



面向星地融合网络的频率共享关键技术研究

伊鹏飞¹, 杜琴¹, 张鹏², 吴泽华², 王锐¹, 程锦霞¹, 邓伟¹

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

2. 中国移动通信集团有限公司, 北京 100033)

摘要: 随着泛在宽带通信需求的日益增长和天地一体化通信技术的持续演进, 卫星通信与地面移动通信网络从各自独立发展正逐步走向深度融合。重点面向星地融合领域介绍了星地频率共享关键技术。首先, 阐述了星地融合频率共享系统的干扰类型及兼容性分析方法; 其次, 提出了面向星地频率共享的智能协作接入网架构。基于此架构, 设计了波位级星地频率动态共享方案。为后续业界星地融合网络频率共享技术研究提供参考和借鉴。

关键词: 星地融合网络; 频率共享; 网络架构; 干扰管理

中图分类号: TN915.85

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025203

Research on key technologies for spectrum sharing in satellite-terrestrial integrated networks

YI Pengfei¹, DU Qin¹, ZHANG Peng², WU Zehua², WANG Rui¹, CHENG Jinxia¹, DENG Wei¹

1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

2. China Mobile Communications Group Co., Ltd., Beijing 100033, China

Abstract: With the increasing demand for ubiquitous broadband communication and the continuous evolution of space-terrestrial integrated communication technology, satellite communication and terrestrial mobile communication networks have gradually shifted from independent development to deep integration. The key technologies of satellite-terrestrial spectrum sharing in the field of satellite-terrestrial integration were introduced. Firstly, the typical scenarios of the satellite-terrestrial spectrum sharing system and the compatibility analysis method were elaborated. Secondly, an intelligent cooperative access network architecture for satellite-terrestrial spectrum sharing was put forward. Based on this architecture, a beam-position-level satellite-terrestrial dynamic spectrum sharing scheme was proposed. References and insights are provided for the subsequent research on the spectrum sharing technology of the satellite-terrestrial integrated network in the industry.

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

收稿日期: 2025-04-21; 修回日期: 2025-06-25

通信作者: 伊鹏飞, yipengfei@chinamobile.com

基金项目: 民用航天技术预先研究项目 (No.D030101)

Foundation Item: Civil Space Technology Pre Research Project(No. D030101)



0 引言

随着泛在宽带通信需求的日益增长和天地一体化通信技术的持续演进,卫星通信与地面移动通信系统从彼此独立发展逐步走向深度融合^[1-2]。其中,手机直连卫星已成为全球星地融合网络的发展热点^[3-5]。智能终端通过直接连接通信卫星,实现全时、全域、全场景的通信连接。当前,卫星网络与地面网络一般采用异频建设方式,以规避系统间干扰风险、降低部署难度。但适用于手机直连卫星的6 GHz以下低频段资源紧张、频谱资源利用率较低,且为低轨卫星网络分配独立使用的频段难度较大。卫星网络与地面网络的频谱共享可以极大提高资源利用率、缓解低频段资源紧张,是星地融合网络的重要研究方向^[6-7],吸引了学术界、产业界以及标准化组织的广泛关注和深入研究。

在学术界,众多学者围绕星地频率共享展开了多维研究。文献[8]介绍了5G与卫星通信融合的发展现状与面临问题,提出了面向5G与低轨卫星网络融合的频谱共用与电磁兼容性分析方法。文献[9]进行了IMT频段手机直连卫星系统对蜂窝网络的干扰分析,提出一种针对“划界”隔离部署场景的干扰分析方法。文献[10]讨论了C波段卫星系统可能对5G系统产生的阻塞干扰、杂散干扰和互调干扰影响。文献[11]介绍了Starlink星座系统对地面移动通信系统的干扰计算方法,并进行了干扰建模仿真。为缓解频分双工(frequency division duplex, FDD)模式下的星地系统间干扰,文献[12]提出一种基于“反向配对”的频率共享方法,即卫星系统下行/上行分别共享蜂窝网络上行/下行频段。文献[13]面向频率共享的星地融合网络提出了一种功率和频率资源分配方案,以减少星地间的干扰并提升融合系统的吞吐量。

在产业界,国内外积极探索星地频率共享,

加速制定频率共享政策,推动产业试点落地。2023年2月,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)拟定了太空补充地面覆盖(supplemental coverage from space, SCS)新规则草案^[14]。同年3月,FCC通过了促进SCS部署的相关规则,允许在地面移动通信业务的特定频段上增加移动卫星业务。2024年2月,SpaceX使用T-Mobile的1 910~1 915 MHz和1 990~1 995 MHz频段完成了与手机直连卫星相关业务测试。2025年2月,Verizon宣布已联合AST SpaceMobile使用850 MHz频谱成功实现卫星连接移动设备与另一移动设备进行视频通话。同月,T-Mobile联合SpaceX面向全美推出卫星直连智能手机服务T-Mobile Starlink公测版,多数近4年上市的智能手机均可适用,当超出蜂窝网络覆盖范围时会自动连接到T-Mobile Starlink网络,且消息发送和接收方式与蜂窝网络一致。

在标准化方面,2024年10月,国际电信联盟无线电通信部门(International Telecommunications Union Radiocommunication Sector, ITU-R)4C工作组(Working Party 4C, WP4C)就星地频率共享进行了讨论^[15]。WRC-27议题1.13面向手机直连设备新增可能的卫星移动业务划分的讨论聚焦在候选频段、直连卫星终端类型等方面。会议明确了初步候选频段列表,后续研究将基于各频段频率兼容共用情况,以及对现有业务保护规则措施等方面展开,逐步形成结论。

