

基于用户分组的低轨卫星动态跳波束算法

舒 晴¹, 李维彪¹, 金作霖¹, 郑 重¹, 张永波², 费泽松¹

(1. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081;

2. 延安大学物理与电子信息学院, 陕西 延安 716000)

摘 要: 在部署了大规模 MIMO 的卫星通信系统中, 当用户数量远超卫星的波束数时, 即便增加射频链的数量, 即增加同时服务用户的数量, 仍然难以满足卫星通信系统的时延要求。针对以上问题, 提出一种基于用户分组的动态跳波束方案, 根据用户组进行通信服务覆盖。所提方法利用信道角域分布的稀疏性, 根据用户能量最大的波束方向自适应划分用户分组。由于卫星上功率限制使得射频链数量受限, 且增加同时服务的用户组会增加用户组间的干扰, 因此共信道用户组的数量受到功率和干扰约束, 限制了通信业务服务时延减小。于是进一步提出波束簇分组的跳波束方案, 此时波束簇通过增加同一时刻服务用户的数量, 来减小用户的时延。由于以上问题是非凸的, 采用数据驱动的行列式点过程方法简化跳波束方案中的波束调度。仿真结果表明, 基于用户分组的动态跳波束算法能够有效减小用户的平均时延, 与单波束方案相比, 平均时延减少超过 52%。同时在仿真结果中也验证了行列式点过程模型的泛用性。

关键词: 低轨卫星; 跳波束技术; 资源分配; 行列式点过程

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023037

Dynamic Beam Hopping Algorithm for LEO Satellite Systems Based on User Grouping

SHU Qing¹, LI Weibiao¹, JIN Zuolin¹, ZHENG Zhong¹, ZHANG Yongbo², FEI Zesong¹

1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

2. School of Physics and Electronic Information, Yan'an University, Yan'an 716000, China

Abstract: In a satellite communication system deployed with massive MIMO, when the number of users far exceeds the number of beams of the satellite, it is still difficult to satisfy the delay requirements of the satellite communication system even if the number of RF chains is increased, i.e., the number of concurrently serving users is increased. To address the above problems, it proposed a dynamic beam hopping (BH) scheme based on user grouping for communication service coverage. The proposed method utilized the sparsity of the angular domain channel distribution to adaptively divide user groups accorded to the beam direction where the user energy is maximum. The number of co-channel user groups was constrained by power and interference constraints, limiting the reduction of communication traffic delay, as power limitations on the satellite make the number of RF chains limited and increased the number of simultaneously served user groups increased the interference between user groups. So the BH scheme with beam cluster grouping was further proposed, when the beam clusters reduced the user delay by increased the number of users served at the same moment. Since the above problem was non-convex, it adopt a data-driven determinantal point process (DPP) learning method to simplify the beam scheduling in BH scheme. Simulation results showed that the dynamic BH algorithm based on user grouping could effectively reduce the average user delay by more than 52% compared with the single-beam scheme, also verifies the versatility of the DPP learning.

Keywords: LEO satellite, beam-hopping technology, resource allocation, determinantal point process learning

收稿日期: 2023-06-03; 修回日期: 2023-11-01

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No.2020YFB1806900); 北京理工大学研究生院博士生论坛 (No.2023BSLT004)

Foundation Items: National Key Research and Development Program of China (No. 2020YFB1806900), Doctoral Forum of Graduate School of BIT (No. 2023BSLT004)

0 引言

随着移动通信技术的快速发展,星地融合通信网络的概念应时而生,旨在将卫星和地面通信网络更加紧密地连接^[1],预计 6G 移动通信网络将实现无所不在的覆盖和随时随地的超广域宽带接入^[2]。低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星通信作为地面通信的有力补充,势必在 6G 中发挥重要作用。与其他高轨卫星相比,低轨卫星的信号传播距离更短、通信质量更好、部署成本更低,通过低轨卫星组网可以实现不受地域限制的全球覆盖,然而随着覆盖面积的增加,地面业务需求的分布往往并不均匀。此时,如何灵活分配有限的星上资源以提供高质量通信服务成为新的挑战。

跳波束 (Beam Hopping, BH) 技术可以为卫星通信系统提供额外的灵活性,使其能够根据空间、地理及时间变化的需求调整稀缺的卫星资源的分配。这一技术的主要思想是将卫星的总覆盖区域预设为多个小区,同一时刻仅面向覆盖范围内的单个或多个小区提供服务^[3]。通过控制星载多波束天线的空间方位、带宽、频率和发射功率,将更多的资源分配给业务需求高的小区,提高通信系统资源利用率^[4]。参考文献[5]将机器学习的方法与跳波束技术结合,通过机器学习的方法学习跳波束图案,实现了联合优化系统吞吐量和时延公平性的目的。参考文献[6]提出了基于簇的跳波束方案,其中簇被定义为一组同时被照亮的相邻光束,设定波束簇间同时服务的最小间距以降低波束簇间干扰,但簇中波束为固定数量,没有考虑到覆盖范围内用户分布不均匀的情况。参考文献[7]考虑了跳波束与预编码联合算法,在优化的过程中提出了基于波束簇池的优化方法,降低了簇间干扰。参考文献[8]同样为降低波束簇间干扰的影响,在优化跳波束图案时采用了一种启发式算法动态分配时隙资源。参考文献[9]提出了一种非固定波束簇动态跳波束方案,根据不同时间分片内用户需求分布调整波束簇大小及照亮位置,但并未考虑到轨道高度及传输过程带来的系统时延。综上,如何在低轨卫星跳波束技术中灵活地利用非固定波束簇实现多用户服务同时最大限度地降低用户服务时延方面,目前的参考文献有限,在优化问题、优化方法选择上仍需进一步展开研究。

行列式点过程 (Determinantal Point Process, DPP) 是一种概率测量方法,其通过核矩阵建立元素之间相似性的综合度量,模拟子集中的负相关性并量化子集的多样性,具有从大型数据集中选择不同数据实例的强大能

力^[10]。考虑到 DPP 算法可以充分利用用户间干扰带来的互斥性,可以在跳波束中同时选择一组干扰最小的用户。针对实际场景,本文提出了一种基于用户分组的动态跳波束算法,通过使用行列式点过程方法,有效实现了多用户场景下的用户服务,并达到了最小化系统时延的目标。

