

面向6G的星地融合网络频谱共享技术



Spectrum Sharing Technology for Satellite-Terrestrial Integrated Networks Towards 6G

瞿重希/QU Chongxi, 毛浩斌/MAO Haobin, 许懂/XU Chong, 张远钧/ZHANG Yuanjun, 肖振宇/XIAO Zhenyu

(北京航空航天大学, 中国 北京 100191)
(Beihang University, Beijing 100191, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20240722.0937.002.html>

网络出版日期: 2024-07-22

收稿日期: 2024-06-12

摘要: 卫星网络被认为是下一代移动通信系统的重要组成部分, 其与现有的地面蜂窝网络实现优势互补形成星地融合网络, 可以为全球范围内的海量用户提供无处不在的宽带接入服务。而两网如何高效共享有限的频谱资源、缓解同频共存干扰成为当前的技术难点与热点问题之一。分析了星地融合网络频谱共享时存在的典型干扰类型, 并对星地频谱共享场景中系统间干扰进行了仿真。介绍了星地频谱共享需要进一步研究的关键技术, 并总结了星地融合网络频谱共享面临的挑战。

关键词: 6G; 星地融合网络; 频谱共享; 同频干扰

Abstract: Satellite network has been widely recognized as an indispensable part of the next-generation mobile communication system, which together with the existing terrestrial cellular network can provide ubiquitous and wideband access service for massive users worldwide by taking the advantages of each to form satellite-terrestrial integrated network. How to efficiently share the limited spectrum resources between the two networks and mitigate coexistent interference has become one of the current technical difficulties and hot topics. The typical types of interference existing in the spectrum sharing of satellite-terrestrial integrated network are analyzed, and the inter-system interference is simulated. The potential key technologies for spectrum sharing in the satellite-terrestrial integrated network are analyzed, and the challenges of spectrum sharing in the satellite-terrestrial integrated network are summarized.

Keywords: 6G; satellite-terrestrial integrated network; spectrum sharing; co-channel interference

引用格式: 瞿重希, 毛浩斌, 许懂, 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. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008

Citation: 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. DOI: 10.12142/ZTETJ.202404008

地面蜂窝通信系统经过了几十年的商业化发展与部署, 已经基本满足人口密集地区的大带宽与低延时的网络接入需求。然而, 全球地面移动通信服务目前只能覆盖约20%的陆地面积、约6%的地球表面积。在灾害应急情况下, 地面网络易瘫痪且难以维护, 尚未满足用户对网络覆盖广度和深度的要求。相比于地面蜂窝网络, 卫星网络不受地形与地域的限制, 容灾性强, 可以满足海量异构天基、空基、陆基、海基用户的全时信息传输需求, 已经被公认为是第6代(6G)移动通信系统的关键组成部分。然而, 卫星网络和地面蜂窝网络长期以来处于独立运作的状态。为了满足未来全时全域立体空间人-机-物随遇接入与智能

连接需求, 卫星网络与地面蜂窝网络已经进入融合式发展的新阶段, 即卫星网络作为地面蜂窝网络的有效补充和延伸, 共同为用户提供连续稳定的宽带连接服务^[1]。

星地融合呈现出从以前的业务融合到现在的体制融合, 进一步到未来的系统融合的发展趋势^[2]。当前阶段, 为了解频谱资源愈发匮乏与用户多样化业务需求快速增长之间的矛盾, 不同于以往卫星网络与地面蜂窝网络采用频率硬性分割使用的方式, 卫星通信系统与地面蜂窝网络协同复用频率资源已经成为一种潜在的解决方法。例如, 在2017年1月, 美国联邦通信委员会(FCC)就允许在已经用于固定卫星服务的12.2~12.7 GHz频段内进行5G运营征求意见

见^[3]。此外，美国 T-Mobile 与 SpaceX 在 2022 年 8 月也宣布计划利用 T-Mobile 的频谱由 SpaceX 提供农村地区的移动服务，这项合作旨在解决频谱稀缺问题，并扩展覆盖范围。

然而，星地频谱共享必然带来复杂的同频干扰，这限制了网络的频谱利用效率，也成为星地融合网络所面临的重要挑战之一。为此，本文首先讨论了面向 6G 的星地融合网络中存在的典型的干扰类型，对星地下行系统间的干扰强度进行仿真评估，并基于前述分析与仿真结果，给出了星地融合网络中有前景的频谱共享关键技术，最后结合当前技术发展现状，分析了星地融合网络频谱共享面临的挑战及未来的研究方向。