综上所述,星地频率共享具有提升手机直连卫星低频段资源利用率、促进星地网络深度融合的显著优势,但也面临着星地系统间干扰复杂、星地协同困难等挑战。为此,本文首先讨论了面向星地融合网络频率共享的干扰类型,而后提出了一种星地频率共享的智能协作接入网架构,建立动态高效的资源管理机制。基于创新架构,本文提出了波位级星地频率动态共享方案,有效提升卫星覆盖范围与频谱利用率。

1 星地频率共享场景及兼容性分析

星地融合网络频率共享系统由卫星、卫星基站、卫星终端、蜂窝基站和蜂窝终端构成，多星多波束与广域地面网络相互作用，导致干扰关系复杂多样。因此，需要对星地频率共享干扰类型进行分析。目前，频段通常分为FDD频段和时分双工（time division duplex, TDD）频段2种类型。在实际应用中，由于TDD模式中保护时间对频谱效率的限制，大多数低地球轨道（low earth orbit, LEO）卫星网络系统运行在FDD模式下，因此本文考虑卫星网络共享蜂窝网络FDD频段。

1.1 星地频率共享干扰类型分析

根据上/下行场景可分为星地下行频率共享和星地上行频率共享。进一步地，若卫星系统与地面蜂窝系统使用相同频段，则星地系统间存在同频干扰；若卫星系统与地面蜂窝系统使用相邻频段，则星地系统间存在邻频干扰^[16]。星地频率共享场景如图1所示，展示了星地频率共享场景、干扰链路及干扰类型。不失一般性地，假设系统中的卫星数为 J ，每个卫星共有 B 个波束；所考虑区域内的卫星波位数量为 K 、蜂窝终端数为 N 。

(1) 卫星下行共享蜂窝网络下行FDD频段如图1(a)所示。在该场景下存在2条干扰链路，卫星下行传输对蜂窝终端的干扰，以及蜂窝基站

下行传输对卫星终端的干扰。鉴于卫星与地面网络间的信号沿自由空间传播，对空间隔离起主要影响作用。因此，以下重点分析卫星对蜂窝终端的干扰。

当星地共享相同频率时，在某一时刻 t ，卫星 j 的第 b 个波束在服务波位 k 时会对广域的蜂窝终端 n 造成同频干扰，计算式可以表示为（以dBm/MHz为单位）：

$$I_{j,b,k,n}^{\text{Sat-UE,Co}}(t) = P_{j,b}^{\text{Sat}} + G_{j,b,k,n}^{\text{Sat}} + L_{j,n} + G_n^{\text{UE}} \quad (1)$$

其中， $P_{j,b}^{\text{Sat}}$ 为卫星 j 的第 b 个波束的发射功率（单位是dBm/MHz）； $G_{j,b,k,n}^{\text{Sat}}$ 为卫星天线在蜂窝终端 n 方向处的天线增益（单位是dB），其与卫星 j 的位置、第 b 个波束的主瓣导向（即波位 k 的位置）及蜂窝终端 n 的位置有关； $L_{j,n}$ 为卫星 j 到蜂窝终端 n 的信道增益（单位是dB），其与卫星 j 的位置及蜂窝终端 n 的位置、信号中心频率有关； G_n^{UE} 为蜂窝终端 n 的天线增益（单位是dB），通常为定值。当卫星 j 不在蜂窝终端 n 的可视范围内或卫星 j 的第 b 个波束未开启时，可设 $I_{j,b,k,n}^{\text{Sat-UE,Co}}(t) = -\infty$ 。

当星地共享相邻频率时，卫星下行发射的信号会泄漏到蜂窝系统使用的频段中，从而对蜂窝终端造成邻频干扰。邻频干扰程度可以由邻频干扰功率比（adjacent channel interference power ratio, ACIR）衡量，其定义为发射机的总功率与

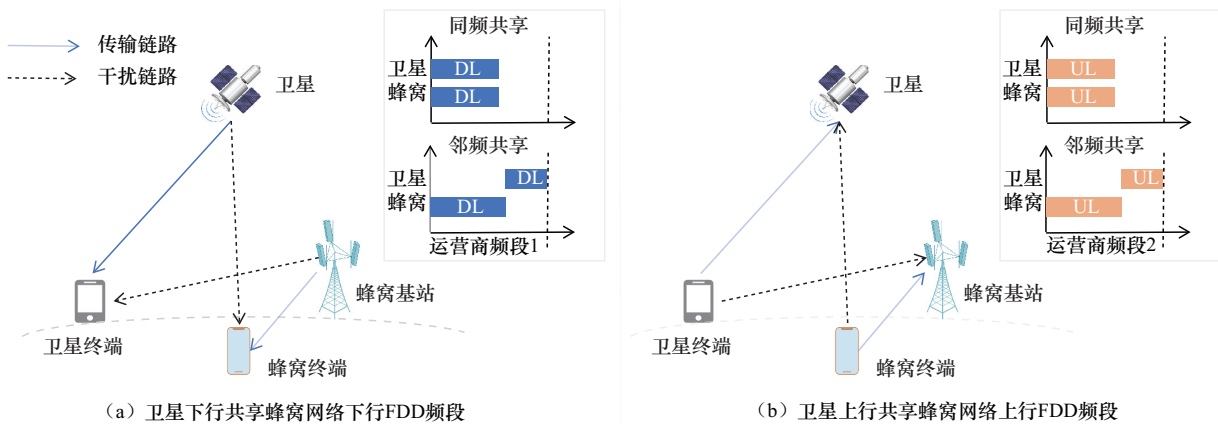


图1 星地频率共享场景



因发射机和接收机缺陷而影响受害接收机的总干扰功率之比。发射机的缺陷主要指邻道泄漏功率比 (adjacent channel leakage ratio, ACLR) 的特性, 它是指主信道功率与泄漏到相邻信道功率的比值; 而接收机的缺陷则指邻道选择性 (adjacent channel selectivity, ACS) 的特性, 它是指接收机滤波器在其通带内对有用信号的衰减与在相邻信道频率上对干扰信号的衰减之比。ACIR 是 ACLR 和 ACS 共同作用的结果, 其计算式为:

$$\frac{1}{\text{ACIR}} = \frac{1}{\text{ACLR}} + \frac{1}{\text{ACS}} \quad (2)$$

