



综述

星地融合网络中的干扰管理与频谱共享： 研究进展、关键技术及未来挑战

朱剑锋，孙耀华，冯昕澳，彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室，北京 100876)

摘 要：由于低轨卫星网络具有覆盖范围广、建设成本低的优势，利用低轨卫星对现有陆地移动通信网络进行覆盖补充并构建星地融合网络，是实现未来全球泛在连接通信愿景的可行方案。然而，由于低频段频谱资源有限且卫星波束干扰范围广，高效的星地频谱共享与干扰管理策略是星地融合网络的核心。为此，首先从星地融合网络中不同干扰场景入手，阐述了研究进展、挑战及现有方案的优势及劣势。随后，针对现有研究的不足之处，提出创新的干扰管理与频谱共享解决方案，并通过仿真验证所提方案的有效性。最后，对未来潜在的研究方向进行展望，以期对低复杂度的星地融合网络管理提供启发性思路。

关键词：星地融合网络；干扰管理；频谱共享

中图分类号：TN927.2

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025038

Interference management and spectrum sharing in integrated satellite-terrestrial networks: progress, key technologies and future directions

ZHU Jianfeng, SUN Yaohua, FENG Xin'ao, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of
Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Due to the advantages in coverage and cost-effectiveness, low earth orbit satellites can provide supplemental coverage for terrestrial networks. Therefore, integrated satellite-terrestrial networks have emerged as a promising solution to achieve ubiquitous global connectivity. However, facing the challenges caused by the scarcity of spectrum resources and complex interference, effective interference management and spectrum sharing were the critical aspects

收稿日期：2024-10-17；修回日期：2025-01-24

通信作者：孙耀华，sunyaohua@bupt.edu.cn

基金项目：国家重点研发计划项目（No.2022YFB2902600）；国家自然科学基金资助项目（No.62371071）；中国通信学会青年人才托举项目（No.2021QNRC001）

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902600), The National Natural Science Foundation of China (No.62371071), Young Elite Scientist Sponsorship Program by China Institute of Communications (No.2021QNRC001)

of integrated satellite-terrestrial networks. Firstly, recent research progress and a comprehensive exploration of challenges for different interference scenarios were introduced. Then, to overcome the shortage of existing research, several potential and innovative technical solutions were presented, whose performance was verified by simulations. Finally, several potential future technical directions were discussed for integrated satellite-terrestrial networks.

Key words: integrated satellite-terrestrial network, interference management, spectrum sharing

0 引言

由于地面基站覆盖范围受限, 当前地面移动通信网络仅能覆盖 20% 左右的地球表面区域, 且对海洋、沙漠、极地、森林等偏远区域的覆盖严重缺失。与地面移动通信网络相比, 低轨卫星通信网络具有覆盖范围广、建设成本低和不受地面自然灾害影响的优势, 能在地面通信设施缺失的场景中提供有效的覆盖补充^[1-3]。因此, 将低轨卫星与地面网络融合构建星地融合网络, 利用低轨卫星网络增强和扩展现有地面网络服务, 实现全域覆盖和泛在连接的愿景已成为当前的研究热点^[4]。

为提供全球无缝覆盖和高速通信服务, 国内外提出了众多低轨卫星星座计划, 包括 Starlink、OneWeb、Telesat 和国网星座等。同时, 学术界和工业界对手机直连卫星技术开展了大量的研究, 并取得显著成果。2019 年 12 月, 第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 针对非地面网络场景提出为相邻小区分配不同频率或极化复用的波束管理策略以避免同频干扰^[5]; 2022 年 6 月, 3GPP 在 5G Release 17 标准中为具有高精度定位能力的用户提出时频预补偿和时序调整等一系列的技术标准改进方案, 支持手机在无基站中继的情况下直接与卫星通信; 2022 年 9 月, 华为、苹果等公司先后推出支持卫星短消息业务的手机终端, 实现窄带手机直连卫星通信; 2023 年 4 月, AST 公司通过蓝行者 3 号卫星为存量手机终端提供宽带通信服务; 2023 年 12 月, 3GPP 发布 TR38.863, 对星地频谱共享中

的邻频干扰场景和相应的网络及终端射频要求进行分析讨论^[6]; 2024 年 12 月, SpaceX 已完成部署约 330 颗支持手机直连功能的卫星, 实现第一轨道层的组网服务。然而, 受限于终端的天线能力, 低轨卫星仅能利用低频的频谱资源为手机用户提供服务。考虑低频段中卫星频段可用资源少, 且存在已部署的卫星系统以及潜在的星内和星间波束间同频干扰问题, 卫星频段难以满足大规模用户接入的需求^[7]。此外, 由于卫星单波束可同时干扰大量地面基站, 且地面运营商频段已有大量用户使用频谱资源, 频谱协调难度大。因此, 对于星地融合网络而言, 高效的干扰管理与频谱共享方案是支持广域范围内大规模用户宽带服务的基础。针对上述问题, 大量研究者对星地融合网络中的干扰场景展开研究, 提出一系列的干扰管理和频谱共享方案, 例如跳波束规划、功率控制、预编码、空域隔离、频率反转和动态频谱共享等。

尽管已有部分综述文献^[8-10]对星地融合网络中关键技术及挑战进行总结, 但它们关注的范围较广, 包括同步、接入、切换、波束管理和天基计算等内容, 对干扰管理和频谱共享的技术细节讨论较少。同时, 文献[11]重点关注星地融合网络中的干扰管理策略, 详细阐述了已有研究方法, 但缺乏对星地链路典型特征的深入分析, 无法准确评估现有方案的不足之处。针对现有研究不足, 本文首先详细分析了星地融合网络中的典型特征, 并将星地融合网络中的干扰场景归纳为 3 种: 星内波束间干扰、星间波束间干扰以及星地间干扰。随后, 对 3 种



场景中存在的挑战进行分析, 总结现有研究的进展与不足之处。接着, 针对现有研究的不足提出创新性的解决方案和仿真分析结果。最后, 为支持星地融合网络干扰管理与频谱共享方案的实际部署需求, 提出潜在的技术挑战和研究方向, 希望能对未来高效管理星地融合网络提供启发。

1 星地融合网络典型特征

本节将从星地融合网络架构出发, 介绍网络中星地链路、地面通信链路和不同信号与业务需求的典型特征, 并进一步讨论网络中影响干扰管理与频谱共享的挑战。星地融合网络典型特征及其对干扰管理与频谱共享的影响见表1。

1.1 星地融合网络架构

星地融合网络架构如图1所示, 星地融合网络设备包括信关站、卫星、地面基站、星地干扰协调网元以及用户终端。卫星分布在多个不同轨道高度的平面内, 且搭载具有高定向能力的反射面天线或相控阵天线, 形成多个宽波束和窄波束, 为地面网络提供补充覆盖服务^[1]。其中, 宽波束保障网络基本的覆盖、用户接入和控制信令广播的功能, 而窄波束提供高速率传输服务。用户首先通过宽波束接入卫星, 随后卫星评估星地间干扰水平, 并仅在低干扰情况下使用窄波束服务用户。地面基站覆盖范围受限, 典型的城区宏基站覆盖半径约几百米, 郊区或农村的宏基站覆盖半径小于10 km。由于卫星波束覆盖半径可达

表1 星地融合网络典型特征及其对干扰管理与频谱共享的影响

特征分类	特征类型	影响
星地链路特征	多普勒频偏明显	对邻频的卫星波束或地面链路造成干扰
	星间切换频繁	多星服务地理区域邻近的小区, 使得纯分布式的管理策略难以保证干扰水平及频谱共享方案的可靠性
	传播时延差异大	引发时域上的异步干扰
	小区远近效应不明显	波束对覆盖范围内所有基站的干扰水平近似相等
地面链路特征	波束投影形变	波束干扰范围扩散, 加剧网络内干扰
	多普勒频偏低	可近似忽略地面终端运动引发的同频干扰
	小区远近效应明显	地面小区中心和小区路损差可达20 dB以上
	传播时延差异小	地面网络可忽略时域异步干扰影响
信道与业务需求特征	基本的卫星同步、控制、接入业务	对信干噪比要求低, 业务对地面用户干扰影响小
	卫星高速传输业务	对信干噪比要求高, 业务对地面用户干扰影响大

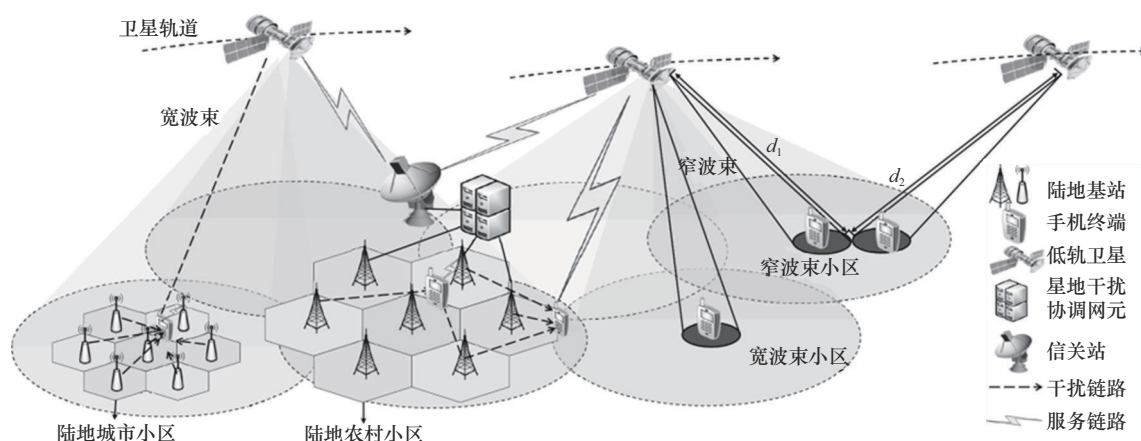


图1 星地融合网络架构

几千米,波束覆盖区域将与大量的陆地基站小区重叠,并可能造成强烈的同频干扰。为此,星地干扰协调网元将统计陆地网络中各基站的位置和工作频率等信息,并传输相应的信息至地面信关站和卫星,以支持制定合理的星地间干扰避免和频谱共享决策^[12]。