1 星地融合网络频谱共享干扰分析

在星地融合网络频谱共享场景中不可避免地会存在同频干扰^[4]，这对星地融合网络的通信性能造成严重影响。因此，需要对星地融合网络频谱共享时存在的同频干扰类型进行分析，从而可以精准设计干扰管理方案，最大化星地融合网络频谱共享系统效益。

1.1 波束间干扰

卫星通信系统通常产生多个点波束覆盖地面区域，通过在不同的波束之间复用相同的频谱，从而提高频谱利用效率和系统的吞吐量。然而在实际应用中，无法产生与其他波束完全空间隔离的理想点波束，因此会产生波束间干扰 (IBI)，特别是位于两个波束边缘的用户会受到严重的同频干扰。

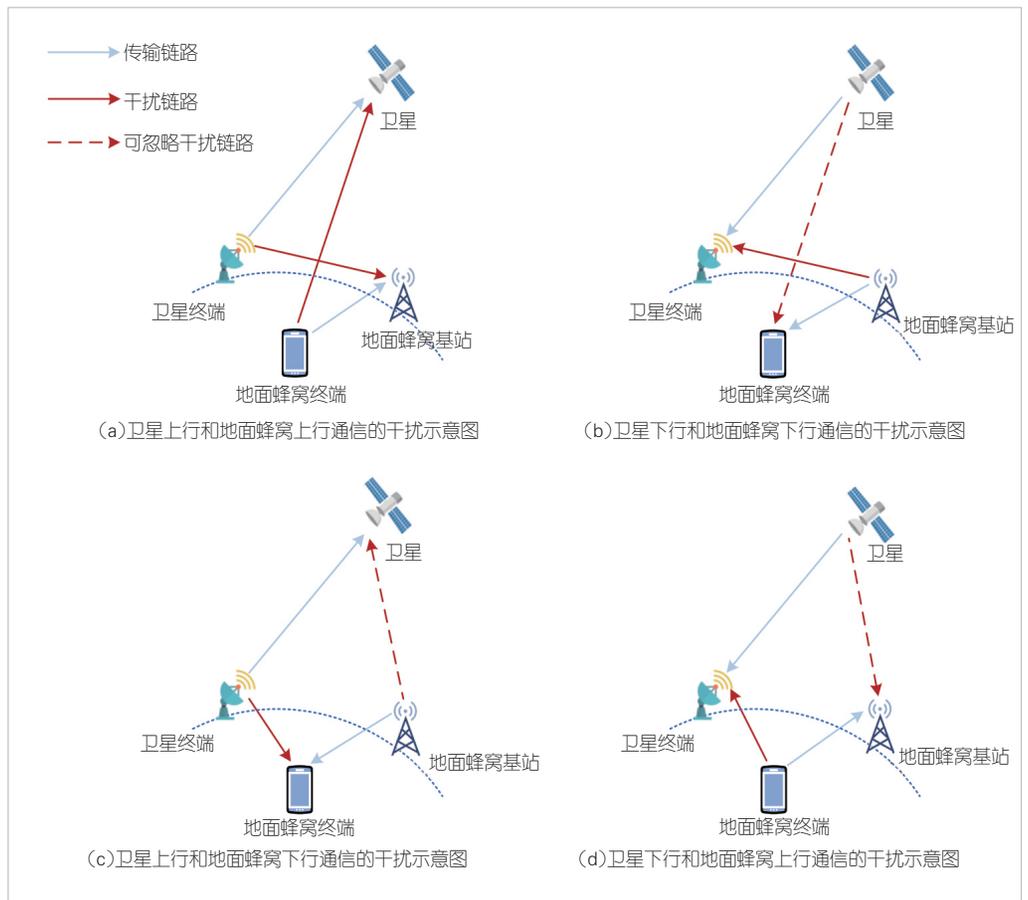
1.2 波束内干扰

在未来移动通信场景中，潜在的地面用户数量将远远大于波束数量。而且，在卫星通信系统中，在每个波束覆盖范围内同一时间都有大量用户需要接入网络。若采用传统正交多址方式进行接入，波束内的用户虽然不存在同频干扰，但传

统正交多址方式的时频资源有限，难以满足大量用户的接入需求。新型多址接入技术，如非正交多址接入 (NOMA)、速率分割多址接入 (RSMA) 等，可以有效缓解这一问题，但又不可避免地引入了同波束内的用户间同频干扰 (IUI)。