因此, 对某一时刻 t , 卫星 j 的第 b 个波束在服务波位 k 时, 对蜂窝终端 n 的邻频干扰为:

$$I_{j,b,k,n}^{\text{Sat-UE, Adj}}(t) = P_{j,b}^{\text{Sat}} - \text{ACLR}_{j,n}^{\text{Sat-UE}} + G_{j,b,k,n}^{\text{Sat}} + L_{j,n} + G_n^{\text{UE}} \quad (3)$$

其中, $\frac{1}{\text{ACIR}_{j,n}^{\text{Sat}}} = \frac{1}{\text{ACLR}_{j,n}^{\text{Sat}}} + \frac{1}{\text{ACS}_n^{\text{UE}}}$, $\text{ACLR}_{j,n}^{\text{Sat}}$ 代表卫星 j 的 ACLR 指标, ACS_n^{UE} 代表蜂窝终端 n 的 ACS 指标。

(2) 卫星上行共享蜂窝网络上行 FDD 频段如图 1 (b) 所示。在该场景下存在 2 条干扰链路, 分别为蜂窝终端发射干扰卫星上行接收, 以及卫星终端上行发送干扰蜂窝基站接收。同上所述, 卫星与地面网络间的干扰对空间隔离起主要影响作用。以下重点分析卫星受广域蜂窝终端的干扰。

当星地共享相同频率时, 对某一时刻 t , 卫星 j 的第 b 个波束在服务波位 k 时, 受到蜂窝终端 n 的同频干扰 (单位是 dBm/MHz) 可以表示为:

$$I_{j,b,k,n}^{\text{UE-Sat, Co}}(t) = P_n^{\text{UE}} + G_n^{\text{UE}} + L_{j,n} + G_{j,b,k,n}^{\text{Sat}} \quad (4)$$

其中, P_n^{UE} 表示蜂窝终端 n 的发射功率 (单位是 dBm/MHz)。当卫星 j 不在蜂窝终端 n 可视范围内或卫星 j 的第 b 个波束未开启时, 设 $I_{j,b,k,n}^{\text{UE-Sat, Co}}(t) = -\infty$ 。对于同一时刻 t , 卫星 j 的第 b 个波束会受到广域覆盖下的 N 个蜂窝终端的上行同频集总干扰 (单位是 dBm/MHz), 可表示为:

$$I_{j,b}^{\text{UE-Sat, Co, Total}}(t) = 10 \lg \left(\sum_{n=1}^N 10^{\frac{I_{j,b,k,n}^{\text{UE-Sat}}(t)}{10}} \right) \quad (5)$$

当星地共享相邻频率时, 蜂窝终端发射的信号会泄漏到卫星系统使用的频段中, 从而对卫星上行接收造成邻频干扰, 设蜂窝终端 n 的 ACLR 指标为 $\text{ACLR}_n^{\text{UE}}$ 、卫星 j 的 ACS 指标为 $\text{ACS}_j^{\text{SAT}}$ 。则由式 (4)、(5) 可知, 对于同一时刻 t , 卫星 j 的第 b 个波束会受到所有地面 N 个蜂窝终端的邻频集总干扰 (单位是 dBm/MHz) 可表示为:

$$I_{j,b}^{\text{UE-Sat, Adj, Total}}(t) = 10 \lg \left(\sum_{n=1}^N 10^{\frac{P_n^{\text{UE}} - \text{ACLR}_{n,j}^{\text{UE-SAT}} + G_n^{\text{UE}} + L_{j,n} + G_{j,b,k,n}^{\text{Sat}}}{10}} \right) \quad (6)$$

其中, $\frac{1}{\text{ACIR}_{n,j}^{\text{UE-Sat}}} = \frac{1}{\text{ACLR}_n^{\text{UE}}} + \frac{1}{\text{ACS}_j^{\text{SAT}}}$ 。

卫星 j 与蜂窝终端 n 之间的信道增益 $L_{j,n}$ 与所应用的星地信道模型有关。由于星地链路距离远, 电磁波在真空中传播损耗占主导, 因此, 在工程实际中, 可选择自由空间路径损耗模型作为基础损耗, 叠加经验修正值作为星地信道模型, 平衡精度与工程效率。 $L_{j,n}$ 可表示为:

$$L_{j,n} = 32.45 + 20 \lg(f) + 20 \lg(d_{j,n}) + L_{\text{other}} \quad (7)$$

其中, f 为卫星发射信号的中心频率 (MHz), $d_{j,n}$ 为卫星 j 与蜂窝终端 n 之间的距离 (km)。 L_{other} 表示自由空间路径损耗之外的其他损耗 (如大气衰减、闪烁损耗、雨衰等) 的经验修正值。