1.2 星地链路特征

由于低轨卫星分布在不同的轨道平面且高速运动,星地链路传输面临着多普勒频偏明显、星间切换频繁、传播时延差异大、小区远近效应不明显和波束投影形变等挑战,具体细节如下。

(1) 多普勒频偏明显:受低轨卫星约 7 km/s 的快速运动影响,星地链路间存在较大的多普勒频偏。根据 3GPP TR38.811 所述,当卫星轨道高度 600 km 且载波频率为 2 GHz 时,用户最大多普勒频偏可达 4 MHz^[13]。此时,卫星将对邻频的星地或地面链路造成较强的同频干扰。

(2) 星间切换频繁:由于卫星快速运动和小小区业务的空时分布不均,用户需在卫星间频繁切换。此时,可能存在多颗卫星同时服务地理区域邻近的小区的现象,使得纯分布式的卫星波束管理策略难以满足波束间干扰约束。

(3) 传播时延差异大:受卫星轨道高度和星地链路通信仰角差异的影响,当不同卫星服务相邻小区时,星地链路的传播时延差可达到毫秒级。例如,在图 1 中星地链路距离 $d_2 > d_1$,此时两颗卫星同时发送的信号将异步到达地面。根据现有 5G 协议,当子载波为 30 kHz 时,一个时隙的持续时间仅为 0.5 ms。参考 Starlink 星座架构^[14],当用户与卫星最小通信仰角为 35° 时,最大传播时延差可达 4 ms。此时,差异化的传播时延将引发较强的波束时域异步干扰。

(4) 小区远近效应不明显:由于卫星轨道高度高,在直射径条件下小区内用户至卫星的路损差异较小。根据 3GPP TR38.811 直射径信道模型,当小区半径为 43 km、卫星载波频率 2 GHz

时,小区内用户星地链路的路损最大差异仅 0.35 dB。

(5) 波束投影形变:受卫星较高的轨道高度和地球曲率影响,随着波束指向远离星下点,波束的 3 dB 区域在地球表面的投影将发生形变^[15]。当波束半功率角度为 6°、小区至卫星的仰角为 30° 时,波束 3 dB 投影的覆盖半径是星下点场景的 3.6 倍。此时,波束的 3 dB 区域在地面的投影扩散至目标服务小区的非邻接小区,导致严重的波束间空域干扰。

1.3 地面链路特征

与星地链路典型特征截然相反,陆地基站至用户终端的通信链路存在多普勒频偏低、小区远近效应明显和用户间传播时延差异小等特点,具体如下。

(1) 多普勒频偏低:由于地面基站固定不动且用户运动速度远低于低轨卫星,地面通信链路多普勒频偏显著低于星地链路。

(2) 小区远近效应明显:受地形和建筑等因素影响,小区中心用户和边缘用户至基站的路损差可超过 20 dB。

(3) 用户间传播时延差异小:由于基站覆盖半径小,小区内用户间传播时延差小于循环前缀的长度。当基站同步精度较高时,在陆地网络内可忽略异步干扰问题。

1.4 信道与业务需求特征

当信道传输不同的数据时,由于差异化的链路特征、调制和编码方案,可靠解调数据所需的信干噪比也将不同。根据 3GPP TR38.802,陆地网络对同步信号和下行控制信道解调的最低信干噪比要求分别为 -6 dB 和 -7.73 dB^[16]。当子载波间隔为 15 kHz 时,用户解析卫星同步信号所需的最低信干噪比为 -5 dB^[17]。因此,与窄波束的高速传输业务相反,宽波束承载的同步和低速率通信业务对信干噪比最低要求并不高。



2 星地融合网络典型干扰场景与频谱共享技术挑战

本节将星地融合网络的干扰场景分为星内波束间干扰、星间波束间干扰及星地间干扰，并分别阐述三大典型场景中的干扰来源、现有研究的干扰避免与频谱共享方案，同时根据第1节中的链路特征分析已有方案的优劣性。

2.1 星内波束间干扰管理与频谱共享场景

单星多波束场景如图2所示，目前星内波束干扰管理研究主要关注窄波束场景。考虑小区相对地球表面静止，卫星使用多个窄波束为小区提供高速率传输服务。由于用户分布不均，不同小区所需的卫星服务时长不同。当波束资源有限时，卫星可通过灵活地设计波束在不同时隙的指向，实现小区按需服务并显著提高网络容量^[18-19]，上述方法也被称为跳波束规划。为缓解星地链路中多普勒频偏引发的波束间干扰，网络需根据星历信息和小区坐标，提前计算多普勒频偏值，并在卫星侧执行频偏预补偿操作。同时，由于同一个卫星服务地理区域相邻小区时星地链路传播距离差异较小，波束间异步干扰在单星场景中的影响有限，可以被近似忽略，因此，小区内远近效应不明显和波束投影形变成为影响单星场景干扰管理和频谱共享方案性能的主要挑战。星内干扰管理与频谱共享方案对比见表2^[20-27]。

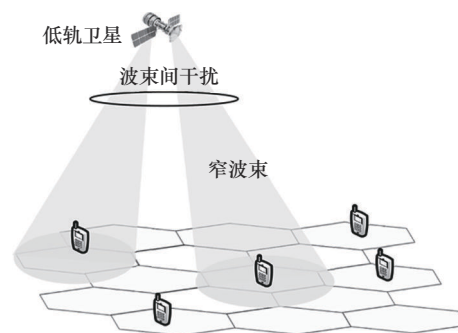


图2 单星多波束场景

针对单星全频率复用场景，Zhang等^[20]结合跳波束设计和功率域的非正交多址技术降低波束间干扰。然而，由于卫星小区内远近效应不明显且单波束覆盖范围广，该方案在大量用户接入时复杂度较高。文献[21]和文献[22]分别利用贪婪算法和匹配理论不断调整波束指向满足小区传输需求，并禁止相邻小区同时获得卫星服务以实现波束间干扰避免。在文献[23]中，卫星首先根据业务需求量将小区动态分簇以维持簇间负载均衡，并为每个簇分配专属的服务波束。随后，在制定波束规划时避免簇间邻接的小区同时获得服务。鉴于传统波束规划算法的复杂性，Hu等^[24]采用基于深度强化学习的波束调度算法实现低复杂度的波束调度与干扰避免，并提高网络吞吐量。

尽管以上方案通过仿真验证了所提星内波束间干扰管理和频谱共享算法可获得较高的频谱效率，但它们均忽视了波束投影形变的影响，且简

表2 星内干扰管理与频谱共享方案对比

主要技术手段	文献	文献总结	不足
通过跳波束规划实现波束间干扰避免	[20]	结合跳波束设计和非正交多址技术，实现全频率复用	忽视异步干扰的影响，且复杂度高
	[21]	采用贪婪算法，避免相邻小区同时获得卫星服务	忽视波束形变与异步干扰的影响
	[22]	基于匹配理论避免相邻小区同时获得卫星服务	忽视波束形变与异步干扰的影响
	[23]	采用小区分簇策略，且避免同时服务簇间邻接的小区	忽视波束形变与异步干扰的影响
	[24]	利用深度强化学习设计波束调度策略	忽视波束形变与异步干扰的影响
采用实际的天线模型	[25]	利用实际的反射面天线模型计算波束间干扰强度，并评估波束调度决策是否支持波束间频谱共享	忽视异步干扰的影响，且无法充分利用波束资源
波束图样设计	[26]	控制反射面天线的波束宽度以实现波束间干扰避免	忽视异步干扰的影响，且采用二维平面模型，无法反映真实场景
	[27]	在同步卫星的观察角度域平面内采用椭圆拟合小区投影形状，并根据拟合结果设计相应的波束图样	忽视异步干扰的影响，且无法适配时变姿态的低轨卫星场景

单地假设波束间干扰仅存在于地理区域相邻的小区之间。受波束投影形变的影响,在较低的星地链路仰角的场景中波束将干扰服务小区的非相邻小区,使得上述方案性能下降。为精确评估星内波束间干扰强度,文献[25]根据反射面天线模型,通过计算当前波束调度决策下潜在的干扰信号强度,以评估是否支持波束间频谱共享。然而,当网络可用波束数目充裕时,受波束空域干扰范围扩散的影响,采用固定波束宽度的波束间干扰管理与频谱共享方案难以充分利用波束资源。为抑制波束投影形变,Takahashi等^[26]采用反射面天线模型,通过控制波束宽度实现波束间干扰避免与频谱共享。尽管该方案可缓解波束投影形变的问题,但忽略了地球曲率的影响。在文献[27]中,研究者在三维空间中通过坐标变换将小区投影至同步卫星的观察平面的角度域内,并在角度域内采用椭圆图样拟合小区投影形状。当卫星小区为正六边形且位于星下点时,小区在卫星角度域内投影近似呈现为矩形。此时,文献[27]的方案将波束能量分散在目标小区外,从而加剧了波束间干扰。

2.2 星间干扰管理与频谱共享场景

星间多波束场景如图3所示,与单星场景类似,星间波束干扰管理与频谱共享研究同样重点关注于窄波束场景,且面临着波束投影形变、多普勒频偏大和小区远近效应不明显的挑战。同时,小区业务空时分布不均、卫星在不同高度和倾角的轨道平面上高速运动,使得用户频繁星间切换且相邻小区可能由不同的卫星服务。此时,由于小区至不同卫星的星地链路传播时延不同,星间干扰管理与频谱共享场景需考虑波束间异步干扰的影响。星间干扰管理与频谱共享方案对比见表3,具体如下所述。