1.3 系统间干扰

星地融合网络频谱共享系统由卫星、卫星终端、地面蜂窝基站以及地面蜂窝终端组成。由于卫星网络和地面蜂窝网络应用相同频段为地面终端提供接入服务，因此会产生系统间干扰 (ISI)。对于地面蜂窝基站，其天线通常具有向下倾角，发射信号的仰角通常较小、且在近似水平的平面上传播，因此，地面蜂窝基站对卫星的干扰很小，可以忽略；对于卫星，其位置距离地面蜂窝基站和地面蜂窝终端较远，因此，卫星对地面蜂窝基站和地面蜂窝终端的干扰很小，可以忽略。在此条件下，根据卫星网络和地面蜂窝网络上下行传输情形，系统间干扰存在 4 种情况，如图 1 所示。



▲图1 星地融合网络频谱共享系统间干扰典型情况示意图

1) 当卫星网络上行链路和地面蜂窝网络上行链路应用相同频段时,地面蜂窝终端会对卫星产生干扰,同时卫星终端也会对地面蜂窝基站产生干扰。当卫星波束覆盖范围大,地面蜂窝基站终端数量多时,大量地面蜂窝基站终端对卫星会引起聚合干扰。卫星终端若采用全向天线,会对地面蜂窝基站产生同频干扰;卫星终端若采用定向天线,其波束指向性高,而地面蜂窝基站波束指向通常具有向下倾角,则卫星终端的波束旁瓣会对地面蜂窝基站造成同频干扰。

2) 当卫星网络下行链路和地面蜂窝网络下行链路应用相同频段时,地面蜂窝基站会对卫星终端产生干扰。由于地面蜂窝基站的波束指向性较高,当卫星终端配置定向天线时,若其波束主瓣正好指向地面蜂窝基站的波束,则会产生严重的同频干扰;否则,地面蜂窝基站对卫星终端造成旁瓣干扰。当卫星终端配置全向天线时,也会造成同频干扰。

3) 当卫星网络上行链路和地面蜂窝网络下行链路应用相同频段时,卫星终端会对地面蜂窝基站终端产生干扰。当卫星终端采用全向天线时,对地面蜂窝终端产生的干扰一般较低,但当卫星终端的数量多时会造成聚合干扰;当卫星终端采用定向天线时,其波束指向性较高,其波束旁瓣会对地面蜂窝终端造成同频干扰。

4) 当卫星网络下行链路和地面蜂窝网络上行链路应用相同频段时,地面蜂窝基站终端会对卫星终端产生干扰。地面蜂窝终端一般采用全向天线,对卫星终端的波束旁瓣干扰较低,但当地面基站终端数量较多时会造成聚合干扰。

网络组成。其中,卫星网络由一颗多波束低轨卫星和卫星终端组成,地面蜂窝网络由卫星波束覆盖范围内的地面蜂窝基站和地面蜂窝终端组成。假设卫星网络和地面蜂窝网络都采用频分双工(FDD)模式,当卫星网络和地面蜂窝网络使用相同频段进行通信时,根据传输模式的不同可以分为同向模式和反向模式^[5]。同向模式指卫星网络与地面蜂窝网络的上行链路和下行链路分别使用同一频段,而反向模式指卫星网络的上(下)行链路与地面蜂窝网络系统的下(上)行链路使用同一频段,如图2所示。

2.2 仿真结果与分析

由于合理设计跳变图样可以实现波束间地理空间隔离^[6],故在本文仿真中忽略波束间干扰。仿真中,设置载波频率为2 GHz,带宽为1.6 MHz。地面蜂窝基站的部署密度为0.1 BS/km²,每个地面蜂窝基站由3个扇区组成,每个扇区装配下倾角为7°的天线,采用TR 38.863中的天线模型。设置低轨卫星高度为600 km,采用TR 38.863 6.2.3.1节中的天线模型,其3 dB角设置为4.4°。地面蜂窝终端和卫星终端采用增益为0 dB的全向天线。地面蜂窝基站、卫星和终端的发射功率分别为26 dBm/MHz、53 dBm和23 dBm^[7]。