对于装配大规模相控阵天线的低轨卫星, 其天线增益可采用 ITU-R 建议书 M.2101 中的阵列天线模型^[17]进行估算。总天线增益由阵列元件天线增益及波束成形导致的阵列增益共同决定, 详细内容可参考建议书 M.2101 第 5 节中表 3 和表 4 的具体描述。根据卫星 j 的位置和速度、卫星波束 b 的主瓣所指向的波位 k 的位置, 以及蜂窝终端 n 的位置, 即可确定卫星相控阵天线的位置姿态、角度关系及波束成形权重矢量, 进而可确定

$G_{j,b,k,n}^{\text{Sat}}$ 。蜂窝终端通常装配全向天线，其天线增益在任意方向均为定值。

1.2 星地频率共享兼容性分析

星地系统可以同频/邻频共享的必要条件是系统间同频/邻频干扰不得影响各自系统的正常运行，或影响可控。受扰门限是衡量星地系统能否兼容共享频谱的关键判据，其本质是保障双方系统正常通信质量的最大可接受干扰阈值。对于蜂窝终端而言，其意义在于确保卫星对蜂窝终端的干扰不显著抬高蜂窝终端的底噪，避免链路信号与干扰加噪声比（signal-to-interference plus noise ratio, SINR）损失导致的蜂窝下行通信质量大幅恶化；对于卫星而言，其意义在于确保蜂窝终端对卫星的干扰不显著抬高卫星的底噪，避免卫星链路 SINR 损失导致卫星上行通信质量大幅恶化。门限设定可遵循 ITU 及行业规范的系统性原则，例如，WRC-27 议题 1.13 针对卫星通信系统对地面 IMT 系统的干扰保护准则设定为 $I/N = -6 \text{ dB}$ ，即表示卫星对蜂窝终端的干扰 I 与蜂窝终端底噪 N 相比小 6 dB ^[18]。基于受扰门限，可以得到波位级的同频/邻频可用性判断准则。

对于星地下行频率共享场景，在给定时段 $[t_1, t_2]$ 内，波位 k 可以由卫星 j 的波束 b 以同频/邻频共享方式服务时，应满足广域内所有 N 个蜂窝终端受到包括卫星 j 的波束 b 在内的多星多波束集总同频/邻频干扰均小于蜂窝终端允许最大受扰门限（设为 T_{UE} ），即：

$$10 \lg \left(\sum_{j=1}^J \sum_{b=1}^B 10^{\frac{I_{j,b,k,n}^{\text{Sat-UE, Co}}(t)}{10}} \right) < \quad (8)$$

$$T_{\text{UE}}, \forall t \in [t_1, t_2], n = 1, 2, \dots, N$$

$$10 \lg \left(\sum_{j=1}^J \sum_{b=1}^B 10^{\frac{I_{j,b,k,n}^{\text{Sat-UE, Adj}}(t)}{10}} \right) < \quad (9)$$

$$T_{\text{UE}}, \forall t \in [t_1, t_2], n = 1, 2, \dots, N$$

对于星地上行频率共享场景，在给定时段 $[t_1, t_2]$ 内，波位 k 可以由卫星 j 的波束 b 以同频/邻

频共享方式服务时，应满足卫星 j 的波束 b 受到广域内所有 N 个蜂窝终端的同频/邻频集总干扰小于卫星允许受到最大受扰门限（设为 T_{Sat} ），即：

$$I_{j,b}^{\text{UE-Sat, Co, Total}}(t) < T_{\text{Sat}}, \forall t \in [t_1, t_2] \quad (10)$$

$$I_{j,b}^{\text{UE-Sat, Adj, Total}}(t) < T_{\text{Sat}}, \forall t \in [t_1, t_2] \quad (11)$$

由于各个卫星各个波束受到的干扰相互独立，因此式（10）、式（11）对于多星多波束场景仍然适用。

综上所述，每个波位存在同频可兼容、邻频可兼容、无法兼容 3 种状态：当式（8）满足时，波位 k 下行同频可兼容；当式（8）不满足但式（9）满足时，波位 k 下行邻频可兼容；当式（9）不满足时，波位 k 上行不可兼容。当式（10）满足时，波位 k 上行同频可兼容；当式（10）不满足但式（11）满足时，波位 k 上行邻频可兼容；当式（11）不满足时，波位 k 上行不可兼容。

2 面向星地频率共享的智能协作接入网架构

由第 1 节的分析可知，面向星地频率共享，卫星广域覆盖范围下存在无法兼容、邻频可兼容、同频可兼容等多种场景，共享模式、干扰类型、兼容场景复杂。为实现卫星与地面网络精准高效的星地频率共享，需要汇聚星地协同覆盖区下卫星网络网元和大量地面蜂窝网元，基于星地两网的全局信息进行动态的资源管理，而目前尚无该机制。因此，本文创新提出面向星地频率共享的智能协作接入网架构，新增“星地智能动态协作网元”，包括干扰仿真分析、波位用频策略制定、干扰监测告警三大功能模块，面向星地频率共享的智能协作接入网架构示意图如图 2 所示。

（1）干扰仿真分析模块。

星地智能动态协作网元从蜂窝网络网管获取蜂窝基站的射频信息以及地理位置信息；同时，获取卫星的射频信息及卫星星历信息。基于星地两网信息，干扰仿真分析模块依据第 2.1 节所述