1 系统模型及问题描述

1.1 跳波束系统模型

考虑 Ka 频段低轨卫星通信系统的下行链路,低轨卫星上安装了两种不同的天线:一种为固定天线,用于接收上行指令;另一种是具有 $M=M_x \times M_y$ 个天线元件的均匀平面阵列 (Uniform Planar Array, UPA),如图 1 所示,其垂直和水平方向上各排列 M_y 和 M_x 副天线。卫星直接与 N 个地面用户通信,其中地面用户可以表示为 $\mathcal{N}=\{n|n=1,2,\dots,N\}$,并配备有高增益全向单天线。在用户数较多时,为了减小用户的时延,增加同一时刻服务用户的数量,本文采用一组数目不定的相邻波束组成波束簇进行服务。将一个波束簇服务的所有用户划为一个用户组,对应一个射频 (Radio Frequency, RF) 链路,共有 $K_{\text{RF}} (K_{\text{RF}} \ll N)$ 个 RF 链。跳波束系统中同一时刻可服务 $K (K \leq K_{\text{RF}})$ 个用户组, K 个用户组或波束簇可以表示为 $\mathcal{K}=\{k|k=1,2,\dots,K\}$ 。不失一般性,在后续的讨论中若无特殊说明均考虑 $K=K_{\text{RF}}$ 。

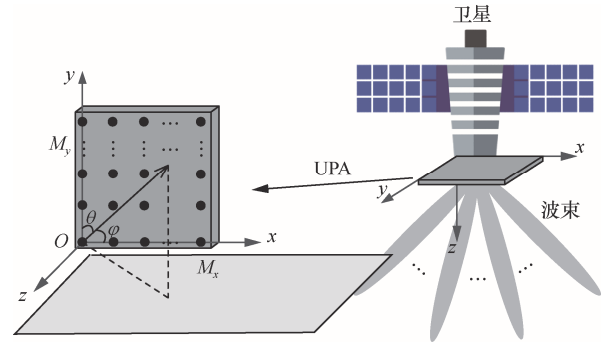


图 1 低轨卫星通信系统示意

由于不同的分组会直接影响用户被服务的情况,因此,为了指示用户是否被服务,采用指示最小用户分组情况即单个波束的二进制矩阵来表示,具体形式如下

$$\mathbf{B}_t = [\mathbf{b}_t^1, \dots, \mathbf{b}_t^q, \dots, \mathbf{b}_t^{M_y}] \quad (1)$$

其中, $\mathbf{b}_t^q = [b_t^{1,q}, \dots, b_t^{p,q}, \dots, b_t^{M_x, M_y}]^T$, $b_t^{p,q} \in \{0,1\}$, $b_t^{p,q} = 1$ 时表示在时隙 t 时第 (p,q) 个波束被点亮, $p \in \{1,2,\dots,M_x\}$,

$q \in \{1, 2, \dots, M_y\}$; $b_t^{p,q} = 0$ 时表示相反。由于使用波束簇进行服务, 因此同时被点亮的波束数量限制为: $K_{\text{RF}} \leq \sum_{p=1}^{M_x} \sum_{q=1}^{M_y} b_t^{p,q} < M$, 即同时点亮的波束数量大于或等于 RF 链的数量, 也表示此时一个 RF 链对应多个波束。

当一个波束簇内的总用户数过多时, 为了方便调度, 本文将每个波束簇内的用户重新表示为

$$X_t^{p,q} = [x_t^{n_{p,q}} | n_{p,q} \in \mathcal{N}_{p,q}, x_t^{n_{p,q}} \in \{0, 1\}] \quad (2)$$

其中, $\mathcal{N}_{p,q}$ 表示波束 (p, q) 内用户的集合, 则 $n_{p,q} \in \mathcal{N}_{p,q}$ 表示为第 (p, q) 个波束内的用户的索引。当 $x_t^{n_{p,q}} = 1$ 时表示在时隙 t 时第 (p, q) 个波束被点亮, 即位于此波束内的用户 $n_{p,q}$ 被服务; 当 $b_t^{p,q} = 1$ 且 $x_t^{n_{p,q}} = 0$ 时, 表示在时隙 t 时第 (p, q) 个波束被点亮, 但是位于此波束内的用户 $n_{p,q}$ 没有被服务。若不特殊说明, 后文仅考虑当波束点亮时位于波束内的所有用户全部被服务的情况。

不同的波束簇间采用全频复用模式。不同波束簇间采用平均功率分配, 每个波束簇的功率为 $P = P_{\text{tot}} / K$, 其中 K 为波束簇即同时服务的用户组的数量, 也等于射频链的数量。当一个用户组被多个波束组成的波束簇服务时, 波束间功率将根据角域信道中波束能量、波束内总的业务需求量以及波束内总的用户时延分配, 具体分配方案将由角域混合预编码确定。

对于低轨卫星下行链路, 传播环境中存在有限的散射, 因此入射路径的数量将非常少, 且传播测量结果表明, 在卫星通信中, 绝大多数能量从直接路径到达接收机^[11]。同时, 10 GHz 以上的固定卫星通信系统已被证实仅在视距 (LOS) 下工作^[12]。因此, 在 Ka 频段卫星-无人机通信链路中, LOS 路径占主导地位, 而其他非视距 (NLOS) 路径通常可以忽略。因此, 第 n 个用户的信道矩阵 $\mathbf{H}_n \in \mathbb{C}^{M_x \times M_y}$ 可以表示为

$$\mathbf{H}_n = \mathbf{g}_n \mathbf{e}_y(\Omega_n^y) \mathbf{e}_x^T(\Omega_n^x) \quad (3)$$

其中, $\mathbf{g}_n$ 是卫星 UPA 天线和第 n 个用户之间的 LOS 路径的增益, $\mathbf{e}_y$ 和 $\mathbf{e}_x$ 分别表示垂直转向矢量和水平转向矢量。 $\Omega_n^y = \Delta \cos(\phi_n)$, $\Omega_n^x = \Delta \cos(\varphi_n)$, 其中, $\phi_n \in [0, \pi)$ 和 $\varphi_n \in [0, \pi)$ 分别是俯仰角和水平角, Δ 代表两个相邻天线元件之间的距离与载波波长的比值, 本文考虑典型的半波长间隔天线阵列, 即 $\Delta = 1/2$ 。

将空间信道矩阵 $\mathbf{H}_n$ 转换成角度域形式为

$$\tilde{\mathbf{H}}_n = \mathbf{g}_n [\mathbf{U}_y^H \mathbf{e}_y(\Omega_n^y)] [\mathbf{U}_x^H \mathbf{e}_x(\Omega_n^x)]^T = \mathbf{U}_y^H \mathbf{H}_n \mathbf{U}_x^* \quad (4)$$