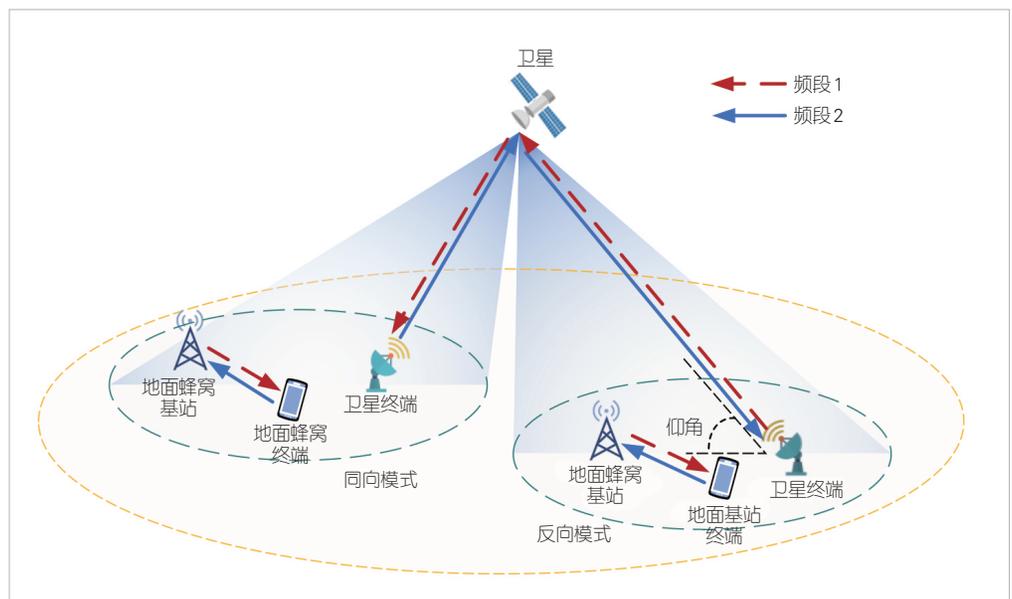
图3、图4分别显示了当地面蜂窝基站和地面蜂窝终端所接收的有用信号的功率为-85 dBm时,卫星网络对地面蜂窝基站和地面蜂窝终端的干扰情况。从图3可以看出,即使在干扰最强的地方,地面蜂窝终端接收信号的信干噪比也可以保证在-10 dB以上,满足5G新无线技术设备的最低要求^[5],也即卫星对地面蜂窝终端的干扰程度较小,可以

2 星地融合网络频谱共享系统间干扰仿真分析

星地融合网络频谱共享场景中系统间干扰对通信质量造成严重影响,降低了系统资源利用效率。为了提出有效的干扰抑制方案,本节通过仿真评估系统间干扰对地面蜂窝网络和卫星网络信干噪比的影响程度,并分析其原因。

2.1 仿真场景

星地融合网络频谱共享场景由卫星网络和地面蜂窝



▲图2 星地融合网络频分双工(FDD)模式下频谱共享场景

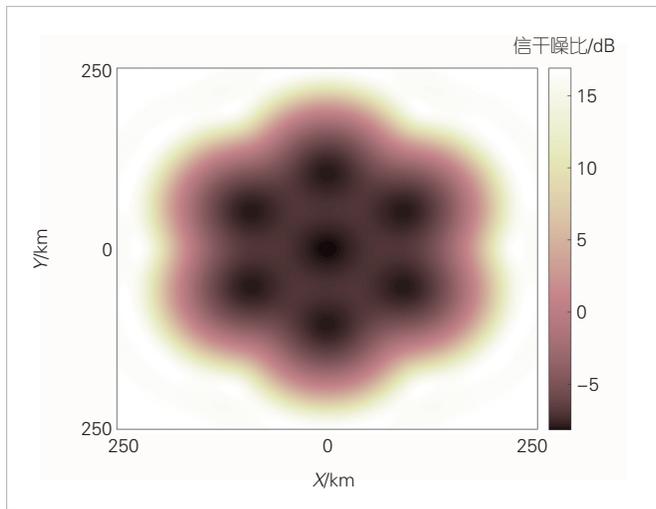
忽略。从图4可以看出，地面蜂窝基站接收信号的信干噪比都在15 dB以上，有卫星覆盖区域和无卫星覆盖区域的信干噪比相差不大，这是由地面蜂窝基站天线的下倾角所导致的。说明卫星对地面蜂窝基站的干扰程度很小，也可以忽略。这与1.3节的干扰分析一致。

图5、图6分别显示了在卫星网络上、下行链路中，在同向模式、反向模式以及无频谱共享场景下，随卫星终端与卫星间仰角变化平均信干噪比的变化情况。可以看出，随着卫星终端与卫星间仰角的增大，卫星网络上、下行链路的平均信干噪比都会增加。这主要是由于随着仰角的增加，卫星与卫星终端间的链路衰减会减小。