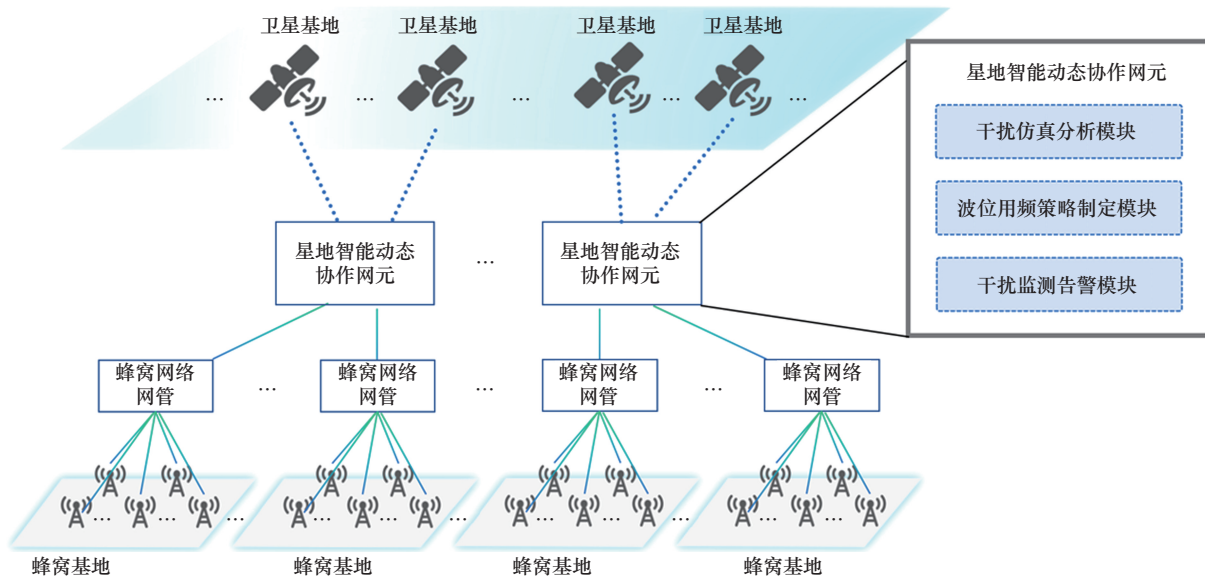


图2 面向星地频率共享的智能协作接入网架构示意图

的星地干扰分析方法，仿真分析星地网络在不同场景下相互干扰的情况，为后续的波位用频策略制定提供数据支撑与决策依据。

考虑单颗低轨卫星覆盖区蜂窝终端数量庞大，实时获取全量终端精确位置及活跃状态将导致信令开销激增，实际星地融合系统可采用统计化数据采集策略，以支撑大时间尺度（小时级）的频率共享决策。例如，通过无线网管获取星地业务信息历史数据，开展流量预测，获取未来一段时间的活跃用户状态统计数据。此外，考虑星地链路距离通常为数百至上千千米，而蜂窝基站覆盖半径典型值为几百米至数千米，相对于星地距离，同一基站覆盖区内的终端位置差异可忽略。因此，实际干扰仿真中，可采用蜂窝基站位置替代其所服务的蜂窝终端位置的简化方法。

（2）波位用频策略制定模块。

波位用频策略制定模块将融合干扰仿真分析模块所输出的干扰仿真结果以及干扰监测告警模块反馈的告警信息，依据第2.2节所述的星地频率共享兼容性准则，构建卫星网络波位与频率的映射表，指示卫星在服务特定波位时于各个时间区间内的同频与邻频可用状态，指导卫星系统的高效用频。

（3）干扰监测告警模块。

为提高星地频率共享的鲁棒性，考虑卫星与蜂窝网络增设干扰监测功能，实时监测卫星波束服务对应波位时的星地受扰状态。当受扰程度超过预设门限时，自动触发向星地智能动态协作网元的告警。星地智能动态协作网元中的干扰监测告警模块将对告警信息进行统一的分析与处理，若必要则更新波位与频率映射表，并发送至卫星基于新的用频策略开展上下行业务，保障星地融合系统的稳定运行。

面向星地频率共享的智能协作接入网架构的工作流程图如图3所示，展示了智能协作接入网架构中各网元、各模块间交互关系及整体工作流程。

3 波位级星地频率动态共享方案

当前星地融合频率共享中多采用单一的静态、预先设定的空间隔离或频率隔离方式。若仅依赖空间隔离手段，卫星网络与地面蜂窝网络的覆盖区域之间往往需要设置宽达数百千米的隔离带以规避相互干扰，这极大地限制了卫星网络的有效覆盖范围。而若单纯运用频率隔离，虽然较小的邻频干扰可以缩小所需隔离带从而有效提升

