

手机直连 NGSO 卫星业务中扩展 L 频段频率协调方案研究

王丽冲, 孙晨华, 赵伟松, 刘 全, 卢 山

(中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081)

摘 要: 在目前非对地静止轨道 (NGSO) 卫星移动业务用频越来越紧张的趋势下, 针对手机直连 NGSO 卫星业务频率协调工作复杂的问题, 首先对手机直连 NGSO 卫星系统的用频现状及趋势进行分析, 其次重点对手机直连 NGSO 卫星业务在扩展 L 频段和其他同频空间业务的频率协调方案进行分析和研究。通过分析手机直连 NGSO 卫星业务在扩展 L 频段的频率协调态势确定需要与之开展频率协调工作的空间业务, 基于和每一项空间业务的频率协调方案进行研究并给出协调方案建议, 同时还对具体协调方案中涉及的干扰分析计算进行举例。以上研究均可作为手机直连 NGSO 卫星业务系统开展同频频率协调相关研究及下一步手机直连 NGSO 卫星关键技术研究等相关工作的参考。

关键词: 手机直连 NGSO 卫星业务; 扩展 L 频段; 空间业务; 频率协调

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024016

Research on Extended L-Band Frequency Coordination Scheme in Mobile Direct Connection to NGSO Satellite Service

WANG Lichong, SUN Chenhua, ZHAO Weisong, LIU Quan, LU Shan

The 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: At present, the frequency of non-geostationary orbit(NGSO) mobile satellite service is becoming more and more tense. Aimed at the complicated problem of frequency coordination of mobile direct connection to NGSO satellite service, firstly, an analysis was conducted on the current frequency usage status and trends of mobile direct connection to NGSO satellite service. Secondly, the frequency coordination scheme between mobile direct connection to NGSO satellite service and other same frequency space services in extended L-band was analyzed and studied. By analyzing the frequency coordination of mobile direct connection to NGSO satellite service in extended L-band, the space services that need to carry out frequency coordination work with mobile direct connection to NGSO satellite service were determined. The basic frequency coordination scheme of mobile direct connection to NGSO satellite service with each space service was studied and the coordination scheme suggestions were given, at the same time, the interference analysis and calculation involved in the specific coordination scheme were listed for example. The above research can be used as reference for the research of frequency coordination of mobile direct connection to NGSO satellite service system, as well as for the next step research of key technologies related to mobile direct connection to NGSO satellite service.

Keywords: mobile direct connection to NGSO satellite service, extended L-band, space service, frequency coordination

0 引言

自 2022 年 9 月华为公司和苹果公司相继发布了支持直连北斗卫星的 Mate 50 系列手机终端和支持直连 Globalstar 系统的 iPhone14 系列手机终端以来, 手机直连

卫星业务一直在持续发展中。中间相继经历了 2023 年 4 月 AST SpaceMobile (ASTS) 公司开展的部分存量手机和其低轨 BlueWalker-3 卫星之间的双向语音通信测试, 2023 年 8 月华为公司继续发布支持直连天通卫星的 Mate 60 Pro 系列手机终端。2024 年 1 月 SpaceX 公司开始发射的支持

收稿日期: 2024-02-01; **修回日期:** 2024-05-30

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目 (No.62231012)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62231012)

和对应频段的存量手机之间开展低速业务通信的具有手机直连功能的星链二代卫星等^[1]。同时第三代合作伙伴计划 (Third Generation Partnership Project, 3GPP) 组织的新空口非地面网络 (New Radio Non-Terrestrial Network, NR NTN) 研究中增加了 n255 (海事卫星系统在用频段) 和 n256 (天通卫星系统在用频段) 两段频率资源作为未来星地融合的候选目标频段^[2-3], 为未来手机直连卫星业务的发展提供了另一种思路以及更多的可选频段。以上与手机直连卫星业务相关的频率资源主要集中在 L/S 频段, 包括按照现有规则划分给卫星移动业务 (Mobile Satellite Service, MSS) 的频段资源以及划分给地面移动网络运营商 (Mobile Network Operator, MNO) 的地面移动业务 (Mobile Service, MS) 频率资源。以上涉及的 MSS 频段资源基本上涵盖了 L/S 频段中能用于开展全球卫星移动业务的所有频段。还有一段上下行各 7 MHz 的频段资源, 即上行 1 668~1 675 MHz/下行 1 518~1 525 MHz, 一般称为扩展 L 频段, 该频段资源虽然还未被投入手机直连卫星业务的相关试验中, 但是在目前手机直连卫星业务依旧以窄带业务为主的现状下, 该扩展 L 频段资源也是值得研究和探索的, 以便为将来手机直连卫星业务增加更多可考虑的候选频段。

目前所有的卫星业务均在国际电信联盟 (International Telecommunications Union, ITU) 《无线电规则》的规则框架下开展同频频率协调工作。随着手机直连卫星业务的快速发展, 国内外正在积极探索专用于手机直连卫星业务的频率划分及协调方案。在关于手机直连卫星业务独特的频率协调规则出现之前, 手机直连卫星业务仍属于 MSS 范畴内, 因此依然需要按照 ITU 《无线电规则》中关于 MSS 相关频率协调规则开展频率协调工作^[1], 则研究扩展 L 频段内手机直连卫星业务和其他同频业务之间的频率协调方案即是研究扩展 L 频段内 MSS 和其他同频业务之间的频率协调方案。同时考虑低时延等相关特征, 目前手机直连卫星系统更倾向于逐步向手机直连非地球静止轨道 (Non-Geostationary Orbit, NGSO) 卫星通信系统 (以低轨系统为主) 发展^[4], 因此本文主要研究手机直连 NGSO 卫星业务中使用扩展 L 频段时的频率协调方案。