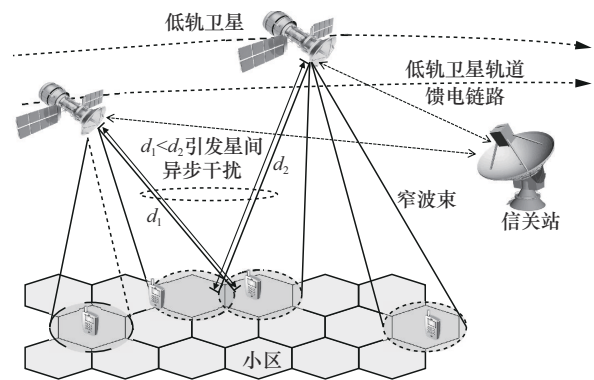


图3 星间多波束场景

表3 星间干扰管理与频谱共享方案对比

主要技术手段	文献	文献总结	不足
禁止波束同时服务相邻小区	[28]	集中式地协调多星波束规划以避免同时服务相邻小区	忽视波束形变与异步干扰的影响
	[29]	采用多智能体强化学习策略,通过引入惩罚项以降低波束间同频干扰的概率	忽视波束形变与异步干扰的影响,且难以保证波束间频谱共享的性能
关闭波束	[30]	根据卫星当前姿态、天线模型及指向,预测星间干扰强度。当干扰超过阈值时,关闭相应波束	可用波束数量减少,网络容量下降
功率分配	[31]	灵活调整波束指向,并根据卫星天线模型分配波束功率,避免较强的星内和星间干扰	忽视异步干扰的影响
	[32]	采用基于粒子群的启发式算法设计波束指向和功率分配决策,匹配差异化业务的传输需求	忽视异步干扰的影响
	[33]	结合匹配交换算法和贪婪算法,优化多星多波束调度和功率分配决策,避免波束投影重叠干扰	忽视异步干扰的影响
	[34]	基于概率分析提出高效的波束调度方法满足小区服务需求,并通过控制波束功率实现干扰避免	忽视异步干扰的影响
采用更实际的天线模型	[35]	基于图论设计多星联合的波束调度方法,通过计算收发天线的离轴角预估波束间干扰强度,避免强波束间干扰	忽视异步干扰的影响
时延预补偿策略	[12]	网络侧根据指定的波束规划图样执行时延预补偿,使得多星多波束信号到达地面时可实现波束规划图样效果	无法在制定波束决策时评估异步干扰的影响,使得网络容量下降



在文献[28]中,研究者首先评估单星内不同波束指向规划方案的性能,随后采用贪婪算法设计多星联合的波束管理方案,并通过禁止波束服务相邻小区实现星间干扰避免。文献[29]利用多智能体强化学习方法设计分布式的波束调度策略以匹配差异化的小区业务需求,并通过在奖励函数中引入惩罚项以降低波束间干扰强度。然而,以上方案均假设波束间干扰仅局限于相邻小区间,忽略了波束投影形变的影响。为降低星间干扰,OneWeb星座根据卫星姿态、波束指向和天线模型预测星间干扰强度,并提前关闭将引发强烈星间干扰的波束^[30],但减少激活的波束数目将降低网络容量。Gu等^[31]基于图论理论为小区分配服务卫星,并根据卫星天线模型设计功率分配策略以避免强星内/星间干扰问题,从而最大化网络加权速率和。文献[32]针对两颗卫星场景,采用基于粒子群的启发式算法联合优化波束指向和功率分配决策,满足小区差异化的业务传输需求。文献[33]结合匹配交换算法和贪婪算法,优化多星多波束调度和功率分配决策,避免波束投影重叠干扰以实现星间频谱共享。Chen等^[34]通过概率分析提出高效的波束调度方法匹配差异化的小区服务需求,并控制相邻小区的服务波束的功率以实现干扰避免。文献[35]通过计算收发天线的离轴角预估波束间干扰强度,并在干扰噪声比高于给定阈值时禁止波束调度策略执行。尽管文献[30-35]可实现波束间空域干扰避免,但它们所提方案均建立在一个理想化的前提假设条件下:同一时刻发送卫星信号同时到达不同的地面小区。因此,上述方案在多星场景中无法应对星间异步干扰导致的网络容量下降问题。针对给定跳波束图样后的星间异步干扰问题,文献[12]提出在网络侧实施时延预补偿,从而使得信号同步到达地面。然而,由于该方案采用后补偿的方式,无法解决在波束图样设计时避免出现较长的星间异步干扰,且在切换跳波束图样时的时延补偿开销大。

2.3 星地间干扰管理与频谱共享场景

与星内/星间干扰管理与频谱共享场景类似,卫星通过执行频率预补偿以降低多普勒频偏的影响。同时,由于3GPP TR38.863中对相邻信道间干扰已有充分讨论^[6],本节重点关注于星地同频干扰问题。受波束干扰区域扩散和卫星小区内远近效应不明显的影响,卫星单波束可同时对大量的地面基站和用户造成强烈的同频干扰,且单个基站小区可同时接收来自多个卫星波束的强干扰信号。此外,由于卫星高速运动,星地间干扰态势时变,这对星地融合网络中时频空多维资源的动态管理提出了严峻的挑战^[36]。为解决以上问题,需要设计高效的星地间干扰管理与频谱共享方案以提高频谱效率。现有星地间干扰管理与频谱共享方案如图4所示,星地间干扰管理与频谱共享方案对比见表4。

Zhang等^[25]提出在地面基站与卫星的覆盖区域之间设置保护区,实现星地间干扰空域隔离与频谱共享。在设置保护区的思路指导下,文献[37]利用数据库记录着高优先级的用户位置以及用户所需的保护区半径,并总结了基于数据库的星地频谱共享方案。然而,由于天线模型未知,通常会设置一个较大的保护区半径,使得星地融合网络存在较多的覆盖空洞。文献[38]提出卫星上下行频率反转的方法。其中,卫星下行链路使用地面网络的上行频段,同时卫星上行链路使用地面网络的下行频段。在该场景中,由于卫星用户下行链路的干扰来源为发射功率较低的地面手机用户终端,有效降低了所需的保护区半径大小。然而,由于该方法需要调整手机的基带,无法支持存量手机终端直接接入卫星。

为实现星地无缝覆盖, Lee等^[39]采用时分复用的星地频谱共享方案,并设置卫星波束的边缘用户与波束覆盖范围内的地面基站的中心用户共享频谱资源,以降低星地间同频干扰。类似的,文献[40]也采用时分复用的星地频谱共享方案。

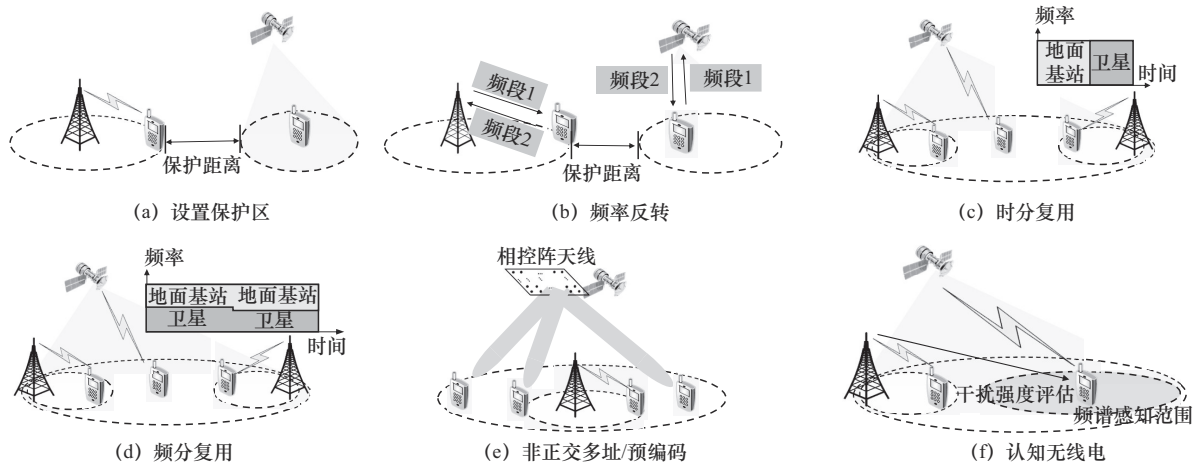


图4 现有星地间干扰管理与频谱共享方案

表4 星地间干扰管理与频谱共享方案对比

主要技术手段	文献	文献总结	不足
空域隔离	[25]	在地面基站与卫星的覆盖区域间设置保护区	无法实现星地无缝覆盖
	[37]	构建保护区数据库, 记录高优先级用户的位置以及它们所需的保护区半径	需设置一个较大的保护区半径, 使得网络覆盖空洞较大
	[38]	采用频率反转策略, 卫星上下行频谱与地面上下行频谱相反, 以降低所需的保护区大小	无法实现星地无缝覆盖, 且不支持存量手机终端
时分复用	[39-40]	采用时分复用的方式支持卫星波束的边缘用户与波束覆盖范围内的地面基站的中心用户共享频谱资源	星地链路传输延时变, 需频繁地进行时序调整, 复杂度较高
频分复用	[41]	参照博弈论的方法, 提出基于拍卖机制的星地频谱共享方案, 最大化网络总传输速率	卫星覆盖范围广, 实际部署复杂度较高
非正交多址技术	[42]	利用速率分割多址接入技术实现用户间的干扰避免, 在保证业务服务质量的前提下最大化网络加权速率和	在广域覆盖多用户场景中实际部署复杂度高
认知无线电技术	[43]	通过感知当前频谱使用情况, 机会式使用空闲频谱资源	接入卫星的用户难以获得波束覆盖范围内的全局频谱使用信息
预编码	[44]	根据用户反馈的信道状态信息, 设计预编码策略, 保证用户服务质量	长传播时延导致信道状态信息过期, 服务用户规模大时复杂度高

然而, 由于星地链路传输延时变, 该方案涉及大量的时序调整, 使得实际部署复杂度高, 同时时分复用策略将显著降低地面网络容量。文献[41]提出基于拍卖机制的星地频谱共享方案, 构造了最大化网络总传输速率的优化问题, 并采用匈牙利算法在卫星和基站小区间动态分配可用子信道资源。Li等^[42]利用速率分割多址接入技术实现用户间的干扰避免, 在保证业务服务质量的前提下最大化网络加权速率和。然而, 由于卫星同时干扰大量用户, 速率分割多址技术的复杂度将随着

网络参与用户数的增加而激增。文献[43]采用认知无线电技术, 通过感知当前频谱使用情况机会式地使用空闲频谱资源, 从而提高星地融合网络的频谱效率。由于卫星波束覆盖范围广且用户频谱感知范围有限, 接入卫星的用户难以准确评估波束覆盖范围内的全局频谱使用信息, 易出现感知错误并造成强烈的星地同频干扰。文献[44]根据用户反馈的信道状态信息设计预编码策略, 在满足各用户服务质量需求的前提下最大化网络容量。然而, 由于星地间往返时延大, 网络通常无