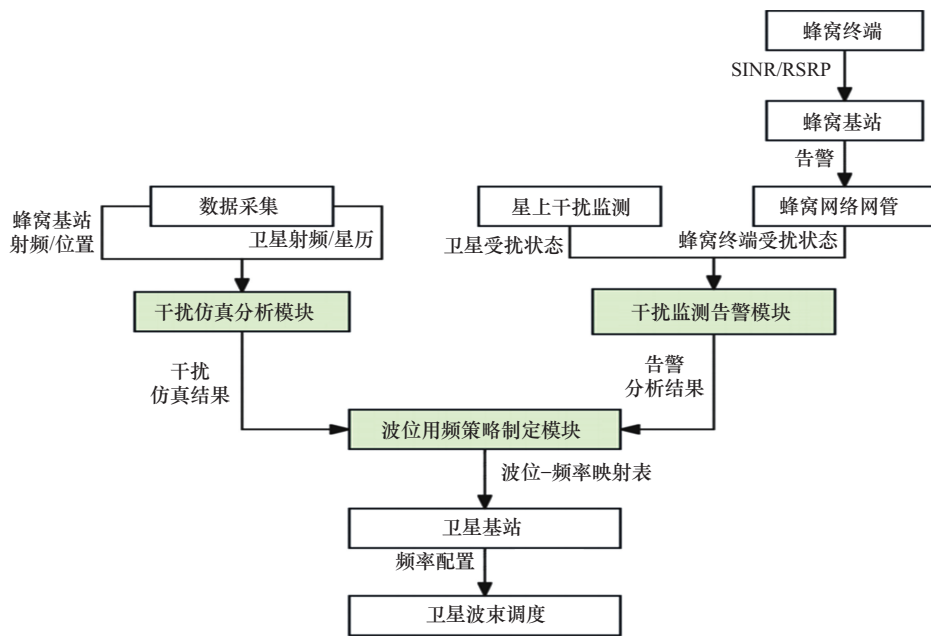


图3 面向星地频率共享的智能协作接入网架构的工作流程图

覆盖范围，但却会导致频谱利用率显著降低。可见，卫星覆盖范围与频谱利用率互为矛盾。

此外，低轨卫星高速移动、卫星波束灵活跳变，这使得星地之间的干扰关系处于持续动态变化之中，进一步加剧了星地频率共享的复杂性。针对上述问题，本文考虑波位作为卫星覆盖的最小单元，基于面向星地频率共享的智能协作接入网架构，提出一种波位级星地频率动态共享方案，该方案涵盖了波位级用频策略制定、波位级用频策略下发，以及基于反馈的策略修订。

(1) 波位级用频策略制定

结合干扰仿真分析模块输出的干扰仿真结果以及干扰监测告警模块收到的告警信息，波位用频策略制定模块以星地频率共享兼容性要求为准则制定波位级的用频策略，其以卫星网络波位与频率的映射表的形式给出，指示了卫星移动情况下在服务特定波位时于各个时间区间内的同频与邻频可用状态。

为降低波位与频率的映射表的数据量，可以考虑选择卫星入境至出境时间段内最严重的干扰情况作为代表制定用频策略，实现波位与频率的单一映射，波位与频率单一映射见表1。

表1 波位与频率单一映射

波位号	下行用频	上行用频
<i>I</i>	同频频段 W_1^{DL}	邻频频段 W_2^{UL}
...
<i>K</i>	邻频频段 W_2^{DL}	同频频段 W_1^{UL}

对于波位与频率单一映射的情况，不同波位具有不同的用频策略，同一波位在不同时刻的用频策略相同，波位与频率单一映射对应的波位用频情况示意图如图4所示。

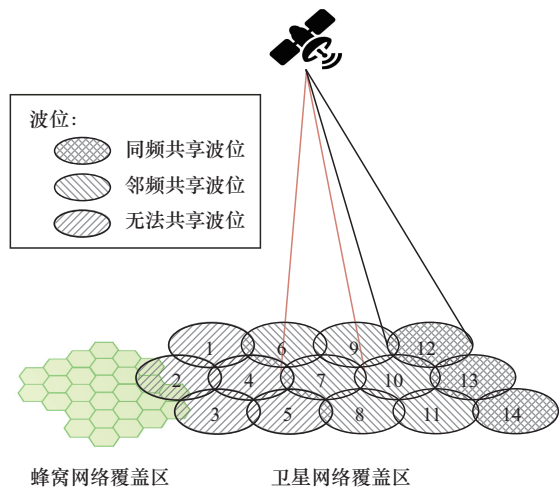


图4 波位与频率单一映射对应的波位用频情况示意图



为提升波位用频的灵活性和频谱利用率，可以考虑在不同时间段为波位设定不同的用频策略，实现波位与频率的动态映射，波位与频率动态映射见表2。

对于波位与频率动态映射的情况，不同波位具有不同的用频策略，同一波位在不同时刻的用频策略也有所不同，波位与频率动态映射对应的波位用频情况示意图如图5所示。

为提升波位级用频策略制定的准确性，波位用频策略制定模块还可引入深度学习技术对频谱状态进行长周期趋势预测^[19]。例如，利用历史频谱占用数据（如过去7天的频段使用情况），通过循环神经网络（recurrent neural network, RNN）学习频谱使用的周期性规律（如工作日/周末的用频差异）。模型以天为单位输入数据，输出未来24 h的频段干扰概率分布，并结合干扰仿真结果及干扰告警信息，自动调整该时段的卫星波位用频策略。此外，还可以采用长短期记忆（long short-term memory, LSTM）网络对卫星轨道周期内的干扰变化进行预测，输入卫星星历（轨道

高度、过顶时间）与地面用户密度统计数据（如每小时更新的用户密度热力图），输出未来数小时的干扰功率趋势，为波位级用频策略提供时间窗口划分依据。

(2) 波位级用频策略下发

星地智能动态协作网元向卫星基站下发波位与频率映射表。基于此映射表，卫星基站能够明确指向特定波位的频率资源，从而灵活开展上下行频率配置与调度工作。当波束跳变至同频/邻频可用波位时，卫星基站可依据映射表动态调度相应的同频/邻频资源，兼顾卫星覆盖范围和频谱利用率。

为节省星地频率同频/邻频动态共享下的终端功耗，考虑引入波位级系统信息块（system information block, SIB）配置，以实现波位级初始带宽部分（bandwidth part, BWP）及缺省BWP的精准配置。具体而言，卫星网络依据波位与频率的映射关系，在邻频可用波位时针对终端设备配置基于邻频资源的BWP；在同频可用波位时，则根据实际需求为终端配置基于同频资源的BWP。通过波位级广播消息的下发，实现对整个波位覆

表2 波位与频率动态映射

临界时刻	T_0 时刻	T_1 时刻	T_2 时刻	T_3 时刻
卫星 j 服务波位 k 时的下行用频	同频频段 W_1^{DL}	邻频频段 W_2^{DL}	邻频频段 W_2^{DL}	同频频段 W_1^{DL}
卫星 j 服务波位 k 时的上行用频	同频频段 W_1^{UL}	同频频段 W_1^{UL}	邻频频段 W_2^{UL}	异频频段 W_3^{UL}
...