其中, $\tilde{\mathbf{H}}_n$ 表示第 n 个用户的角域信道矩阵, $\mathbf{U}_y$ 和 $\mathbf{U}_x$ 是

离散傅立叶变换 (DFT) 矩阵。将 $\mathbf{H}_n$ 和 $\tilde{\mathbf{H}}_n$ 重新表示成 M 维向量的形式为

$$\mathbf{h}_n = \mathbf{g}_n \mathbf{e}_y(\Omega_n^y) \otimes \mathbf{e}_x(\Omega_n^x) \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{h}}_n = \mathbf{U}^H \mathbf{h}_n \quad (6)$$

其中, $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\mathbf{U} = \mathbf{U}_y \otimes \mathbf{U}_x$ 是酉矩阵。

分组跳波束算法在计算业务需求时需要同时考虑同组所有用户的业务需求, 由于根据所在波束划分用户组, 且存在不同波束组合成波束簇的情况, 因此随着卫星和用户的移动以及每个时刻波束选择的差异, 用户分组情况并不固定。为了方便统计, 本文将时隙 t 时第 (p, q) 个波束内所有用户的业务需求记为 $D_t^{p,q}$, 计算式为

$$D_t^{p,q} = \sum_{n_{p,q} \in \mathcal{N}_{p,q}} d_t^{n_{p,q}} \quad (7)$$

其中, $d_t^{n_{p,q}}$ 表示位于 (p, q) 波束内的用户在时隙 t 时存储在队列 n 中的总业务需求, 为了便于统计不同时间到达数据的等待时长, 将其扩展表示为

$$d_t^{n_{p,q}} = \{\phi_{t,l}^{n_{p,q}}, \dots, \phi_{t,l}^{n_{p,q}}, \dots, \phi_{t,l}^{n_{p,q}}\} \quad (8)$$

其中, $\phi_{t,l}^{n_{p,q}}$ 表示等待 $t-l$ 个时隙的业务需求。考虑队列 n 是用户在所有用户中的固定索引, 所以不会因所在波束或用户组不同而改变。

1.2 问题描述

在分组跳波束算法中, 本文使用系统吞吐量和用户时延公平性作为衡量系统性能的重要指标。对于系统吞吐量, 可以具体考虑系统中的剩余业务需求量以反映总的变化; 对于用户时延公平性, 可以具体考虑用户的平均时延、最大时延以及系统时延系数。此时, 用户组的业务需求以及组内用户的总时延将是关注的重点, 本文使用组内用户的总加权时延来衡量波束簇的质量。波束 (p, q) 内所有用户在时隙 t 时的总加权时延 $\varphi_t^{p,q}$ 可以表示为

$$\varphi_t^{p,q} = \sum_{n_{p,q} \in \mathcal{N}_{p,q}} \sum_{l=1}^t (t-l) \beta \phi_{t,l}^{n_{p,q}} \quad (9)$$

其中, $\phi_{t,l}^{n_{p,q}}$ 表示在时隙 t 时位于波束 (p, q) 内用户等待了 $t-l$ 个时隙的业务需求。

同时, 为了方便波束簇内波束的选择, 本文引入波束内所有用户的总时延 $\Phi_t^{p,q}$, 表示在时隙 t 时波束内单位业务需求等待的总时长

$$\Phi_t^{p,q} = \sum_{n_{p,q} \in \mathcal{N}_{p,q}} \sum_{l=1}^t (t-l) \phi_{t,l}^{n_{p,q}} \quad (10)$$

其中, $\Phi_t^{p,q}$ 表示单个波束 (p, q) 内所有用户的总时延, 表示 $\varphi_t^{p,q}$ 在权重系数 $\beta = 1$ 时的特殊情况。

由于用户以用户组的形式调度,因此优化问题的变量为被服务波束簇,且服务波束簇 C_g 中的波束选择将与 DPP 质量模型结合。根据上述对基于用户分组动态跳波束系统的分析,可以得到以下优化问题

$$\begin{aligned}
 \min_{C_g} P &= \sum_{t=1}^T \varphi_t = \sum_{t=1}^T \sum_{n \in \mathcal{N}} \sum_{l=1}^L (t-l)^\beta \phi_{t,l}^n \\
 \text{s.t. C1: } &\sum_{p=1}^{M_x} \sum_{q=1}^{M_y} P_{p,q} \leq P_{\text{tot}} \\
 \text{C2: } &\sum_{i \in C_g} \left[\left[p'_{C_g, \text{RF}} \right]_i \right] = 1 \\
 \text{C3: } &K_{\text{RF}} \leq \sum_{p=1}^{M_x} \sum_{q=1}^{M_y} b_t^{p,q} < M
 \end{aligned} \tag{11}$$

在上述优化问题中, C1 限制了波束的总功率,即所有波束的功率和不能超过卫星最大功率限制,实际应用中只有少数波束处于工作状态,由于不同波束簇间采用平均功率分配,因此可以满足约束条件 C1。C2 限制了 RF 预编码的模长,用户分组的角域混合预编码方案将在下文分析。C3 限制了同时工作的波束的数量,由于一个 RF 链可以服务多个波束,因此总波束的数量将大于或等于 RF 链数量,且所有的波束不会同时工作,以免产生过大的用户间干扰,具体的波束选择方案也将在下文中详细分析。

2 基于用户分组的动态跳波束算法设计

2.1 用户分组与波束选择方案

考虑到角域信道的稀疏性和卫星轨道高度较高,卫星与地面用户的俯仰角和水平角全部集中在角域信道 (ϕ_n, φ_n) 空间的中心区域,导致角域信道中不在俯仰角和水平角范围内的波束是不存在用户主波束的,因此按照波束得到的用户组要少于总的波束数。

为了方便区分,本文将用户能量最大波束所在的波束称为初始波束,初始波束数为 $G (G < M)$, 这些波束可以表示为 $\mathcal{G} = \{(p_g, q_g) | g \in \{1, \dots, M\}\}$, 其中 (p_g, q_g) 为波束 g 的仰角与方位角索引,且 $|\mathcal{G}| = G$ 。当 G 较大且 RF 链数量受限时,要想通过跳波束服务所有用户必然带来较大的时延,用户间时延公平性也将受到较大的影响。因为跳波束方案中用户组被服务的平均时间间隔接近周期跳波束的服务间隔,当 $G \gg K_{\text{RF}}$ 时,周期跳波束的服务间隔 G/K_{RF} 也会很大。因此,在用户分组中将加入波束选择以减小用户组被服务的平均时间间隔。