法获得准确的信道状态信息。同时,预编码策略的复杂度将随着用户规模的增加而显著增大,卫星难以在给定干扰约束的条件下快速设计期望的预编码图样。

3 星地融合网络星内/星间干扰避免与频谱共享关键技术

针对星地融合网络中星内和星间干扰场景的典型特征与现有研究面临的挑战,包括波束投影形变引发的空域干扰扩散和星间大差分传播时延导致的时域异步干扰问题,本节进一步梳理潜在的解决方案,提出小区级自适应的波束图样设计方法和异步干扰避免的波束调度策略,并提供相关仿真结果。

3.1 小区级自适应的波束图样设计方法

在高轨同步卫星通信场景中,文献[27]在卫星的角度域观察平面中采用椭圆拟合小区投影形状,从而设计波束图样。尽管初步缓解了波束投影形变引发的空域干扰,但该方案仍存在以下三大不足。

(1) 由于绕地球高速运动,低轨卫星姿态时变且需要频繁地调整卫星的角度域观察平面的坐标系。

(2) 在低仰角情况下,正六边形的小区在卫星角度域观察平面内投影呈扁平状,采用椭圆拟合小区形状可实现较高的精度;然而,随着仰角的增加,小区投影将偏向于矩形。此时,使用椭圆拟合小区投影形状易使波束能量泄露,从而增大波束间干扰,并降低用户服务质量。

(3) 当设计的期望波束图样中峰值增益迅速衰减时,吉布斯效应将使得拟合的波束图样与期望波束图样间存在较大误差,难以保证小区内的3 dB覆盖约束。

针对以上问题,本节进一步改进小区级自适应的波束图样设计方法。具体讲,信关站根据星历信息预测低轨卫星的运动轨迹,且卫星通过姿

态维持机制控制相控阵天线垂直对地。此时,可参照卫星运动方向和相控阵天线的法线方向建立卫星本地的观察坐标系。随后,根据已知的小区边界和内部区域的坐标,通过坐标变换在卫星本地观察坐标系的角度域中投影出小区的相对轮廓。接着,拟合小区投影形状以获得波束的3 dB区域。拟合方法可采用基于距离估计的拟合策略,即寻找到所有距离小区投影区域不超过给定阈值的角度域坐标集合,并将该集合对应的区域视为波束3 dB区域。考虑吉布斯效应将使拟合的波束图样与期望的波束图样间存在偏差,为保证小区边缘用户的服务质量,在波束3 dB区域外设置一个增益较低的过渡区域。最后,根据给定的波束图样,利用现有较成熟的天线权值计算方法,如文献[45]和文献[46]中的方法,快速获得相应的相控阵权值。

所提小区级自适应的波束图样设计结果如图5所示,其中图5(a)为两个相同大小的小区在卫星本地观察坐标系的角度域投影结果,图5(b)为对应生成的天线增益图样。由图5可知,所提方法可实现波束投影与小区间的精准对准。图5(c)为小区内3 dB覆盖约束对比结果,其中两条虚线代表小区边界。可以观察到通过平滑增益的衰减可保证小区内3 dB覆盖约束。所提小区级自适应波束图样设计方法性能结果如图6所示。图6(a)展示了小区内用户在不同波束图样设计下的平均信干噪比。其中,对比方案包括卫星配置固定波束宽度的反射面天线^[25,35]和采用椭圆拟合^[27]、圆形拟合的相控阵波束图样设计方法。在40°仰角的条件下,所提方案与固定波束宽度的方案相比具有约4.1 dB的性能增益,可显著提高信干噪比。同时,椭圆拟合设计和圆形拟合设计在仰角高于60°时性能开始下降,这也与上文分析结果吻合。图6(b)在小区仰角40°的场景下对所提方案在波束间干扰方面的抑制效果开展评估。如图6(b)所示,当波束宽度固定不变时,在非

邻接小区内干扰噪声比有 18% 的概率高于 -3 dB, 而所提方案干扰噪声比高于 -3 dB 的概率低于 3%。因此, 所提方案可有效抑制波束投影形变, 并将波束间干扰约束在服务小区的邻接小区内, 有助于简化干扰管理和频谱共享机制设计。

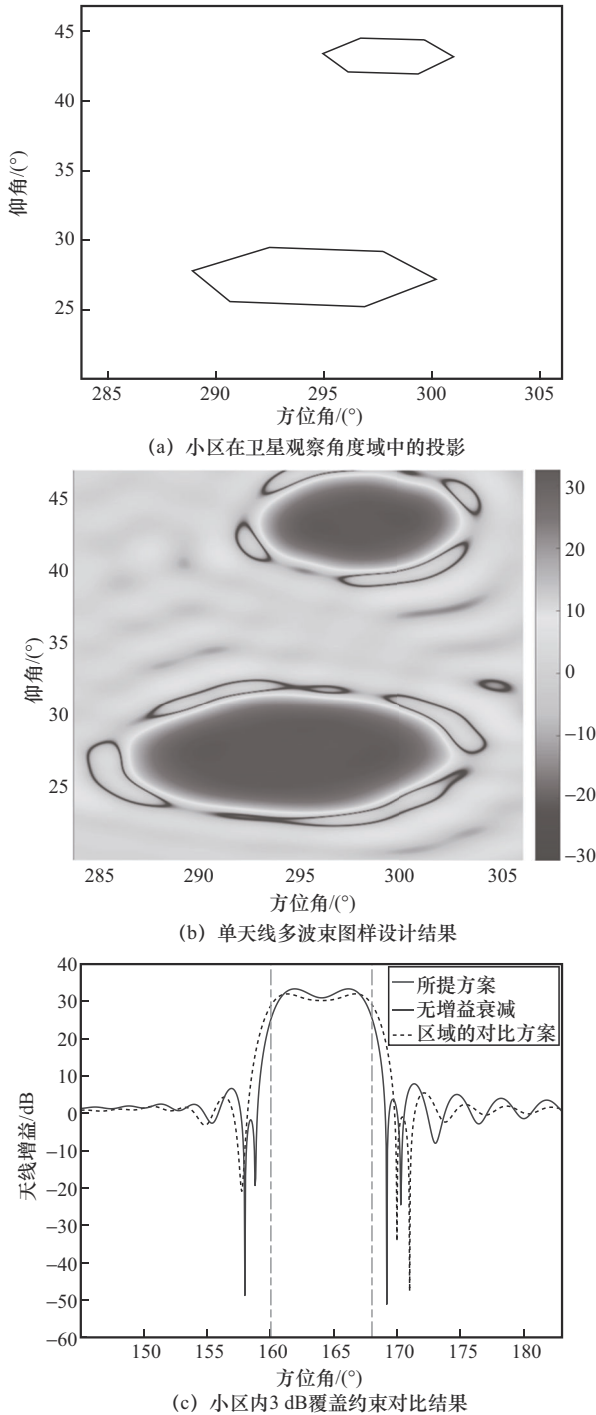


图5 所提小区级自适应波束图样设计结果

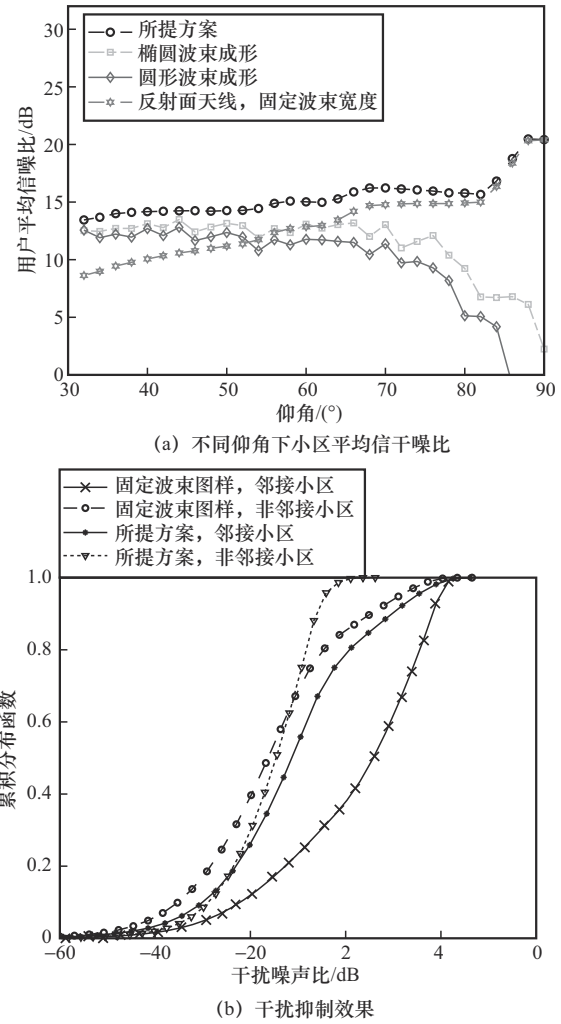


图6 所提小区级自适应波束图样设计方法性能结果

此外, 由于所提方案仅依赖于小区和卫星的相对位置信息, 信关站可提前为每一种可能的小区-卫星间服务关系设计波束图样并计算相应的相控阵天线权值。当波束调度决策制定完成时, 信关站将相应的相控阵权值通过馈电链路发送至低轨卫星, 以降低卫星计算的开销和延迟。

3.2 星间异步干扰避免的波束调度策略

为降低波束异步干扰的影响, 采用设置保护时隙的策略在时域实现干扰隔离, 通过设置保护时隙的异步干扰避免方法如图7所示。当小区的保护时隙持续时间大于其他小区对它的异步干扰时长时, 波束间干扰将被有效消除。同时, 考虑极化隔离和频域隔离可有效缓解波束间干扰, 参考文献[35]中