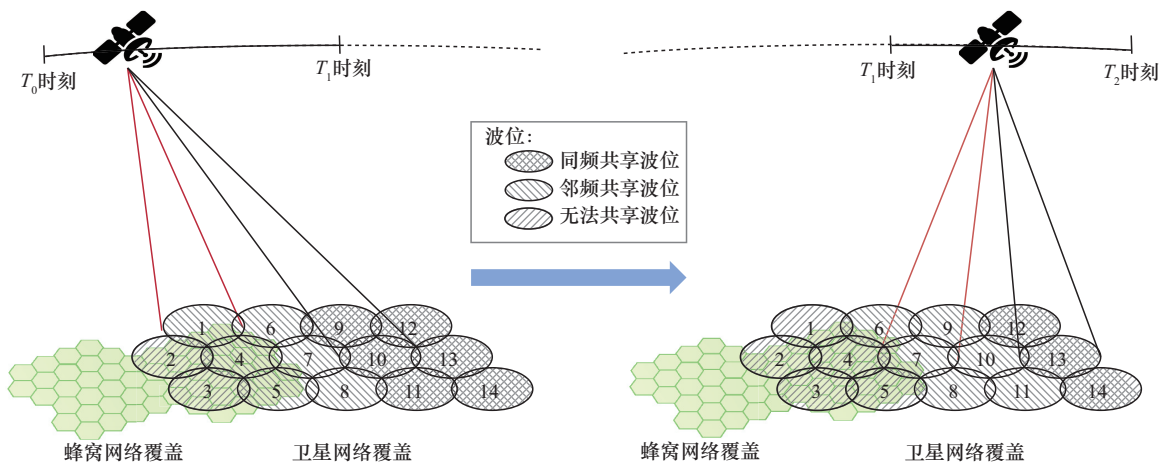


图5 波位与频率动态映射对应的波位用频情况示意图

盖范围内的用户进行统一的BWP配置，匹配单星不同波位下兼容性不同导致的用频策略不一致的情况。

对于波位与频率动态映射表来说，还应考虑随着映射表带来的BWP切换问题。卫星基站具有不同波位的频率策略及对应调整时间，可根据对应策略进行无线资源控制（radio resource control, RRC）配置可选的BWP集合，提前下发下行控制信息（downlink control information, DCI）指示终端进行切换。同时，也可根据动态映射表引入基于时间模式（time pattern）的BWP切换。

（3）基于反馈的策略修订

由于星地干扰具有动态变化的特性，为提高星地频率共享系统的鲁棒性，本文提出一种基于反馈的策略修订机制。

对于蜂窝终端受卫星下行干扰的情况，蜂窝终端周期性地向基站上报下行SINR及参考信号接收功率（reference signal received power, RSRP），一旦小区范围内蜂窝终端的底噪抬升至超过预先设定的受扰门限，蜂窝基站便会触发告警机制，将小区位置、异常时间范围以及底噪抬升范围等告警信息上报至蜂窝网络网管，最终上传至星地智能动态协作网元。

对于卫星受广域蜂窝终端上行干扰的情况，卫星网络实时监测各卫星波束在对应波位提供服务期间的受干扰状况，超出受扰门限时触发告警，卫星网络会将涉及的服务卫星、星历信息、异常时间范围、服务波位，以及干扰强度/底噪抬升范围等告警信息上报至星地智能动态协作网元。

星地智能动态协作网元中的干扰监测告警模块将对卫星网络和地面网络上报的告警信息进行统一的分析与处理，结合存储的卫星星历信息和波束跳变图样，确定卫星及地面网络受扰告警是否与卫星波束基于共享频率服务特定波位相关。若相关，波位用频策略制定模块更新波位与频率

的映射表，并下发至卫星网络更新用频策略，保障星地融合系统的稳定运行。

4 结束语

本文聚焦星地融合网络中的星地频率共享这一关键领域。首先，分析阐述了星地融合频率共享系统的干扰类型，并介绍了兼容性分析方法。随后，提出一种面向星地频率共享的智能协作接入网架构，通过增设星地智能动态协作网元实现频率共享高效管控。基于此架构，设计了波位级星地频率动态共享方案，通过精准制定、及时下发以及灵活修订波位级用频策略，有效提升卫星覆盖范围与频谱利用率。期望本文能为星地融合网络频率共享技术的深入研究提供有价值的参考与借鉴。

参考文献：

- [1] 刘杨, 彭木根. 星地融合智能组网: 愿景与关键技术[J]. 北京邮电大学学报, 2021, 44(6): 1-12.
LIU Y, PENG M G. Satellite-ground fusion intelligent networking: vision and key technologies[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021, 44(6): 1-12.
- [2] 中国移动通信研究院. 面向6G的天地一体融合网络技术白皮书[R]. 北京: 中移智库, 2024.
China Mobile Research Institute. White paper on integrated space-air-ground network technology for 6G[R]. Beijing: China Mobile Think Tank, 2024.
- [3] 翁玮文, 程锦霞, 刘京, 等. 基于星地协同组网的天地一体关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 3-10.
WENG W W, CHENG J X, LIU J, et al. Key technical research of space-terrestrial integrated network based on satellite-terrestrial collaborative networking[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 3-10.
- [4] 李思栋, 李侠宇, 孙建成, 等. 手机直连卫星应用发展与挑战[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 43-55.
LI S D, LI X Y, SUN J C, et al. Development and challenges of direct-to-handset satellite communication[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(4): 43-55.
- [5] 刘悦, 田野, 赵冬, 等. 手机直连低轨卫星的应用场景及业务需求分析[J]. 电信科学, 2024, 40(4): 56-65.
LIU Y, TIAN Y, ZHAO D, et al. Analysis on application scenarios and requirements for direct-to-handset LEO satellite[J].