下面分析波束选择的具体方案:由于将一个波束簇作

为一组,且同一个波束簇使用相同的频带资源,为了减小波束簇之间的干扰,波束簇内的波束位置最好是相邻的。最简单的方法是在波束选择时,先从初始波束中选择一个初始波束 g ,再从剩余初始波束中选择与 g 相邻的波束组成波束簇。为了表示这些波束首先使用波束坐标 (p, q) 定位初始波束的具体位置,其中初始波束 g 对应的位置坐标为 (p_g, q_g) 。将波束 g 和选择的与其相邻的波束记为 $\mathcal{B}_g = \{(p_g, q_g), (p_{g_i}, q_{g_i}) | (p_g, q_g), (p_{g_i}, q_{g_i}) \in \mathcal{G}\}$, 其中 (p_{g_i}, q_{g_i}) 为所有初始波束中与波束 g 相邻波束的索引。位于同一波束簇内的波束需满足以下限制

$$\begin{cases} |p_{g_i} - p_g| + |q_{g_i} - q_g| = 1 \\ |p_{g_i} - p_g| + |q_{g_i} - q_g| = M_x - 1, p_g \in \{1, M_x\} \\ |p_{g_i} - p_g| + |q_{g_i} - q_g| = M_y - 1, q_g \in \{1, M_y\} \end{cases} \tag{12}$$

式 (12) 表示所选波束与初始波束 g 在水平方向或垂直方向是相邻的,如图 2(a)所示。若天线数较大或者 RF 链的数量较少,可以在第一轮选择后将第一轮选择的波束 g 作为初始波束,继续执行第二轮波束选择,如图 2(b)所示。初始波束 g 与其相邻的备选波束集合记为 $\mathcal{B}_g$, 表示以 g 为初始波束的波束簇的可选波束范围。波束簇的数量与初始波束的数量是相同的,这就意味着不同波束簇之间可能存在重叠,可以通过 DPP 算法的多样性矩阵构建不同波束簇之间的排斥性模型,从而避免选择重叠的波束簇。

在引入初始波束的概念后,根据式(9),可以将单个初始波束内所有用户的加权时延和 $\varphi_t^{p,q}$ 重新表示为

$$\varphi_t^g = \sum_{n_g \in \mathcal{N}_g} \sum_{l=1}^L (t-l)^\beta \phi_{t,l}^{n_g} \tag{13}$$

根据式(10),可以将波束内所有用户的总时延 $\Phi_t^{p,q}$ 重新表示为

$$\Phi_t^g = \sum_{n_g \in \mathcal{N}_g} \sum_{l=1}^L (t-l) \phi_{t,l}^{n_g} \tag{14}$$

其中, n_g 表示位于初始波束 g 中的用户的索引, $\mathcal{N}_g$ 表示位于初始波束 g 中的所有用户索引的集合,且 $\mathcal{N}_g \subseteq \mathcal{N}$ 。

在确定可选波束范围后,将可选波束内用户的总时延 $\Phi_t^{p,q}$ 的大小作为依据,依次选择总时延最大的相邻波束组成波束簇,且波束簇内所有波束的总时延和小于 Φ_{max} 。若 $\mathcal{B}_g$ 只有一个元素,表示波束 g 没有相邻波束,此时波束簇中只有一个波束。若所有相邻波束的总时延和仍然小于 Φ_{max} ,则不再继续选择将所有相邻波束组成波束簇。将波

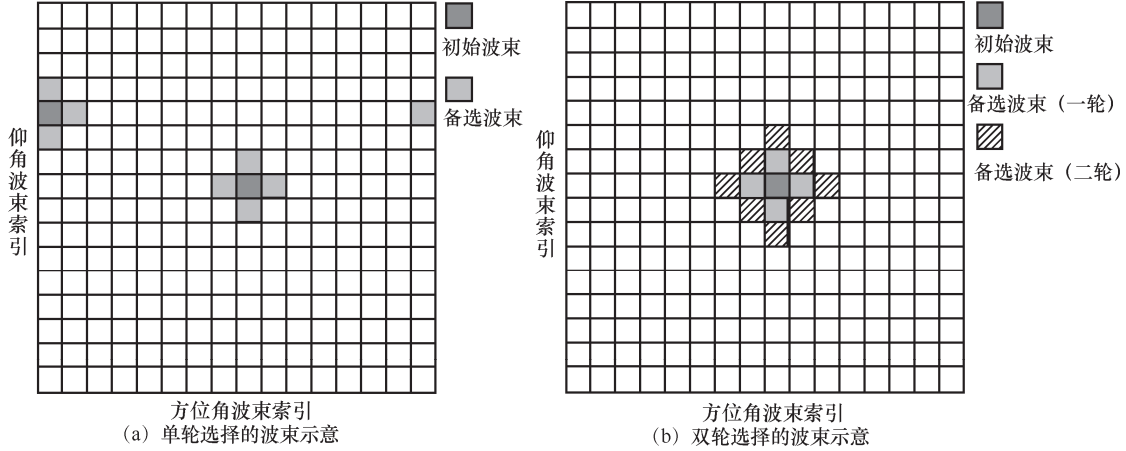


图2 分组波束选择示意

束选择的结果即波束簇记为 $\mathcal{C}_g$ ，表示以初始波束 g 为中心的波束簇中波束的集合。算法1展示了用户分组与波束选择算法的具体流程。

算法1：用户分组与波束选择算法

输入：角域信道 $\tilde{\mathbf{H}}_n$

初始化：备选波束 $\mathcal{G} = \emptyset$ ；相邻波束 $\mathcal{B} = \emptyset$ ；波束簇 $\mathcal{C} = \emptyset$

Begin:

- 1) 步骤一：确定备选波束
- 2) for $n = 1$ to N do
- 3) 从 $\tilde{\mathbf{H}}_n$ 中选择能量最大的波束，其索引为 (p_g, q_g)
- 4) 若 $(p_g, q_g) \notin \mathcal{G}$ ，则 $\mathcal{G} = \mathcal{G} \cup \{(p_g, q_g)\}$
- 5) end for
- 6) 步骤二：确定相邻波束
- 7) for $(p_g, q_g) \in \mathcal{G}$ do
- 8) 初始化每个初始波束的相邻波束 $\mathcal{B}_g = \emptyset$
- 9) 根据式(13)确定每个初始波束的备选波束
- 10) $\mathcal{B} = \mathcal{B} \cup \mathcal{B}_g$
- 11) End for
- 12) 步骤三：确定波束簇
- 13) for $(p_g, q_g) \in \mathcal{G}$ do
- 14) 初始化波束簇 $\mathcal{C}_g = \emptyset$
- 15) $\mathcal{C}_g = \mathcal{C}_g \cup \{(p_g, q_g)\}$
- 16) $\mathcal{B}_g = \mathcal{B}_g - \{(p_g, q_g)\}$
- 17) 将剩余波束按照 Φ_g^g 从大到小排序，记为 $\mathcal{B}_g'$
- 18) for $(p_{g_i}, q_{g_i}) \in \mathcal{B}_g'$ do