的方法,通过构造干扰冲突图表征多域波束调度决策间的干扰关系,并基于图论提出联合波束指向控制和保护时隙设计的方法,具体如下所述。

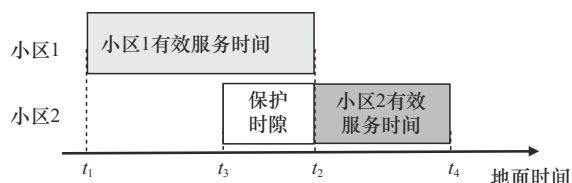


图7 通过设置保护时隙的异步干扰避免方法

(1) 生成干扰冲突图的顶点集合。面向波束间异步干扰场景的冲突图构造如图8所示,每一个顶点唯一对应一个可行的波束调度决策。决策包含服务波束、服务小区、服务时间和保护时隙的时长。例如,在图8中存在两个卫星、两个相邻小区和两种可选的保护时隙长度。当每个卫星只有一个同频波束时,冲突图中总共有8个顶点,且每个顶点均用不同的颜色涂色以表征不同的波束调度决策。

(2) 根据顶点集合生成冲突图的边,采用邻接矩阵表征节点间关系。当且仅当两节点对应的波束调度决策引发强烈的波束间干扰、违背某一约束条件或对应相同时隙的相同小区的决策时,节点间才存在相连的边。例如,节点1和节点2对应同一小

区在同一时隙下的配置方案,此时仅有一个节点有效。因此,节点1和节点2之间存在直接相连的边。此外,由于保护时隙长度小于干扰时长,节点3和节点5对应的波束调度决策将引发强烈的波束间干扰,故节点3和节点5之间用边相连。

(3) 在构造好的干扰冲突图中,无干扰的波束指向和保护时隙设置决策集合等价于冲突图中的独立集。当节点的权值设置为该节点决策对应的网络性能的增益值时,原始问题转变为冲突图中的最大加权独立集搜索问题。

(4) 利用基于节点度的最大加权独立集搜索算法进行时隙级遍历搜索,生成无异步干扰的波束指向控制和保护时隙设置决策集合。

为评估异步干扰的影响和所提方案的性能,参考文献[14]中的Starlink前期星座计划,仿真了4408颗低轨卫星的星座。仿真小区数目为100个,星地链路传播时延差最大约为4 ms。仿真持续了28000个波束调度周期,每个调度周期持续200 ms。场景内所有小区可见星数目之和为10~16颗,每颗卫星配置6个窄波束,采用频率复用系数(frequency reuse factor, FRF)为2和3两种配置方式。可选的保护时隙长度为 0 、 $0.2T_{\max}$ 、 $0.4T_{\max}$ 、

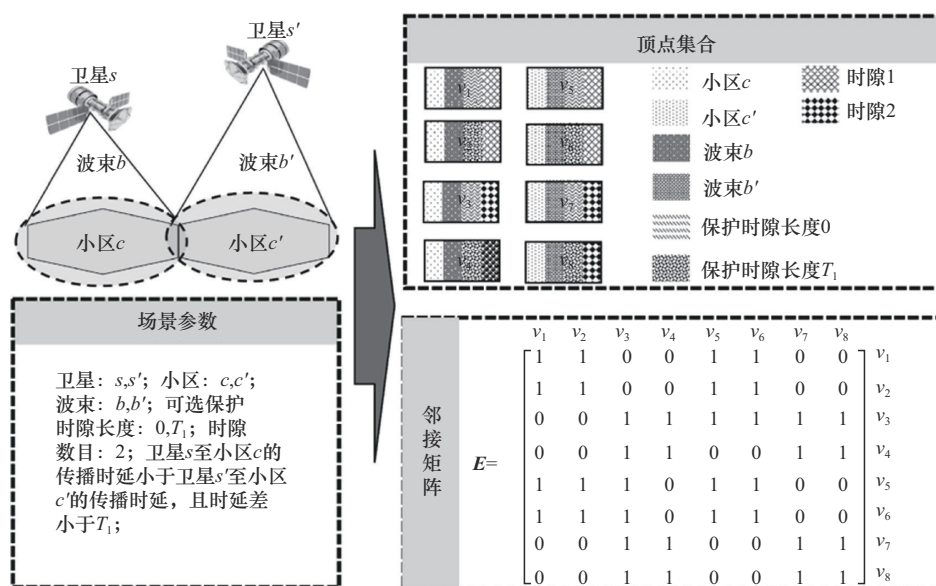


图8 面向波束间异步干扰场景的冲突图构造

$0.6T_{\max}$ 、 $0.8T_{\max}$ 和 $T_{\max}$ ，且最大保护时隙 $T_{\max} = \min(4 \text{ ms}, T_{\text{slot}})$ ， T_{slot} 为一个时隙的持续时间。对比方案包括贪婪算法^[21]、匹配算法^[22]以及固定小区服务频段的策略。贪婪算法在决策过程中总是选择使所有小区吞吐量增加最大的波束指向和保护时隙设置的决策；匹配交换会不断调整波束调度决策，直至任意交换的波束调度决策均无法提升网络容量；在固定小区服务频段的策略中，网络预先为小区分配服务频段，并使任意相邻小区间服务频段正交，且卫星仅能在小区服务频段内为该小区提供服务。最终吞吐量性能评估结果如图9所示，异步干扰影响下小区平均性能分析如图10所示。

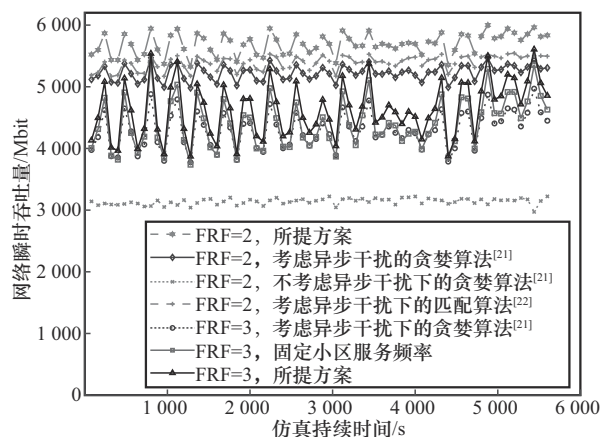


图9 吞吐量性能评估

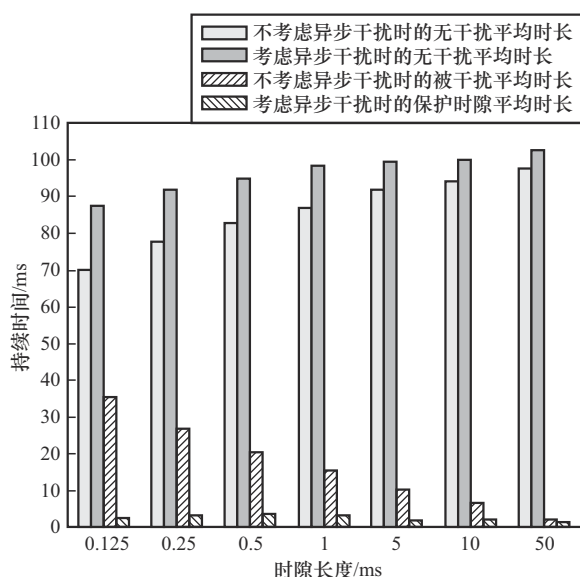


图10 异步干扰影响下小区平均性能分析

由图9可知，所提的基于干扰冲突图的波束调度算法在不同的频率复用系数配置下均优于对比方案。当频率复用系数为2时，所提方案相比贪婪算法和匹配交换算法，分别可提高网络瞬时吞吐量9%和6%。当频率复用系数为3时，所提方案相比于固定小区服务频段的方案平均可增加网络瞬时吞吐量2.5%，验证了所提方案的有效性。同时，如果采用贪婪算法且在决策时忽视波束间异步干扰的影响，网络容量将下降40%，这充分说明异步干扰将严重损害网络性能。图10展示了不同时隙长度配置下异步干扰对所提方案下的网络性能的影响。这里假定时隙长度为小区最短服务时间。可观察到，随着时隙长度的下降，异步干扰对网络性能的不利影响逐渐增强。当时隙长度由50 ms下降至0.125 ms时，网络受异步干扰影响的性能损失从4.75%增加至20%。由于卫星采用地面移动通信技术时，不同子载波间隔配置对应的时隙长度范围为0.125 ms至1 ms，在设计干扰管理与频谱共享决策时需充分考虑异步干扰的影响。

4 星地间干扰避免与频谱共享关键技术

针对星地频谱共享场景的典型特征与现有研究面临的挑战，本节提出宽窄波束协同的星地频谱共享网络架构和相应的频谱共享机制，支持手机直连卫星等新兴场景和应用，并为用户提供全球无缝覆盖、泛在连接的通信服务。同时，所提的网络架构和频谱共享机制可与现有的星地频谱共享算法兼容。

4.1 宽窄波束协同的星地融合网络架构设计

为实现全球无缝覆盖和低信令开销的星地频谱共享，本节首先提出一种宽窄波束协同的星地融合网络架构。所提宽窄波束协同的星地融合网络架构如图11所示。其中，低轨卫星同时配置宽波束和窄波束。宽波束对信号的信干噪比要求低，而窄波束对信号的信干噪比要求高。考虑在

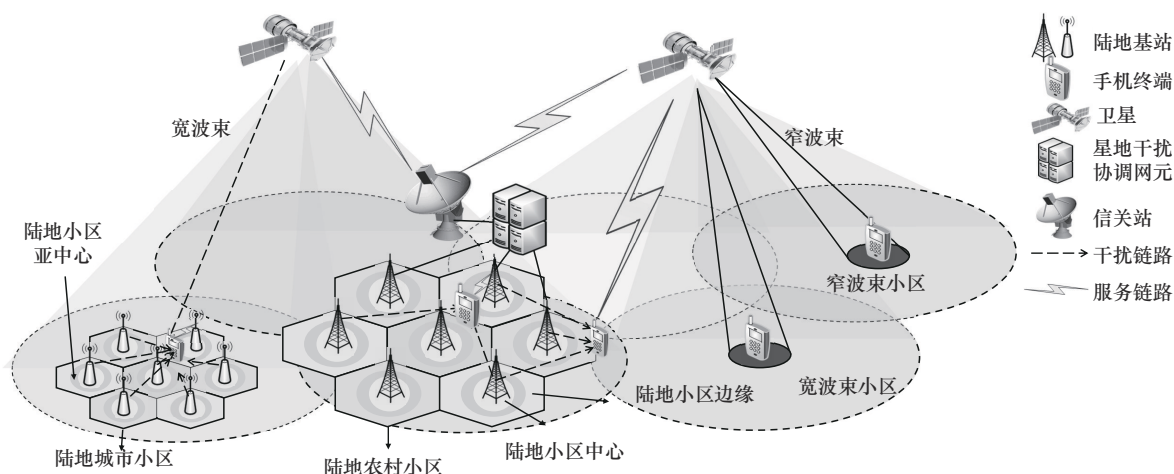


图11 所提宽窄波束协同的星地融合网络架构

地面小区中远近效应明显, 陆地小区中心和小区边缘接收信号强度差可达到 20 dB 以上。针对上述特点, 根据用户至基站的距离或接收信号强度将陆地小区划分为3个区域, 分别命名为小区中心、小区亚中心和小区边缘。当用户接入地面网络时, 基站将在随机接入过程中估计用户的定时提前值, 并计算用户与卫星间的距离。接着, 基站根据距离估计结果将用户划分至地面小区的不同区域。上述过程由基站独立完成, 无须增加额外的协调信令开销。