- Telecommunications Science, 2024, 40(4): 56-65.
- [6] 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.
- [7] 瞿重希, 毛浩斌, 许憧, 等. 面向6G的星地融合网络频谱共享技术[J]. 中兴通讯技术, 2024, 30(4): 50-56.
QU C X, MAO H B, XU C, et al. Spectrum sharing technology for satellite-terrestrial integrated networks towards 6G[J]. ZTE Technology Journal, 2024, 30(4): 50-56.
- [8] 牛憶莹, 周瑶, 刘吉凤, 等. 面向5G与低轨卫星网络融合的频谱共用研究[C]//5G网络创新研讨会(2022)论文集. 北京: 中国联通研究院, 2022: 436-441.
NIU Y Y, ZHOU Y, LIU J F, et al. Research on spectrum sharing for the integration of 5G and low earth orbit satellite networks[C]// Proceedings of the 5G Network Innovation Symposium (2022). Beijing: China Unicom Research Institute, 2022: 436-441.
- [9] 丁鲜花, 陈媛, 简晨, 等. IMT频段手机直连卫星系统对地面蜂窝网络的干扰分析[J]. 信息通信技术, 2023, 17(6): 56-62.
DING X H, CHEN Y, JIAN C, et al. Interference analysis between direct-to-cellular and cellular network in the frequency band identified for IMT[J]. Information and Communications Technologies, 2023, 17(6): 56-62.
- [10] CHENG T B, ZHOU F. Integrated interference solutions between 5G and satellite systems[C]//Proceedings of the 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP). Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-5.
- [11] 简晨, 陈媛, 倪文钰. Starlink手机直连卫星系统对地面IMT系统的干扰仿真分析[J]. 中国无线电, 2024(8): 33-38.
JIAN C, CHEN Y, NI W Y. Simulation analysis of interference of Starlink mobile phone direct satellite system to ground IMT system[J]. China Radio, 2024(8): 33-38.
- [12] 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.
- [13] CHAN S, LEE H, KIM S, et al. Intelligent low complexity resource allocation method for integrated satellite-terrestrial systems[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(5): 1087-1091.
- [14] FCC. Application for mobile satellite service by space exploration holdings, LLC: attachment direct-to-cell_MSS_T, file number: SATMOD-20230207-00021 [R]. 2023.
- [15] 工业和信息化部无线电管理局. 中国代表团完成国际电信联盟无线电通信部门第四研究组会议参会任务[EB]. 2024. Ministry of Industry and Information Technology (MIIT) Radio Administration Bureau. The Chinese delegation completes participation in the ITU radiocommunication sector fourth study group (SG4) meeting[EB]. 2024.
- [16] 梁刚毅, 许斌, 朱勤伟. 5G通信基站对邻频C波段卫星地球站干扰的分析与处置[J]. 移动通信, 2020, 44(3): 89-96.
LIANG G Y, XU B, ZHU Q W. Interference analysis and disposal of 5G communication base station to adjacent C-band satellite earth station[J]. Mobile Communications, 2020, 44(3): 89-96.
- [17] ITU. Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies: Recommendation ITU-R M.2101-0[R]. Geneva: ITU, 2017.
- [18] China. PFD values for protection of terrestrial IMT under WRC-27 agenda item 1.13[R]. Radiocommunication Study Groups, ITU, 2025.
- [19] 苏春林, 周晓玲, 桂振文, 等. 基于深度学习的卫星频谱感知和信噪比估计模型研究[J]. 移动通信, 2025, 49(4): 113-120.
SU C L, ZHOU X L, GUI Z W, et al. Deep learning-based spectrum sensing and SNR estimation for satellite communications[J]. Mobile Communications, 2025, 49(4): 113-120.

[作者简介]



伊鹏飞 (1994-), 男, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为5G-Advanced/6G天地一体化技术。



杜琴 (1995-), 女, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要研究方向为天地一体化。



张鹏 (1983-), 男, 中国移动通信集团有限公司计划建设部无线网络处经理、高级工程师, 主要研究方向为4G/5G网络规划建设、5G-Advanced/卫星互联网空天地一体化技术等。



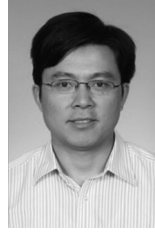
吴泽华 (1989-), 男, 中国移动通信集团有限公司计划建设部无线网络处项目经理、工程师, 主要研究方向为卫星互联网、应急通信保障等。



程锦霞 (1981-), 女, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, CCSA TC13 WG1 副组长、IMT-2020 5G 应用工作组组长, 主要研究方向为天地一体化、面向垂直行业的 5G 专网及 5G 工业互联网。



王锐 (1983-), 女, 中国移动通信集团有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为 5G-Advanced/6G 天地一体化技术。



邓伟 (1978-), 男, 中国移动通信有限公司研究院星地融合技术研究所所长、正高级工程师, CCSA TC12 副主席, 主要研究方向为 4G、5G 行业网技术及应用、5G-Advanced/6G 天地一体化技术等。