19) 若 $\Phi_g^g + \Phi_g^{g_i} \leq \Phi_{\max}$

20) 令 $\Phi_g^g = \Phi_g^g + \Phi_g^{g_i}$ ， $\mathcal{C}_g = \mathcal{C}_g \cup \{(p_{g_i}, q_{g_i})\}$

21) end for

22) $\mathcal{C} = \mathcal{C} \cup \mathcal{C}_g$

23) end for

End

输出： $\mathcal{C}$

由于角域信道的 RF 预编码反映了波束的选择情况，因此用户分组与波束选择方案确定后 RF 预编码便确定了，对于用户组内的所有用户使用相同的预编码^[12]，可以得到用户组的 RF 预编码为

$$\left[\left[P_{\mathcal{C}_g, \text{RF}}' \right]_i \right] = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{|\mathcal{C}_g|}}, & i \in \mathcal{C}_g \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

其中， $\mathcal{C}_g$ 表示用户组所在的波束簇内的波束集合， $|\mathcal{C}_g|$ 表示 $\mathcal{C}_g$ 中选择波束的个数。

对于基带预编码器 $\mathbf{P}_{t, \text{BB}} \in \mathbb{C}^{K_{\text{RF}} \times K}$ 选择最大比传输 (Maximum Ratio Transmission, MRT) 预编码算法。在 MRT 算法中只根据信道确定预编码矩阵，下行链路中 MRT 预编码矩阵等效于通信系统中的匹配滤波器。在大规模天线系统中的 MRT 算法处理性能很大程度上取决于信道传输环境，理想的环境是从基站到不同用户终端的信道要尽可能相互独立，而在采用虚拟域均匀采样方法得到的角域信道中，不同波束间是相互独立的。MRT 预编码的表达式为

$$\mathbf{W}_{t, g} = \left(\sum_{g \in \mathcal{C}_g} \sum_{n_g \in \mathcal{N}_g} \tilde{\mathbf{h}}_{t, n_g} \right)^H \quad (16)$$

其中, $\sum_{g \in C_g} \sum_{n_g \in N_g} \tilde{\mathbf{h}}_{t,n_g}$ 表示波束簇内所有用户角域信道的和。于是可以得到

$$\mathbf{P}_{t,\text{BB}} = \mathbf{p}'_{C_g,\text{RF}} \tilde{\mathbf{h}}_t \quad (17)$$

MRT 算法的本质是最大化用户的信噪比, 即最大化用户的可达速率。虽然 MRT 预编码不会考虑对其他用户造成的干扰, 但是采用 DPP 算法可以最大限度地减轻用户间干扰, 使得在保证系统吞吐量的同时, 还可以降低算法的复杂度。

2.2 构造质量多样性模型

DPP 中通过构造核矩阵 $\mathbf{L}$ 可以建立元素之间相似性的综合度量, 模拟子集中的负相关性并量化子集的多样性。由于实际应用中很难对核矩阵 $\mathbf{L}$ 进行直接构造, 因此本文采用 DPP 质量多样性分解过程, 具体地, 在联合用户分组的 DPP 跳波束算法中构建核矩阵 $\mathbf{L}$, 需要构建质量度量函数 $g(\mathbf{A} | X)$ 和多样性矩阵 $\mathbf{S}(X)$ 。对于质量度量, 使用经典的对数线性模型表示为

$$g(\mathbf{a}_i | X) = \exp(\theta^T f(\mathbf{a}_i | X)) \quad (17)$$

其中, $f(\cdot)$ 指定了第 i 个用户组的向量 $\mathbf{a}_i$ 的 m 个特征值, 其中 $\mathbf{a}_i$ 表示第 i 个用户组的向量, $\mathbf{a}_i \in \mathbb{C}^{m \times 1}$ 。

用户分组的跳波束算法中的质量度量 $g(\mathbf{a}_i | X)$ 需要考虑不同用户组或波束簇之间的质量差异。经过上述分析, 波束簇的质量主要与波束簇内波束的能量和、波束簇内所有用户的业务需求总量以及波束簇所有用户的总加权时延和等有关, 考虑到模型的复杂程度以及与质量模型的相关性, 采用波束簇内波束的能量和以及所有用户的总加权时延和 $\phi_{t,\beta}^g$ 描述质量度量, 具体的展开形式如下

$$g(\mathbf{a}_g | X) = \exp\left(\theta_1 \sum_{g \in C_g} \sum_{n_g \in N_g} \left| \mathbf{p}_{C_g,\text{RF}}^H \tilde{\mathbf{h}}_{t,n_g} \right| + \theta_2 \sum_{g \in C_g} \phi_t^g\right) \quad (18)$$

其中, $\mathbf{p}_{C_g,\text{RF}}^H$ 表示以波束 g 为初始波束的波束簇的 RF 预编码向量, $\tilde{\mathbf{h}}_{t,n_g}$ 表示在时隙 t 时位于波束 g 中的用户 n_g 的角域信道向量, ϕ_t^g 表示在时隙 t 时位于波束 g 中所有用户的总加权时延和, θ_1 和 θ_2 为加权系数。

对于质量度量模型仅使用信道质量即角域信道中波束的能量, 以及用户的总加权时延和来创建模型。由于加权系数更多的是一种经验参数, 可以根据整个系统的吞吐量和用户间时延公平性的权衡选择合适的数值, 这样就将质量度量的参数数量降至两个, 这不仅降低了参数学习时的收敛难度和速度, 还降低了算法的复杂度, 提高了系统

的运算速度。因为相比于计算平均时延, 计算用户的总加权时延和要更简单, 且无须额外计算用户的总业务需求。仿真结果也证明了使用用户的总加权时延和的有效性, 总加权时延既包含用户的业务需求, 也包含用户的时延和加权系数, 相比业务需求与平均时延的线性和, 能够更准确地反映用户或用户组的质量。