为支持星地间动态频谱共享, 星地干扰协调网元汇集区域内基站的负载信息, 并将基站负载和位置信息提供给卫星网络。接着, 卫星网络将根据基站负载信息, 在保证陆地小区服务需求的前提下, 统一制定波束调度和频谱共享决策。随后, 卫星波束调度与频谱共享决策将被提供给星地干扰协调网元, 并由网元发送至地面基站。最终, 地面基站在卫星强干扰时间段内时停止被干扰频段上的数据传输, 实现星地间干扰避免和动态频谱共享^[47]。

4.2 宽波束频谱共享机制设计

将地面网络频谱划分为3个正交部分, 分别为陆地小区中心用户、亚中心用户和边缘用户提供服务。以宽波束三色复用为例, 宽波束频谱共

享机制如图12所示^[48]。陆地小区中心和亚中心均采用全频率复用方案, 即不同小区的中心用户均能够使用频率在 $[f_2, f_3]$ 的全部地面网络频谱资源, 不同小区的亚中心用户均能够使用频率在 $[f_1, f_2]$ 的全部地面网络频谱资源。陆地小区边缘采用三色复用的方案, 通过频域隔离降低干扰, 同时基站采用较高的功率水平服务边缘用户以保证其服务质量。考虑宽波束对信干噪比要求低且陆地小区中心信号强度远高于地面小区边缘, 故陆地小区中心区域受卫星同频干扰影响较小, 而陆地小区边缘极易受到卫星干扰导致服务中断。因此, 宽波束可与陆地小区中心用户频谱共享^[1]。同时, 宽波束也可采用小区固定服务频段的策略, 通过频率复用和空域隔离降低宽波束间干扰。

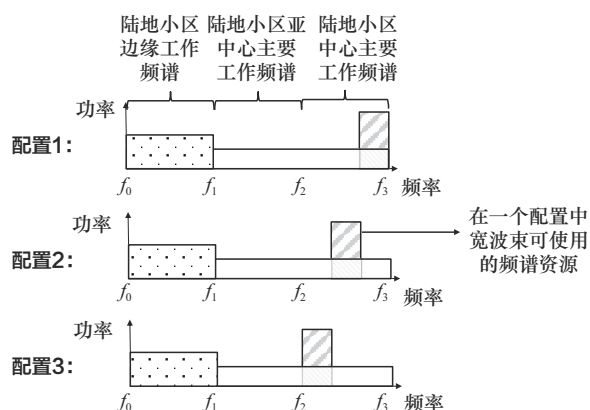
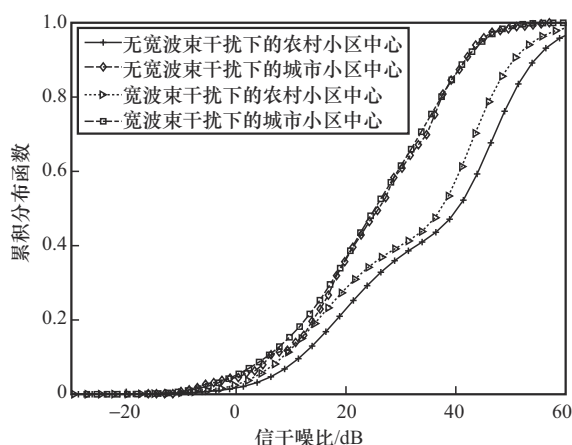


图12 宽波束频谱共享机制

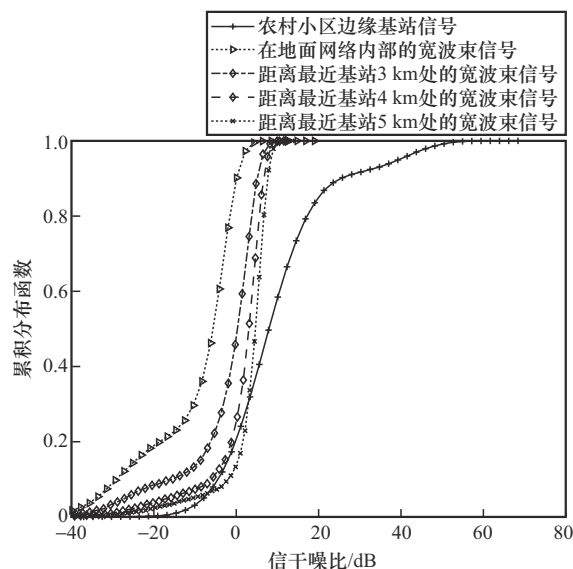
当网络负载较高时,可临时调整陆地小区内的频率规划。例如,当陆地小区中心负载高于预设阈值时,可将频率在 $[f_0, f_2]$ 的地面网络频谱临时授权给小区中心用户使用;当陆地小区亚中心负载高于预设阈值时,可将频率在 $[f_0, f_1]$ 的地面网络频谱临时授权给陆地小区亚中心用户使用。基于以上分析,所提宽波束频谱共享机制可与现有研究提出的动态频谱共享方案同时使用。例如,使用文献[41]中基于博弈论的方法调整陆地小区中心可用频谱,从而提高频谱效率。此外,当陆地小区中心用户可使用的频谱固定时,所提宽波束星地频谱共享方案不需要额外的星地间的信令开销,可显著降低网络管理复杂度。

对所提的宽波束频谱共享机制进行性能评估,考虑农村和城市两种地面网络场景,包括 6 400 个农村基站小区和 32 400 个城市基站小区。其中,农村基站和城市基站小区半径分别为 5 km 和 500 m,宽波束覆盖半径为 200 km。地面小区将小区中心、亚中心和边缘按面积等比例分为 3 部分。最终,所提宽波束频谱共享机制性能评估结果如图 13 所示。所提机制对地面网络干扰评估如图 13 (a) 所示。可以观察到,所提宽波束频谱共享机制对地面小区中心用户的干扰有限。其中,中心用户的平均信干噪比下降不超过 3 dB,且信干噪比在城市和农村中心分别有 73% 和 65% 的概率高于 19 dB,对应的农村小区中心和城市小区中心用户的平均网络容量仅分别下降约 4.5% 和 1.8%,满足 3GPP TR38.863 中规定的星地间干扰对地面网络性能损伤不超过 5% 的要求^[6]。宽波束接入性能评估结果如图 13 (b) 所示。当用户位于地面网络内部时,由于受到地面基站较强干扰,宽波束的平均信干噪比较低,此时用户优先接入地面基站。当用户距离最近的农村基站 5 km 时,宽波

束信干噪比有 93% 的概率超过 -4.5 dB,可以满足下行同步和数据传输的基本需求^[25]。因此,当用户位于地面网络的覆盖边缘时,宽波束可以提供补充覆盖服务。同时,由于宽波束对陆地网络干扰极低,宽波束覆盖区域可与地面基站重叠覆盖,满足星地间泛在连接的愿景。



(a) 所提机制对地面网络干扰评估



(b) 宽波束接入性能分析

图 13 所提宽波束频谱共享机制性能评估结果

为进一步明确所提机制的优越性,从多个性能指标层面对比分析了所提方案与现有方案,包括对地面网络容量的影响、是否支持无缝覆盖和存量手机终端。不同的星地频谱共享方案指标对比见表 5,可以观察到,所提方案同时具有对地



表 5 不同的星地频谱共享方案指标对比

文献	对地面网络的容量影响	是否支持无缝覆盖	是否支持存量手机终端
[25,37]	无影响	不支持	支持
[38]	影响较小	不支持	不支持
[39-40]	地面网络负载较高时影响较大	支持	支持
[41]	地面网络负载较高时影响较大	支持	支持
[42]	地面网络负载较高时影响较大	支持	不支持
[43]	地面网络负载较高时影响较大	支持	支持
[44]	地面网络负载较高时影响较大	支持	支持
所提方案	影响较小	支持	支持

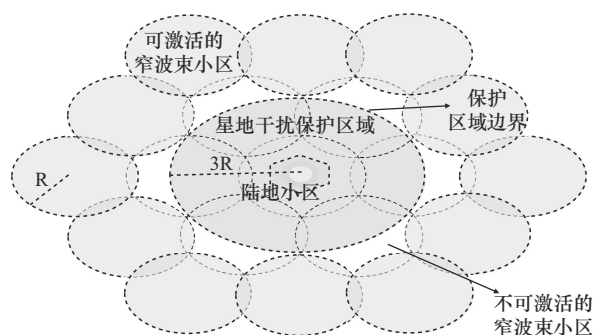
面网络容量影响较低、支持无缝覆盖和支持存量手机终端的优势。

4.3 窄波束频谱共享机制设计

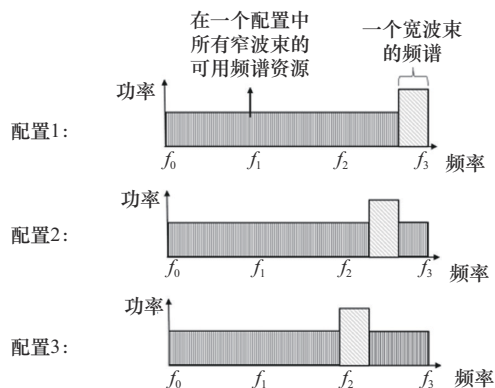
由于窄波束对信干噪比要求高，当窄波束工作在地面网络频段时，其将对同频的地面小区造成严重干扰。为此，需要为窄波束设计合适的空域隔离或动态频谱共享机制。