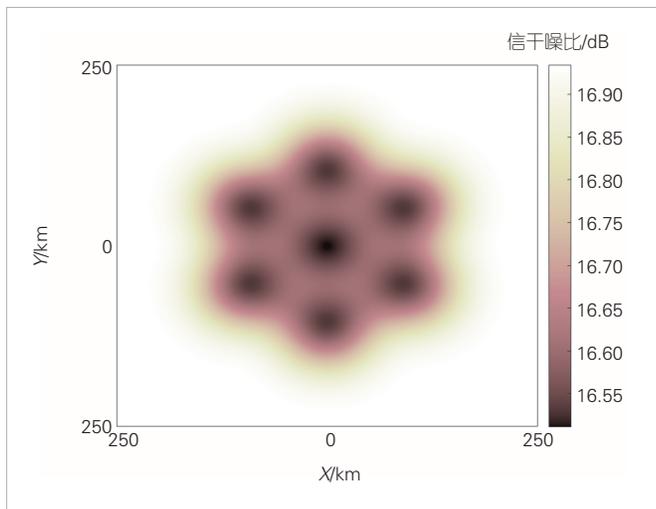
对于卫星网络上行链路而言，在同向模式中地面蜂窝终端干扰卫星，在反向模式中地面蜂窝基站干扰卫星。从图5中可以看出，无论同向模式还是反向模式，频谱共享

都导致卫星网络上行链路信干噪比出现显著下降。其中，反向模式的信干噪比比同向模式高8 dB，可以在一定程度上抑制干扰。这是由于地面蜂窝基站天线存在下倾角，天线波束在卫星方向的增益很小；而地面蜂窝终端采用全向天线，且发射功率与卫星终端相当，聚合干扰会严重影响卫星网络上行链路的信干噪比。因此，在星地融合网络频谱共享场景中，对于卫星网络上行链路而言，干扰抑制是必不可少的。

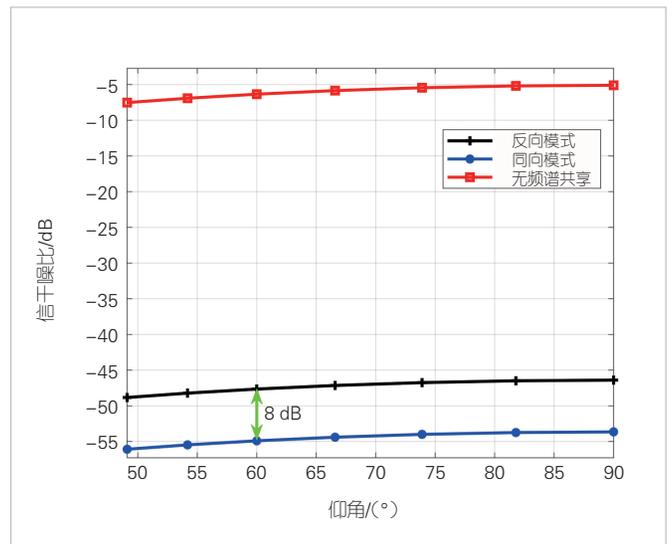
对于卫星网络下行链路而言，在同向模式中地面蜂窝基站干扰卫星终端，在反向模式中地面蜂窝终端干扰卫星终端。从图6中可以看出，在卫星网络下行场景中，反向模式的信干噪比略高于同向模式，但差别不大。这是由于