考虑高斯核 $S_{i,j}(X) = e^{-\|\mathbf{a}_i - \mathbf{a}_j\|^2 / \sigma^2}$ 创建多样性模型, 使用用户间的信干比 (SIR) 能够更好地反映系统全局的排斥性, 得到更好的系统吞吐量性能。但是用户组间的信干比计算较为复杂, 在载荷和功率都严重受限的低轨通信卫星上, 其带来的计算复杂度的增加将更加难以接受。因此忽略预编码矩阵带来的影响, 仅考虑用户组间角域信道的差异, 角域信道重合越多即差值越小, 则表明用户组间的干扰越大, 重合越少则表明干扰越小, 若无重合则表示两用户组间没有干扰。多样性矩阵的具体形式如下

$$S_{i,j}(X) = e^{-\frac{\|\bar{\mathbf{h}}_{ij} - \bar{\mathbf{h}}_{\max}\|^2}{\sigma^2}} \quad (19)$$

其中, $\bar{\mathbf{h}}_{ij} = \frac{|\bar{\mathbf{h}}_{t,g_i} - \bar{\mathbf{h}}_{t,g_j}|^2}{\|\bar{\mathbf{h}}_{t,g_i}\| \|\bar{\mathbf{h}}_{t,g_j}\|}$ 表示两个用户组之间角域信道中

波束能量和之间的差异。 $\bar{\mathbf{h}}_{t,g_i} = \sum_{g_i \in C_{g_i}} \sum_{n_{g_i} \in N_{g_i}} \mathbf{p}_{C_{g_i},\text{RF}}^H \tilde{\mathbf{h}}_{t,n_{g_i}}$, $\bar{\mathbf{h}}_{t,g_j} = \sum_{g_j \in C_{g_j}} \sum_{n_{g_j} \in N_{g_j}} \mathbf{p}_{C_{g_j},\text{RF}}^H \tilde{\mathbf{h}}_{t,n_{g_j}}$ 。

最后, 得到核矩阵 $\mathbf{L}$ 为

$$\mathbf{L}(X) = g(\mathbf{A} | X) \mathbf{S}(X) g(\mathbf{A} | X) \quad (20)$$

其中, $\mathbf{A} = [\mathbf{a}_1, \dots, \mathbf{a}_g]^T$, $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 。得到核矩阵 $\mathbf{L}$ 后, 使用算法 2 所示的最大概率抽样算法对 DPP 进行随机抽样。

算法 2: 最大概率抽样算法

输入: 核矩阵 $\mathbf{L}$, 服务波束数量 K

$(\mathbf{V}, \mathbf{D}) \leftarrow$ 特征分解 ($\mathbf{L}$)

$\mathbf{V} \leftarrow$ 从 $\mathbf{V}$ 中选择 $\mathbf{D}$ 中最大的 K 个特征值对应的特征向量

$\mathbf{A} \leftarrow \emptyset$

1) while $|\mathbf{V}| > 0$ do

2) 选择 $\arg \max_{i \in [1, N]} \left\{ \frac{1}{|\mathbf{V}|} \sum_{v \in \mathbf{V}} (v^T \mathbf{e}_i)^2 \right\}$

3) $\mathbf{A} \leftarrow \mathbf{A} \cup i$

4) $\mathbf{V} \leftarrow \mathbf{V}_\perp$, 正交于 $\mathbf{e}_i$ 的 $\mathbf{V}$ 子空间的正交基 0

5) end while

输出： A

算法2中， V 和 D 是核矩阵 L 的特征向量和特征值，向量 e_i 与 L 的特征向量具有相同的基数，其在第 i 个位置上的元素为1，在其他位置上的元素均为0。该算法首先计算矩阵 L 的特征值和特征向量，然后在特征值中选择 K 个最大特征值对应的 K 个特征向量。在while循环中，将按照最大概率选择。选择一个索引后，将 V 更新为与 e_i 正交的 V 子空间的正交基，这使得与所选元素相似的元素被选择的概率较低，即考虑了用户组间的干扰。该算法倾向于从所有小区中选择存储在队列中的流量 d_n' 较大且之间干扰较小的小区，同时以一定概率对其他小区进行采样。

3 仿真分析

针对低轨卫星跳波束场景下的仿真参数见表1，低轨卫星参数值使用3GPP中规定的Ka频段LEO卫星下行链路传输的参考参数。

表1 跳波束场景仿真参数

仿真参数	数值
卫星类型	LEO 卫星
轨道高度/km	600
载波频率/GHz	30
系统带宽/MHz	1 000
卫星最大功率/dBW	33
射频链数量/个	12
用户数量/个	300/200/100
发射天线数/副	16×16
发射天线最大增益/dBi	38.5
接收天线温度/K	150
噪声系数/dB	1.2
仿真时隙数/个	181

图3展示了用户的业务需求分布，其中图3(a)是不同用户的总业务需求，图中仅展示了前30个用户的总业务需求量；图3(b)是不同用户总业务需求的累计分布图。使用正态分布模拟不同用户在不同时隙的业务需求，随着用户数的增加通过降低每个时隙新增业务量的上限，限制系统整体的业务需求。