(1) 空域隔离的窄波束频谱共享机制

注意到，当低轨卫星采用小区级自适应的波束图样设计方法时，窄波束的干扰范围将被约束在服务的卫星小区及其相邻的卫星小区之间。因此，所设计的空域隔离的窄波束频谱共享机制如图 14 所示。图 14 (a) 中，激活的窄波束需距离最近的地面基站至少 3 倍卫星小区半径。此外，为防止宽窄波束间干扰，窄波束工作频谱需与宽波束频谱正交，如图 14 (b) 所示。同时，在空域隔离的窄波束频谱共享机制下，用户可通过宽窄波束协同的卫星接入流程申请卫星服务。宽窄波束协同的卫星接入流程如图 15 所示。首先，用户通过宽波束实现随机接入，并向卫星提供自己的位置信息。随后，卫星根据位置信息检查用户是否位于星地干扰保护区内。当用户位于星地干扰保护区内时，用户只获得宽波束的传输资源授权，否则卫星将激活相应的窄波束，并为用户分配窄波束的时频资源，以提高服务速率。



(a) 空域干扰隔离



(b) 窄波束与宽波束频谱分配

图 14 空域隔离的窄波束星地频谱共享机制

(2) 窄波束动态频谱共享机制

考虑地面网络并不会一直保持满负载状态，可采用星地动态频谱共享机制提高频谱效率。为降低星地间干扰协调的信令开销，卫星可采用小区级的自适应波束图样设计时，并按地理区域将地面小区划分为不同的簇，随后以簇为基本单位向卫星提供

地面网络的负载信息。具体的,将每一个卫星小区及其邻接的卫星小区内所有的地面基站划分至一个簇,且簇的位置位于卫星小区中心,簇的负载为簇内所有基站的负载最大值。考虑一个基站簇可能同时受到多个卫星波束干扰,需要通过多星联合的波束调度策略提高频谱效率。最终,所设计的星地协同的窄波束动态频谱共享流程如图16所示^[47]。

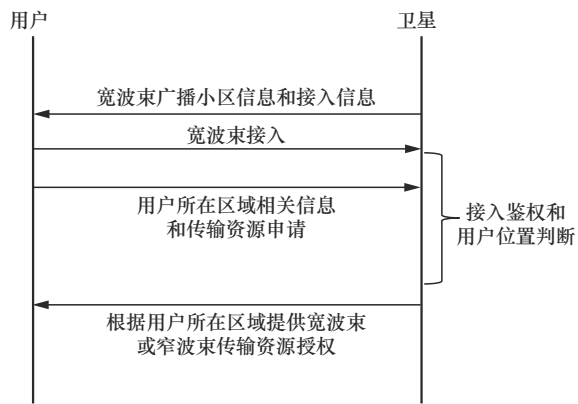


图15 宽窄波束协同的卫星接入流程

5 未来研究方向与挑战

5.1 低轨巨型星座中多阶段波束管理与频谱共享方案

由于成本和运力等问题,巨型低轨卫星星座

是一个渐进式建设的过程。在此过程中,随着在轨卫星数目的增加,网络可用波束数目随之增长。尽管较低的频率复用系数可提高单波束容量,但受到星地融合网络异构性、差异化传播时延以及波束间同频干扰的影响,网络并不一定能同时激活所有可用波束。为充分挖掘网络性能,需通过数值分析等手段,如随机几何^[49],评估在不同参数配置下的最高可达容量。最终,通过分析网络在不同建设阶段的最优波束频率复用系数,对未来星座中的干扰管理与频谱共享方案设计提供指导。

当星座建模较大、可用波束数目接近地面卫星小区数时,相比于全频率复用或两色复用方案,网络采用频率三色复用的管理策略并不一定会降低网络总容量。同时,巨型星座部署集中式的波束调度策略与星间异步干扰协调方法将难以满足实时性管理需求。根据图9和图11的仿真结果,建议卫星采用小区级波束图样自适应设计和固定小区服务频段的策略。此时,由于卫星仅能在网络预先配置的小区服务频段内为小区提供服务且任意相邻的小区间服务频段正交,在此策略配置下星内干扰和星间干扰被有效缓解。此时,可将复杂的多星多波束联合管理问题转换为低复

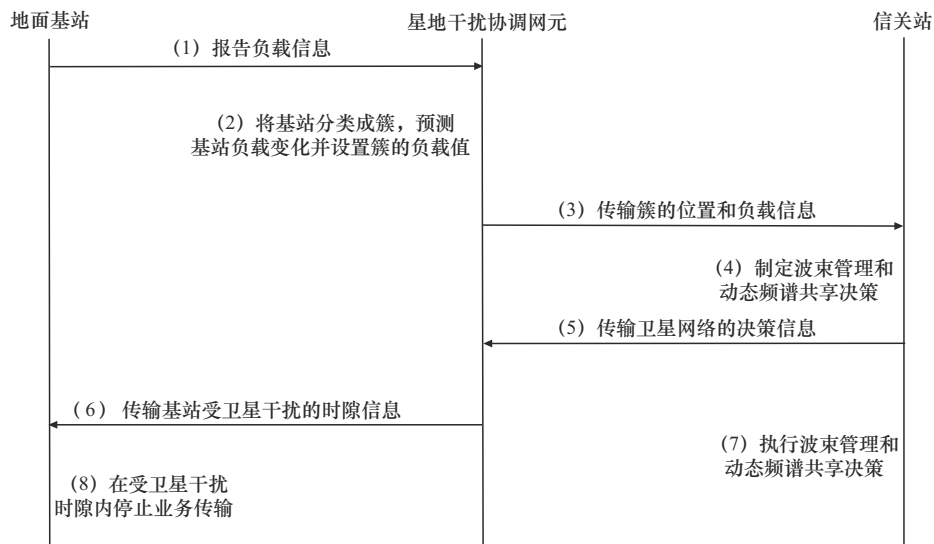


图16 星地协同的窄波束动态频谱共享流程



杂度的单星波束管理问题,显著降低网络管理复杂度。同时,由于人工智能技术能在复杂度和性能间取得较好的权衡^[24,29,50],借助深度强化学习和图神经网络等方法在无星内/星间干扰的场景中快速制定波束调度决策,可实现较高的小区服务满意度和频谱效率。

5.2 星间切换

由于低轨卫星高速运动,网络拓扑高动态,小区面临星间切换频繁的挑战^[14,51]。当前大部分星间切换研究通过观察卫星信号强度、剩余覆盖时间和空口负载等链路指标,设计由用户主动发起的星间切换策略以降低切换频率并提高服务质量^[8,50]。由于用户仅能获得部分网络观察信息,执行星间切换时可能会加剧星间负载失衡。考虑卫星小区可能相对地球静止,由网络统一制定星间切换决策将有利于提高网络容量并保障服务连续性。此外,当前波束管理策略仅追求瞬时的网络性能最优,为提高网络容量可能迫使用户频繁地发起星间切换以实现星间负载均衡,这将增大星间切换频率^[47]。受到硬件能力限制,用户通常在星间切换期间难以维持高速传输链路,导致服务中断,使得当前波束管理策略无法取得期望的网络性能。为此,需从网络长期管理角度考虑,设计由网络主动触发的星间切换策略,平衡星间切换频率与网络性能^[47]。

考虑可用频谱稀缺性问题,在星座规模较小时可采用波束全频率复用的方式提高网络容量。在手机直连卫星场景中,由于终端天线为全向天线,用户极易受星间异步干扰的影响,使得集中式的波束异步干扰协调策略难以满足实时性调度需求。上述问题可通过增强卫星服务能力和合理规划星间切换时间点初步解决。当单星同时生成的波束数目增加时,星座所需的卫星数目减少。此时,由于卫星密度降低,单星服务范围扩大,星间切换频率下降。同时,为降低波束间异步干扰的影响,网络可在小区至两颗卫星的传播时延

近似相等的区域为小区内用户执行星间切换操作,且相邻小区尽可能地分配给同一个卫星服务。在上述场景中,由于星地链路的传播时延近似相等,可缓解网络中的异步干扰避免问题。

5.3 多星协作传输

由于链路预算有限,低轨卫星提供给用户的峰值速率显著低于地面移动通信网络。尽管网络可通过增大天线增益和发射功率的方式以提高传输速率,但大口径的星载相控阵天线将显著增大卫星生产制造难度和功率开销。考虑在巨型低轨卫星星座中小区同时可见多颗卫星,可借鉴地面网络已有的分布式波束成形技术,通过多星协同传输提高用户峰值速率^[36]。然而,在低轨卫星场景中,分布式波束成形技术面临星间距离远大于信号半波长距离等挑战,波束图样可能存在较大的旁瓣泄露,导致用户间强干扰^[52]。此外,由于不同卫星至不同用户传输时延不同,在设计分布式波束成形技术时需补偿传播时延的影响,以缓解多星间异步干扰。同时,在切换服务用户时,该技术在多用户服务场景中仍面临着时序调整复杂等挑战。因此,当前该研究在低轨卫星场景中仍停留在起步阶段。

6 结束语

发展星地融合网络是实现未来移动通信全域覆盖、泛在连接的一种可行的解决方案。为了应对频谱资源稀缺、网络架构复杂、卫星波束广覆盖、波束投影形变、星间异步干扰、卫星小区内远近效应不明显和星地间干扰态势时变等挑战,本文首先从网络架构、典型干扰管理与频谱共享场景出发,系统性地阐述了当前星地融合网络中干扰管理与频谱共享研究的发展现状,并针对已有研究的不足之处提出创新和改进的技术方案,并通过仿真对比分析验证其有效性。最后,面向未来巨型低轨卫星星座与地面网络融合场景,根据潜在的干扰管理与频谱共享复杂化、频繁切换

引发的信令开销大和异步干扰、用户峰值速率低等挑战, 进行深入分析, 提供启发性的思路, 并期待在国内外共同研究攻关下, 提升卫星通信的服务质量, 推动行业蓬勃发展。

参考文献:

