M A. Offered capacity optimization mechanisms for multi-beam satellite systems[C]// 2012 IEEE International Conference on Communications. Ottawa ON, Canada: IEEE, 2012: 3180-3184. doi: 10.1109/ICC.2012.6364414.

[6] LEI J, VAZQUEZ C M A. Frequency and time-space duality study for multibeam satellite communications[C]// IEEE International Conference on Communications. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010:1-5. doi:10.1109/ICC.2010.5502522.

[7] 王亚昕, 边东明, 胡婧, 等. 基于分簇的全带宽跳波束图案优化方法[J]. 计算机工程, 2020, 46(4):169-176. (WANG Yaxin, BIAN Dongming, HU Jing, et al. Full bandwidth beam hopping pattern optimization method based on clustering[J]. Computer Engineering, 2020, 46(4):169-176.) doi:10.19678/j.issn.1000-3428.0055179.

- [8] 张晨,彭明阳,张更新. 基于联合优化的高通量卫星跳波束图案设计研究[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2021,41(3): 1–8. (ZHANG Chen, PENG Mingyang, ZHANG Gengxin. Research on high throughput satellite beam hopping pattern design based on joint optimization[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2021, 41(3):1–8.) doi:10.14132/j.cnki.1673–5439.2021.03.001.
- [9] LEI Lei, EVA L, YUAN Yaxiong, et al. Deep learning for beam hopping in multibeam satellite systems[C]// 2020 IEEE the 91st Vehicular Technology Conference. Antwerp, Belgium:IEEE, 2020:1–5. doi:10.1109/VTC2020–Spring48590.2020.9128905.
- [10] 陈前斌,麻世庆,段瑞吉,等. 基于迁移深度强化学习的低轨卫星跳波束资源分配方案[J]. 电子与信息学报, 2023,45(2):407–417. (CHEN Qianbin, MA Shiqing, DUAN Ruiji, et al. A novel beam hopping resource allocation scheme of low earth orbit satellite based on transfer deep reinforcement learning[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2023,45(2):407–417.) doi:10.11999/JEIT211457.
- [11] European Telecommunications Standards Institute, European Broadcasting Union. Digital Video Broadcasting(DVB) second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications part 1:DVB–S2:ETSI EN 302 307–1 V1.4.1[S]. 2014.
- [12] European Telecommunications Standards Institute, European Broadcasting Union. Digital video broadcasting(DVB) second generation framing structure, channel coding and modulation systems for broadcasting, interactive services, news gathering and other broadband satellite applications part 2:DVB–S2 extension:ETSI EN 302 307–2 V1.2.1[S]. 2020.
- [13] European Radiocommunication Association, European Broadcasting Union. Digital Video Broadcasting(DVB):interaction channel for satellite distribution systems:ETSI EN 301 790 V1.5.1[S]. 2009.
- [14] European Telecommunications Standards Institute. Digital Video Broadcasting(DVB) second generation DVB interactive satellite system(DVB–RCS2) part 2:lower layers for satellite standard:ETSI EN 301 545–2[S]. 2017.
- [15] 唐璟宇,李广侠,边东明,等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019,43(5):21–26. (TANG Jingyu, LI Guangxia, BIAN Dongming, et al. Review on resource allocation for beam–hopping satellite[J]. Mobile Communication, 2019,43(5):21–26.) doi:10.3969/j.issn.1006–1010.2019.05.004.
- [16] PARK J M, SAVAGAONKAR E, EDWIN K P, et al. Allocation of QoS connections in MF–TDMA satellite systems:a two–phase approach[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2004,54(1):177–190. doi:10.1109/TVT.2004.838836.
- [17] JOHNSON D S. Near–optimal bin packing algorithms[D]. Massachusetts:Institute of Technology, 1973.
- [18] 李斗,姬冰辉,王峰,等. 基于混沌预测的宽带 DVB–RCS 卫星接入信道动态分配方案研究[J]. 电子与信息学报, 2008,30(3): 607–611. (LI Dou, JI Binghui, WANG Feng, et al. The dynamic allocation of broadband DVB–RCS satellite access channel based on chaotic prediction[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2008,30(3):607–611.)
- [19] 徐晓燕,栾西,任术波,等. 基于 TDD 模式的 CDMA 卫星通信传输方案研究[C]// 2010 年通信理论与信号处理学术年会. 北京: 清华出版社, 2010:139–145. (XU Xiaoyan, LUAN Xi, REN Shubo, et al. Research on transmission scheme of CDMA satellite communications system based on time division duplexing[C]// 2010 Communication Theory and Signal Processing Annual Conference. Beijing:Peking University Press, 2010:139–145.)
- [20] 程诚. 一种适用于卫星通信 TDMA 体制的混合双工传输方法[J]. 现代导航, 2019,10(6):450–453. (CHENG Cheng. Mixed duplex transmission method based on satellite communication TDMA[J]. Modern Navigation, 2019,10(6):450–453.) doi:10.3969/j.issn.1674–7976.2019.06.015.
- [21] PORTILLOA I D, CAMERON B G, CRAWLEY C E F, et al. Telesat、One Web 及 SpaceX 三个全球宽带低轨卫星星座系统的技术对比[J]. 卫星与网络, 2019(7):48–61. (PORTILLOA I D, CAMERON B G, CRAWLEY C E F, et al. Technical comparison of Telesat, One Web and SpaceX global wideband low–orbit satellite constellation systems[J]. Satellite & Network, 2019(7): 48–61.)

作者简介:

邹安银(2000–), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信. email:1221014240@njupt.edu.cn.

张晨(1985–), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为天地一体化网络、卫星资源分配.

张更新(1967–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天地一体化网络、卫星物联网.