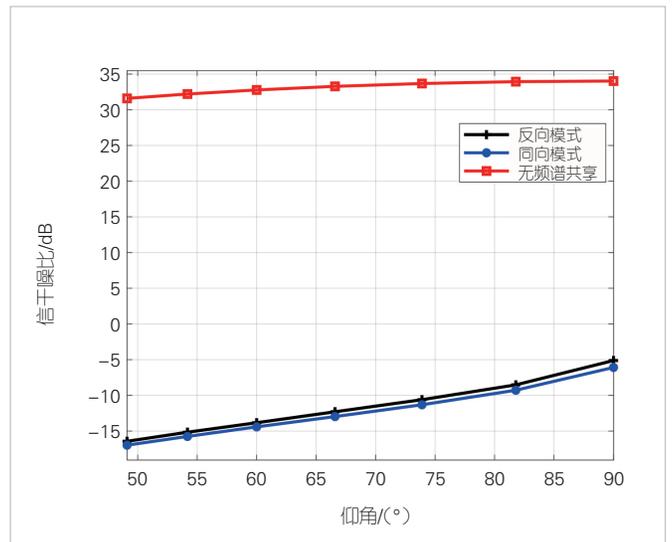
▲图3 地面蜂窝终端接收信号信干噪比



▲图4 地面蜂窝基站接收信号信干噪比



▲图5 卫星网络上行链路受干扰情况



▲图6 卫星网络下行链路受干扰情况

地面蜂窝基站发射功率大，但采用定向天线；地面基站蜂窝终端发射功率小，但采用全向天线且数量众多，故其带来的干扰程度相近。图6中频谱共享导致卫星网络下行链路信干噪比明显下降，但对于卫星网络下行场景而言，卫星终端通常位于地面蜂窝网络未覆盖或信号较差的地方，其与地面蜂窝网络存在物理空间隔离，故卫星网络下行链路在实际应用中受地面蜂窝网络干扰较小。

3 6G 星地融合网络频谱共享关键技术

为了有效抑制星地融合网络频谱共享产生的同频干扰，提升频谱利用效率，本节介绍几种潜在的星地融合网络频谱共享关键技术，为星地融合网络频谱共享的实际应用提供参考。

3.1 星地协同按需资源分配

在星地融合网络中，不同物理节点（如卫星、地面蜂窝基站等）的功率、频率、时间、存储、计算等多维资源联合按需调度可以提升网络频谱利用效率^[8]。然而，随着卫星星座规模的持续性快速增长，星间波束交叠变化复杂，星地重叠覆盖区域增大，用户间潜在通信干扰增强。并且，不同物理节点的资源特性不同，资源分布分散且不均衡，多维资源间相互作用与耦合性较强。此外，非均匀分布用户的动态海量多样化业务对通信资源调度的要求越来越高。因此，需要不同物理节点间协同进行多维资源规划，以实现星地融合网络资源的整体优化与高效利用，从而可以灵活响应用户各类服务请求，提升星地融合网络按需服务保障能力。

多层多域物理节点的多维资源可用特性是星地协同资源分配的前提，需要对多维资源类型、分布情况及使用情况等进行统一感知与表征。从而，考虑星地融合网络具有时空尺度差异大、信号传播环境动态变化等特性，从满足陆海空天各域用户的动态多元化业务需求出发，建模星地网络包括功率、频率、卫星波束跳变图案等在内的多维资源按需分配优化问题。而通常情况下，此类问题具有多目标、多约束以及多变量特性，传统数学优化求解方案难以适用。虽然诸如强化学习、图神经网络等人工智能算法在此方面具有优势，但是由于卫星等非地面节点受到平台体积、功耗等约束，可用计算资源严重受限，需要构建适用于星地协同处理的算力平台，从而可以实现系统多维资源统一高效管理方案的快速生成与执行，进一步满足异构节点多维资源与海量用户多样需求间的动态适配性要求。

3.2 星地联合波束赋形

由于星地无线信号传输距离远，信号传播环境复杂，星地间信号传输路径损耗高，星地融合网络频谱效率低，难以满足未来更加多样化的用户通信服务需求。在星上使用阵列天线技术有助于解决这一问题，大规模的阵列天线可以通过在发射端配备数百个天线以获得显著的波束增益。当前，星载阵列天线技术也得到了业界的广泛关注^[9]。此外，相比于阵列天线，新兴的可移动天线技术^[10]通过机械结构带动天线在空间内移动、旋转，最多可获得六维的空间自由度，通过将联合优化天线位置和波束赋形向量，可以实现更加灵活的波束赋形，有效抑制功率泄露，降低干扰。然而，星地融合网络中终端位置、业务需求、可用资源处于高度动态变化状态，需要实现星地联合波束赋形，协同控制卫星和地面蜂窝基站的的天线阵列，以提高信号覆盖质量，降低同频干扰强度。

地面蜂窝网络的波束赋形技术通过控制天线波束指向目标终端方向，以提供高速、低延迟的通信服务；卫星则通过灵活波束赋形实现波束按需跳变，保证地面按需覆盖。两者需要通过联合波束赋形在实现热点地区保证覆盖的同时，有效降低两系统间的同频干扰，大幅提升资源利用效率。然而，波束赋形权重的优化通常与时、频、功率等资源的分配高度耦合，这会导致建模问题具有高度非凸性，难以直接采用传统数学优化方法求解，而低复杂度的高效深度学习算法解决此类问题具有优势。在实际应用中，还需要构建星地全局信息共享机制，搭建星地联合波束赋形控制平台，以充分发挥星地联合波束赋形的优势，提升系统吞吐量。