- [1] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [2] 朱剑锋, 孙耀华, 彭木根. 低轨卫星通信系统的前导序列设计[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 75-81.
ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Preamble design for low earth orbit communication systems[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 75-81.
- [3] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面 5G 的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018(9): 14-21.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. Discussion on the integration of satellite communication and ground 5G (I)[J]. Satellite & Network, 2018(9): 14-21.
- [4] IMT-2030(6G)推进组. 6G 网络架构愿景与关键技术展望白皮书[R]. 2021.
International Mobile Telecommunications-2030 (6G) Promotion Group. White paper on architecture vision and key technology outlook of 6G network[R]. 2021.
- [5] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821 (V16. 0. 0)-2020[R]. 2019.
- [6] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): non-terrestrial networks (NTN) related RF and co-existence aspects: TR 38.863 (V18. 0. 0)-2023[R]. 2023.
- [7] 蒋瑞红, 冯一哲, 孙耀华, 等. 面向低轨卫星网络的组网关键技术综述[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 37-47.
JIANG R H, FENG Y Z, SUN Y H, et al. A survey on networking key technologies for LEO satellite network[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 37-47.
- [8] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议[J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [9] 何元智, 肖永伟, 张世杰, 等. 全球泛在连接新模式: 手机直连卫星关键技术及挑战[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1591-1603.
- [10] HE Y Z, XIAO Y W, ZHANG S J, et al. A novel pattern for global ubiquitous interconnection: key technologies and challenges of direct-to-smartphone[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2024, 46(5): 1591-1603.
- [10] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [11] HEYDARISHAHREZA N, HAN T, ANSARI N. Spectrum sharing and interference management for 6G LEO satellite-terrestrial network integration[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2024, PP(99): 1.
- [12] 程锦霞, 邓伟, 翁玮文, 等. 面向 6G 的天地一体无线网络技术研究[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 788-794.
CHENG J X, DENG W, WENG W W, et al. Research on 6G mobile and satellite convergence wireless network technology[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 788-794.
- [13] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811 (V15. 4. 0)-2020[R]. 2020.
- [14] PACHLER N, DEL PORTILLO I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]//Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-7.
- [15] HEO J, SUNG S, LEE H, et al. MIMO satellite communication systems: a survey from the PHY layer perspective[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023, 25(3): 1543-1570.
- [16] 3GPP. Study on new radio access technology physical layer aspects: TR 38.802 (V14. 2. 0)-2017[R]. 2017.
- [17] R1-1909400. Discussion on the TA and PRACH for NTN, ZTE, submitted to RAN1#98[R]. 2019.8.
- [18] LI Y T, LUO Z Q, ZHOU W Y, et al. Benefits analysis of beam hopping in satellite mobile system with unevenly distributed traffic[J]. China Communications, 2021, 18(9): 11-23.
- [19] 何元智, 彭聪, 于季弘, 等. 面向密集多波束组网的卫星通信系统资源调度算法[J]. 通信学报, 2021, 42(4): 109-118.
HE Y Z, PENG C, YU J H, et al. Resource scheduling algorithm of satellite communication system for future multi-beam dense networking[J]. Journal on Communications, 2021, 42(4): 109-118.
- [20] ZHANG X Y, YUE X W, LI T, et al. A unified NOMA framework in beam-hopping satellite communication systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023,



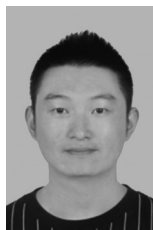
- 59(5): 5390-5404.
- [21] CHEN L, HA V N, LAGUNAS E, et al. The next generation of beam hopping satellite systems: dynamic beam illumination with selective precoding[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2023, 22(4): 2666-2682.
- [22] WANG A Y, LEI L, LAGUNAS E, et al. Joint optimization of beam-hopping design and NOMA-assisted transmission for flexible satellite systems[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(10): 8846-8858.
- [23] 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.
- [24] HU X, ZHANG Y C, LIAO X L, et al. Dynamic beam hopping method based on multi-objective deep reinforcement learning for next generation satellite broadband systems[J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2020, 66(3): 630-646.
- [25] ZHANG C, JIANG C X, KUANG L L, et al. Spatial spectrum sharing for satellite and terrestrial communication networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2019, 55(3): 1075-1089.
- [26] TAKAHASHI M, KAWAMOTO Y, KATO N, et al. DBF-based fusion control of transmit power and beam directivity for flexible resource allocation in HTS communication system toward B5G[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(1): 95-105.
- [27] HONNAIAH P J, MATURO N, CHATZINOTAS S, et al. Demand-based adaptive multi-beam pattern and footprint planning for high throughput GEO satellite systems[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021(2): 1526-1540.
- [28] LIN Z Y, NI Z Y, KUANG L L, et al. Multi-satellite beam hopping based on load balancing and interference avoidance for NGSO satellite communication systems[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2023, 71(1): 282-295.
- [29] LIN Z Y, NI Z Y, KUANG L L, et al. Satellite-terrestrial coordinated multi-satellite beam hopping scheduling based on multi-agent deep reinforcement learning[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(8): 10091-10103.
- [30] LI T, JIN J, LI W, et al. Research on interference avoidance effect of OneWeb satellite constellation's progressive pitch strategy[J]. *International Journal of Satellite Communications and Networking*, 2021, 39(5): 524-538.
- [31] GU P, LI R, HUAC Q, et al. Dynamic cooperative spectrum sharing in a multi-beam LEO-GEO co-existing satellite system[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2022, 21(2): 1170-1182.
- [32] LI T, YAO R G, FAN Y, et al. Multiobjective optimization for beam hopping and power allocation in dual satellite cooperative transmission networks[J]. *IEEE Systems Journal*, 2023, 17(3): 3870-3881.
- [33] LEI L, WANG A Y, LAGUNAS E, et al. Spatial-temporal resource optimization for uneven-traffic LEO satellite systems: beam pattern selection and user scheduling[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2024, 42(5): 1279-1291.
- [34] CHEN L, WU L L, LAGUNAS E, et al. Joint power allocation and beam scheduling in beam-hopping satellites: a two-stage framework with a probabilistic perspective[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(10): 14685-14701.
- [35] ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Beam management in low earth orbit satellite networks with random traffic arrival and time-varying topology[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, 73(9): 13352-13367.
- [36] 陈山枝, 孙韶辉, 康绍莉, 等. 6G星地融合移动通信关键技术[J]. *中国科学: 信息科学*, 2024, 54(5): 1177-1214.
- CHEN S Z, SUN S H, KANG S L, et al. Key technologies for 6G integrated satellite-terrestrial mobile communication[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2024, 54(5): 1177-1214.
- [37] HÖYHTYÄ M, MÄMMELÄ A, CHEN X F, et al. Database-assisted spectrum sharing in satellite communications: a survey[J]. *IEEE Access*, 2017(5): 25322-25341.
- [38] LEE H W, MEDLES A, CHEN C C, et al. Feasibility and opportunities of terrestrial network and non-terrestrial network spectrum sharing[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2023, 30(6): 36-42.
- [39] YANG M C, XUE G C, XIE B Y, et al. Soft frequency reuse based spectrum sharing scheme in the integrated satellite and terrestrial network[J]. *Frontiers in Space Technologies*, 2022(3): 783343.
- [40] 张晓燕, 潘冀. 星地混合系统的动态频谱共享[J]. *无线电通信技术*, 2021, 47(5): 633-637.
- ZHANG X Y, PAN J. Dynamic spectrum sharing in hybrid satellite-terrestrial systems[J]. *Radio Communications Technology*, 2021, 47(5): 633-637.
- [41] ZHANG X K, GUO D X, AN K, et al. Auction-based multi-channel cooperative spectrum sharing in hybrid satellite-terrestrial IoT networks[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2021, 8(8): 7009-7023.
- [42] LI Z Q, HAN S, PENG M G, et al. Dynamic multiple access based on RSMA and spectrum sharing for integrated satellite-terrestrial networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Commu-*

- nications, 2024, 23(6): 5393-5408.
- [43] JIA M, ZHANG X M, SUN J T, et al. Intelligent resource management for satellite and terrestrial spectrum shared networking toward B5G[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 54-61.
- [44] ZHU X M, JIANG C X, YIN L G, et al. Cooperative multi-group multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 981-992.
- [45] DANG J, ZHANG Z C, LI Y W, et al. Fast and arbitrary beam pattern design for RIS-assisted terahertz wireless communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(2): 2620-2625.
- [46] WANG J, QI C H, YU S, et al. Joint beamforming and illumination pattern design for beam-hopping LEO satellite communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(12): 18940-18950.
- [47] ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Beam management in low earth orbit satellite communication with handover frequency control and satellite-terrestrial spectrum sharing[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024(99): 1.
- [48] 孙耀华, 彭木根, 朱剑锋, 等. 一种星地频谱共享方法: CN119110300A[P]. 2024-12-10.
- SUN Y H, PENG M G, ZHU J F, et al. A star-ground spectrum sharing method: CN119110300A[P]. 2024-12-10.
- [49] 李睿雯, 孙耀华, 彭木根. 基于随机几何的星地融合无线网络上行覆盖性能分析[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 18-29.
- LI R W, SUN Y H, PENG M G. Performance analysis of satellite-terrestrial integrated wireless network based on stochastic geometry[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 18-29.
- [50] YANG G R, CHAI R, LIU L. DRL-based dynamic resource allocation for multi-beam satellite systems[C]//Proceedings of the 2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1-6.
- [51] 王则予, 张梦菲, 孙耀华, 等. 星上透明转发非地面网络中的切换机制[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 101-108.
- WANG Z Y, ZHANG M F, SUN Y H, et al. Handover mechanism design in non-terrestrial networks with transparent satellites[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 101-108.
- [52] TUZI D, DELAMOTTE T, KNOPP A. Satellite swarm-based antenna arrays for 6G direct-to-cell connectivity[J]. IEEE Access, 2023(11): 36907-36928.

[作者简介]



朱剑锋 (1998-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士生, 主要研究方向为星地融合无线网络。



孙耀华 (1992-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室副教授, 主要研究方向为低轨卫星通信和无线接入网络智能化。



冯昕澳 (1999-), 男, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室博士生, 主要研究方向为低轨卫星通信和巨型低轨星座组网。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学网络与交换技术全国重点实验室教授, 主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、雾无线接入网络等。