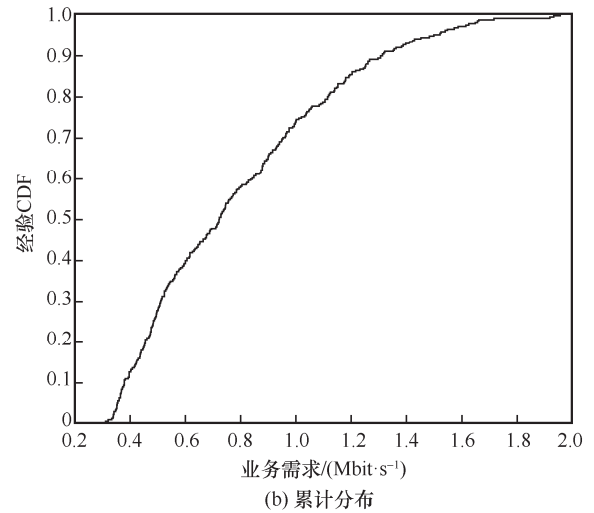
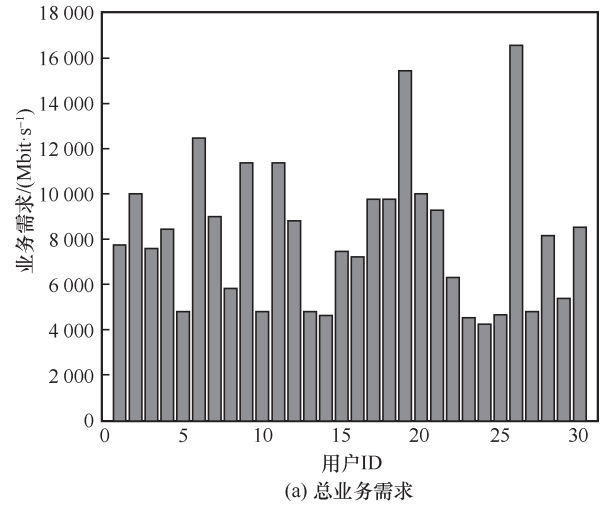
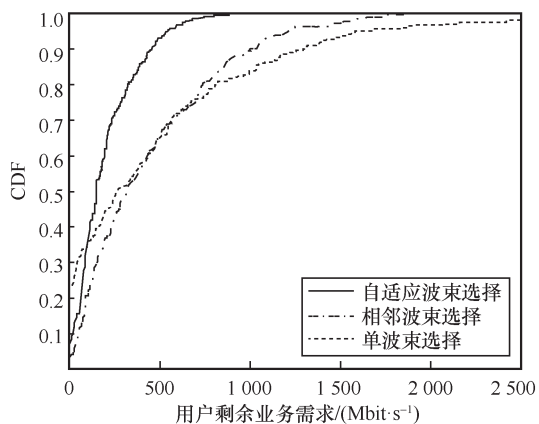


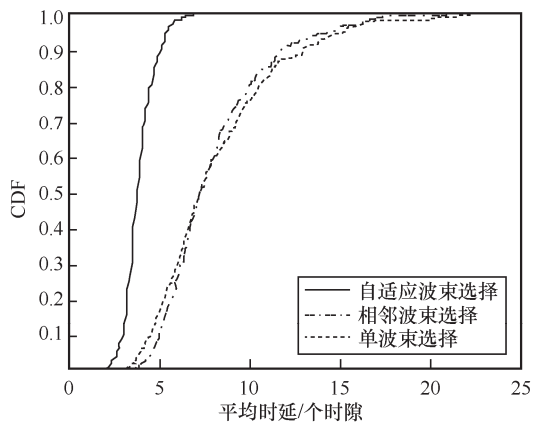
图3 不同用户的业务需求

图4展示了波束簇与单波束用户分组的性能比较。本文介绍了一种自适应选择波束簇的方案，根据单波束组内的所有用户的总业务需求确定是否从相邻波束中选择其他波束组成波束簇。而相邻波束选择方案是将集合 B_g' 内所有波束和初始波束作为波束簇，将整个波束簇内的所有用户作为一组用户，而单波束选择方案是将单个波束内的用户作为一组用户。从仿真结果中可以看出，所提出的方案在系统吞吐量上有明显优势，相邻波束选择和单波束选择方案存在着明显差距；用户的平均时延显示了同样的结论，与单波束选择方案相比，自适应波束选择方案平均时延减少超过52%；而在最大时延方面单波束有着明显的劣势，所提出的方案同样是最优的。这主要是因为相邻波束选择了过多的波束，导致了性能下降；单波束选择则因为单个波束内的业务需求小于自适应波束，所以

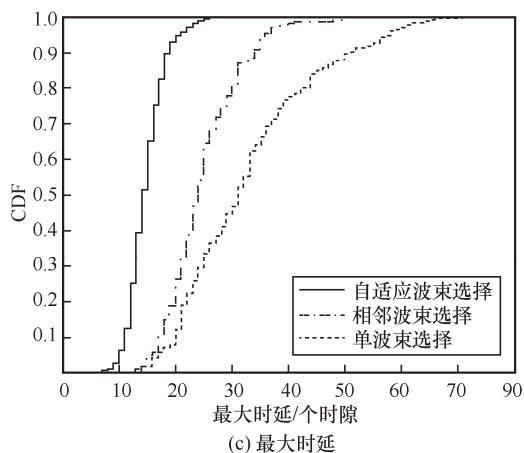
信道容量明显大于业务需求,进而导致系统吞吐量的下降。同时因为增加了需要调度的用户组数,所以带来了无法避免的时延增加。



(a) 剩余业务需求



(b) 平均时延

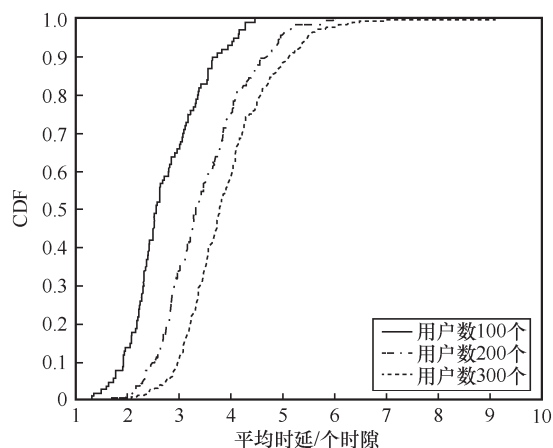


(c) 最大时延

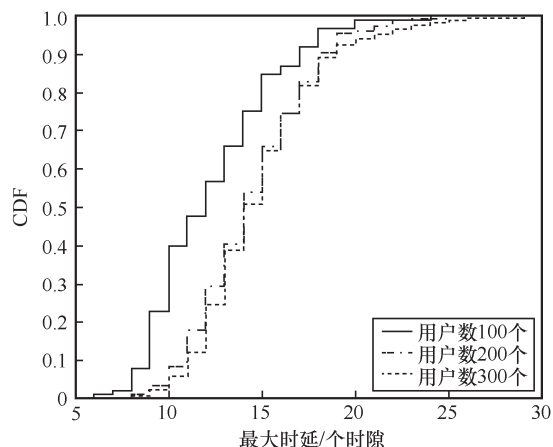
图 4 波束簇与单波束用户分组的性能比较

图 5 展示了不同用户数的性能比较。通过仿真结果可以看出,平均时延会随着用户数的增加而增加,但是增加的幅度在降低,而最大时延随着用户数增加差距明显变

小,用户数 200 个与 300 个的差距很小。这表明在用户的业务需求不超出信道容量的前提下,所提出的方法能够有效地控制用户间时延公平性。



(a) 平均时延



(b) 最大时延

图 5 不同用户数的性能比较

4 结束语

本文研究了大规模 MIMO 技术应用于低轨卫星通信系统中的跳波束方案。针对低轨卫星通信系统中用户数量远多于 RF 链数量的场景,提出了一种基于用户分组的低轨卫星动态跳波束算法。为了更有效地降低用户的时延,本文使用波束簇服务一组用户,组内的所有用户使用相同的预编码矩阵。本文提出了一种基于角域信道及业务需求的相邻波束选择方案,通过自适应地确定波束簇的大小,控制单组用户的数量,达到用户分组的目的。仿真结果表明,与单波束用户分组方案相比,所提出的波束簇用户分组方案平均时延减少超过 52%,且用户数量发生变化时,在相同的参数下所提出的动态跳波束算法均能有效控制用户的时延。