3.3 智能频谱态势感知与利用

基于频谱态势感知结果进行星地融合网络空闲频谱资源利用，是缓解可用频谱短缺问题的有效途径之一^[11]。然而，一方面，星地融合网络异构终端节点数量多，分布范围分散，海量感知数据不可避免地会增加星地传输链路负担，且在传输过程中不可避免地发生数据错误；另一方面，星地传输链路信道变化速度快、信号传播时空尺度差异大，频谱感知结果滞后性强。因此，如何充分利用海量感知数据提升频谱态势感知准确度，如何基于当前频谱态势感知结果提前获知未来频谱占用状态，如何基于感知与预测结果实现频谱资源高效利用是亟待解决的难题。

为了保证卫星网络不对现有地面蜂窝网络造成严重干扰，卫星网络需要充分利用节点局部感知数据从空间、时间等多维度进行频谱态势感知，有效利用多节点空间分布

差异性特征,设计联合异常数据修正与分布式协作感知算法,实现低开销、高精度的频谱态势感知。从而可以基于当前态势感知结果,利用长短期记忆神经网络预测当前区域未来频谱占用状态,有效克服星地传输时延大导致频谱感知结果滞后的问题。进一步地,可以基于星地重叠覆盖区域内的频谱态势感知结果,设计卫星终端实时接入地面蜂窝网络空闲频谱的强化学习算法,通过集中式训练与分布式执行,实现频谱资源高效利用,最大程度抑制卫星网络对地面蜂窝网络造成的同频干扰,实现星地融合网络系统效益最大化。

3.4 新型多址接入技术

随着工业物联网、低空智联网、远程医疗等各种新兴应用的快速发展,全球范围内的终端连接数量日益增长。而传统移动通信系统采用的正交多址接入方案的资源池有限,系统容量较低,难以支撑6G海量终端设备的接入需求。新型多址接入技术利用非正交性的思想,如NOMA、RSMA等,基于先进的信号处理技术,通过支持多个终端设备同时同频同空域传输,可以有效提升系统的频谱效率。然而,准确的信道状态信息对于新型多址接入技术接收端的正确解码至关重要。并且,星地融合网络中显著增加的终端设备数量、超大规模阵列天线,以及高速动态的网络节点,都使得信道状态的准确估计更具挑战性。同时,串行干扰消除等技术也相应地提高了接收机的复杂度。此外,新型多址接入技术在星地融合网络中的应用通常也与多维资源优化高度相关。

深度学习已经被证明在信道估计方面有较好的性能,然而在星地融合网络场景中,信道状态具有高度变化和难以预测特性,需要借鉴迁移学习等鲁棒人工智能方法,实现训练模型在实际通信场景下的通用化应用能力。同时为了降低终端设备的硬件复杂度,需要设计高效率的串行干扰消除算法,实现新型多址接入技术的快速落地与应用。并且,空时频功率等多域资源的高效调度也影响着新型多址接入技术优势的充分发挥。然而,两者的联合设计具有极高挑战性,需要精准建模表征两者相互影响机理,探索非完美信道状态下高效优化求解算法,从而可以充分发挥新型多址接入技术的潜力,实现星地融合网络频谱高效共享。

4 6G星地融合网络频谱共享面临的挑战

面向6G的星地融合网络频谱共享的实际应用在星地融合网络架构、星地协同资源管控协议,以及星地融合网络

时频同步等方面还面临着诸多挑战。这些挑战严重制约着星地融合网络频谱共享系统的发展和性能。

首先,卫星网络与地面蜂窝网络当前还处于独立组网的状态,而未来的星地融合网络需要两者深度耦合,协同为地面用户提供高速无缝服务,这就亟需兼容不同组网方式的星地协同组网架构设计,实现两网的智能统一管控与运作^[12]。然而,卫星系统的体积、发射功率等指标在技术设计时均已确定,卫星载荷和星上可用资源严重受限,无法冗余部署完备的通信网元功能。如何在星上部署轻量化的虚拟化资源,提高不同/异构节点上资源的通用性,实现星上功能的重构?如何对网元功能进行裁剪和细粒度分割,并根据组网形态、业务需求、网络资源情况和节点处理能力,在卫星和地面节点之间柔性分割并合理部署网元功能?这些都是重要挑战。

其次,在星地融合网络中,卫星网络和地面蜂窝网络的覆盖范围、服务能力和通信计算资源具有显著的差异性。而卫星网络与地面蜂窝网络的覆盖性能和节点多维资源之间又相互耦合,需要组建全局统一调度的资源配置协议,实现星地网络多网多域资源联合协调与优化,提升星地融合网络的资源利用率与服务效率。

最后,在星地融合网络中,时频同步是终端成功接入地面蜂窝基站与卫星的关键一步^[13]。用户终端需要通过检测地面蜂窝基站下发的下行同步信号来进行下行时频同步。根据下行同步信号的时频位置,用户终端可以进一步地接收蜂窝基站下发的系统消息。然而,对于卫星网络,卫星与地面终端的距离较大,卫星的移动速度较快,这给地面用户终端带来了远超地面蜂窝系统的传输时延和频偏。而地面蜂窝系统现有的同步方案无法直接适用于高动态的星地融合网络场景同步需求。对于下行同步来说,用户终端需要在可能的时频位置上搜索参考信号。当时频偏移范围过大时,需要搜索的位置过多,会导致用户终端计算复杂度过大。对于上行同步来说,时频偏移远超传统随机接入前导序列能容忍的范围,这使得上行同步无法完成。因此,需要考虑基于星历信息等预测手段,实现多普勒频偏估计和星地时延补偿,完成精准星地时频同步。

5 结束语

星地融合网络是未来通信系统特别是当前手机直连卫星背景下的重要发展方向。星地两网通过频谱共享缓解优质频谱资源短缺问题也是当前业界关注的热点之一。本文对星地融合网络频谱共享存在的典型干扰类型进行了分析,并对星地频谱共享系统间干扰进行了仿真,在此基础上,

介绍了支撑星地融合网络频谱共享的关键技术，并分析其面临的挑战，为未来星地融合网络频谱共享提供参考与借鉴。

参考文献

[1] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1003-3114.2023.05.002

[2] 徐晖, 缪德山, 康绍莉, 等. 面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 1-10. DOI: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200201

[3] FCC. Expanding flexible use of the 12.2-12.7 GHz band [EB/OL]. (2021-06-22) [2024-06-10]. <https://www.federalregister.gov/documents/2021/06/22/2021-12947/expanding-flexible-use-of-the-122-127-ghz-band>

[4] PENG D Y, HE D X, LI Y, et al. Integrating terrestrial and satellite multibeam systems toward 6G: techniques and challenges for interference mitigation [J]. IEEE wireless communications, 2022, 29(1): 24-31. DOI: 10.1109/MWC.002.00293

[5] 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. DOI: 10.1109/MWC.001.2300209

[6] GUO Q, CUI G F, HE M M, et al. Multi-dimensional resource allocation strategy for LEO multi-satellite beam hopping systems [C]//Proceedings of 9th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2023: 301-305. DOI: 10.1109/ICCC59590.2023.10507281

[7] LEE H W, CHEN C C, LIAO C I S, et al. Interference mitigation for reverse spectrum sharing in B5G/6G satellite-terrestrial networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2024, 73(3): 4247-4263. DOI: 10.1109/TVT.2023.3328599

[8] 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

[9] 焦凌霄, 李文静, 董建飞, 等. 面向手机直连的星载相控阵: 关键技术与未来展望 [J]. 电信科学, 2024, 40(4): 30-42. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024096

[10] SHAO X D, JIANG Q J, ZHANG R. 6D movable antenna based on user distribution: modeling and optimization [EB/OL]. (2024-03-12)[2024-06-10]. <http://arxiv.org/abs/2403.08123>

[11] 杨宁, 郭道省. 星地融合网络中基于三维频谱感知的空时频谱机会检测 [J]. 天地一体化信息网络, 2022(4): 67-74

[12] 邓伟, 赵琳, 翁玮文, 等. 面向星地协同的接入网架构与关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2023(3): 12-22

[13] 周文慧. 面向新一代低轨卫星的时频同步设计及同步算法研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2024

作者简介



瞿重希, 北京航空航天大学在读硕士研究生; 主要研究领域为星地融合网络干扰分析及干扰缓解技术。



毛浩斌, 北京航空航天大学在读博士研究生; 主要研究领域为空天安全通信与网络资源调度技术。



许懂, 北京航空航天大学在读博士研究生; 主要研究领域为卫星通信网络、卫星随机接入和信道编码。



张远钧, 北京航空航天大学硕士研究生; 主要研究领域为卫星波束赋形抗干扰技术。



肖振宇, 北京航空航天大学电子信息工程学院教授、爱思唯尔中国高被引学者; 研究方向包括天地一体化、无人集群网络、空天阵列通信等; 曾获国家技术发明奖二等奖、中国电子学会自然科学奖一等奖、中国出版政府奖等多项国家级、省部级科研教学奖励; 已发表论文150余篇。