参考文献:

- [1] 刘哲铭, 吴云飞, 魏肖, 等. 6G 星地融合网络应用场景、架构与关键技术挑战[J]. 无线电通信技术, 2022, 48(6): 1058-1064.
LIU Z M, WU Y F, WEI X, et al. 6G satellite-terrestrial convergence network on application scenarios, architecture and key technical challenges[J]. Radio Communications Technology, 2022, 48(6): 1058-1064.
- [2] FANG X R, FENG W, WEI T, et al. 5G embraces satellites for 6G ubiquitous IoT: basic models for integrated satellite terrestrial networks[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(18): 14399-14417.
- [3] TANG J Y, BIAN D M, LI G X, et al. Optimization method of dynamic beam position for LEO beam-hopping satellite communication systems[J]. IEEE Access, 2021, 9: 57578-57588.
- [4] WANG L, ZHANG C, QU D X, et al. Resource allocation for beam-hopping user downlinks in multi-beam satellite system[C]//Proceedings of 2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Piscataway: IEEE Press, 2019: 925-929.
- [5] LIN Z Y, NI Z Y, KUANG L L, et al. Dynamic beam pattern and bandwidth allocation based on multi-agent deep reinforcement learning for beam hopping satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(4): 3917-3930.
- [6] KIBRIA M G, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Precoded cluster hopping in multi-beam high throughput satellite systems[C]//Proceedings of 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [7] ZHANG C, ZHAO X D, ZHANG G X. Joint precoding schemes for flexible resource allocation in high throughput satellite systems based on beam hopping[J]. China Communications, 2021, 18(9): 48-61.
- [8] 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 Y X, BIAN D M, HU J, et al. Optimization method for full bandwidth beam hopping pattern based on clustering[J]. Computer Engineering, 2020, 46(4): 169-176.
- [9] CHEN L, LAGUNAS E, LEI L, et al. Adaptive resource allocation for satellite illumination pattern design[C]//Proceedings of 2022 IEEE 96th Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [10] LIU J, WU Z Y, LI F X. Ranking video segments with LSTM and determinantal point processes[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 2369-2373.
- [11] JIANG Y Y, FOTI S J, SAMBELL A, et al. A low profile radiating element with nearly hemispheric coverage for satellite communications on-the-move hybrid array antenna[C]//Proceedings of 2010 7th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP 2010). Piscataway: IEEE Press, 2010: 123-127.
- [12] ITU-R. Propagation data and prediction methods required for earth-space telecommunication systems[S]. 1995.
- [13] LI K X, YOU L, WANG J H, et al. Downlink transmit design for massive MIMO LEO satellite communications[J]. IEEE Transactions on Communications, 2022, 70(2): 1014-1028.
- [14] COCCO G, DE COLA T, ANGELONE M, et al. Radio resource management optimization of flexible satellite payloads for DVB-S2 systems[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2018, 64(2): 266-280.
- [15] LEI L, LAGUNAS E, YUAN Y X, et al. Beam illumination pattern design in satellite networks: learning and optimization for efficient beam hopping[J]. IEEE Access, 2020, 8: 136655-136667.
- [16] JOROUGH V, LAGUNAS E, ANDRENACCI S, et al. Deploying joint beam hopping and precoding in multibeam satellite networks with time variant traffic[C]//Proceedings of 2018 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (Global SIP). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1081-1085.
- [17] PANTHI S, BREYNAERT D, MCLAIN C, et al. Beam hopping - a flexible satellite communication system for mobility[C]//Proceedings of 35th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston: AIAA, 2017.
- [18] ANZALCHI J, COUCHMAN A, GABELLINI P, et al. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system simulation and performance comparison with non-hopped systems[C]//Proceedings of 2010 5th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 11th Signal Processing for Space Communications Workshop. Piscataway: IEEE Press, 2010: 248-255.
- [19] ANGELETTI P, FERNANDEZ PRIM D, RINALDO R. Beam hopping in multi-beam broadband satellite systems: system performance and payload architecture analysis[C]//Proceedings of 24th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Reston: AIAA, 2006: 5376.
- [20] LIU H Y, YANG Z M, CAO Z G. Max-Min rate control on traffic in broadband multibeam satellite communications systems[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(7): 1396-1399.
- [21] DENG B Y, JIANG C X, YAO H P, et al. The next generation heterogeneous satellite communication networks: integration of resource management and deep reinforcement learning[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(2): 105-111.
- [22] JOROUGH V, VÁZQUEZ M Á, PÉREZ-NEIRA A I. Precoding in multi gateway multibeam satellite systems[J]. IEEE Transactions

on Wireless Communications, 2016, 15(7): 4944-4956.

- [23] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [24] KULESZA A, TASKAR B. Learning determinantal point processes[EB]. 2012.
- [25] SRIVASTAVA N K, CHATURVEDI A K. Flexible and dynamic power allocation in broadband multi-beam satellites[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(9): 1722-1725.
- [26] ZHANG Y D, YIN L G, JIANG C X, et al. Joint beam forming design and resource allocation for terrestrial-satellite cooperation system[J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 68(2): 778-791.

[作者简介]



舒晴(1997-),女,北京理工大学硕士生,主要研究方向为低轨卫星通信。



李维彪(1995-),男,北京理工大学硕士生,主要研究方向为低轨卫星通信。



金作霖(1999-),男,北京理工大学博士生,主要研究方向为无线通信。



郑重(1984-),男,博士,北京理工大学信息与电子学院特别研究员、博士生导师,主要研究方向为多天线通信技术、智能反射表面和随机矩阵理论。



张永波(1980-),男,硕士,延安大学物理与电子信息学院讲师,主要研究方向为移动通信中的多天线技术。



费泽松(1977-),男,博士,北京理工大学信息与电子学院教授、博士生导师,主要研究方向为信道编码、5G/6G移动通信关键技术、雷达通信一体化、低轨卫星接入与组网、MIMO等。