按照 ITU 《无线电规则》中关于频率资源的划分规定^[5], 除了 MSS 外, 在该频段上还划分有卫星气象业务 (MetSat 业务)、射电天文业务 (RAS)、空间研究业务 (SRS)、气象辅助业务 (MetAids 业务)、地面固定业务 (FS) 和地面移动业务 (MS), 其中前 3 类业务及 MSS 属于空间业务的范畴, 后 3 类业务属于地面业务的范畴^[5-8]。

ITU 关于在扩展 L 频段内划分的以上空间业务和地面业务存在均为主要业务的情况, 因此遵循《无线电规则》中第 9 条和第 11 条中“先登先占”的协调原则, 即先在 ITU 进行登记的卫星网络具有优先协调地位, 后登记的卫星网络需要和先登记的卫星网络完成频率协调工作后才可投入使用。我国目前已有多个在 ITU 登记的包含扩展 L 频段的 NGSO 卫星网络资料, 同时也存在较多同频的已投入使用或者正在规划的系统在 ITU 的登记日期均早于我国的 NGSO MSS 系统, 包括以上提到的所有空间业务。

1 手机直连 NGSO 卫星业务用频现状及趋势分析

从用频角度考虑, 目前已实现手机直连 NGSO 卫星业务商用及试验相关验证的情形主要分两方面: 一方面是使用 MSS 频率, 根据已存在的卫星系统, 对智能手机进行修改^[9], 该情形下手机均为新发布的高端手机, 通过在普通智能手机嵌入专用芯片来提供手机直连卫星的低速数据业务等, 例如苹果公司 iPhone14 系列手机终端通过 Globalstar 低轨卫星系统实现手机直连卫星业务等。另一方面是使用地面 MS 频率, 根据存量手机, 对卫星载荷进行修改^[10], 该情形下卫星网络运营商和地面 MNO 合作, 通过卫星网络技术创新, 构建一个与地面网络融合的 MSS 系统, 直接为使用合作的地面 MNO 网络的 4G/5G 存量手机提供数据、语音等手机直连卫星业务。例如 SpaceX 公司正在逐步发射具有手机直连卫星功能的 Starlink 二代卫星, 通过在卫星上搭载 (2.7×2.3) m² 的 L 频段天线, 实现和地面存量手机的直接通信^[11]。已实现的两类手机直连 NGSO 卫星业务用频现状见表 1。

从表 1 中可以发现, 使用 MSS 频率的手机直连卫星业务场景符合 ITU 《无线电规则》的频率划分规定, 而使用地面 MNO 频率开展手机直连卫星业务的场景是不符合 ITU 《无线电规则》中的频率划分规定的, 且基本上为美国的企业。在 SpaceX、Lynk、ASTS 等对使用地面 MNO 频率开展手机直连卫星业务的迫切需求下, 美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 考虑从规则方面一揽子解决以上问题, 于是在 2023 年 3 月就手机直连卫星业务许可相关事宜发布了《单一网络的未来: 太空补充覆盖》新规则的草案^[15], 并于 2024 年 3 月通过太空补充覆盖 (Supplemental Coverage from Space, SCS) 监管框架最终规则^[16]。该框架以建立未来星地融合网络为目标, 其中建议在美国可以在表 2 所示频段内开展手机直连卫星业务, 但服务区域为地面基站覆盖不到的地

表 1 手机直连 NGSO 卫星业务用频现状

企业名称	使用频率类型	合作卫星系统	合作地面运营商	应用状态及范围	频率范围	ITU 关于以上频率的业务规划规定
苹果公司	卫星 MSS 频率	GlobalStar	—	运营（GlobalStar 运营范围内部分区域）	上行 1 610~1 626.5 MHz、下行 2 483.5~2 500 MHz	用于卫星移动通信
高通公司	卫星 MSS 频率	Iridium	—	测试（美国境内，该项合作已终止） ^[12]	上行 1 610~1 626.5 MHz、下行 2 483.5~2 500 MHz	用于卫星移动通信
SpaceX	地面 MNO 频率	—	T-Mobile 等	测试（美国、加拿大、澳大利亚、日本） ^[13]	上行 1 910~1 915 MHz、下行 1 990~1 995 MHz	用于地面移动通信
ASTS	地面 MNO 频率	—	AT&T 等	测试（美国夏威夷及得克萨斯州）	700~900 MHz 范围内	用于地面移动通信
Lynk	地面 MNO 频率	—	PNCC 等	测试（美国境外） ^[14]	700~900 MHz 范围内	用于地面移动通信

表 2 美国 FCC SCS 规则中建议开展手机直连卫星业务频率

频段简称	具体频率范围/MHz	在 ITU《无线电规则》中的频率划分规定	备注
600 MHz	614~652、663~698	用于地面 MS	这些频段内的手机直连卫星业务为次要业务，不能对已存在的地面移动通信业务产生有害干扰
700 MHz	698~769、775~799、805~806	用于地面 MS	
800 MHz	825~894、869~894	用于地面 MS	
Broadband PCS	1 850~1 915、1 930~1 995	用于地面 MS	
AWS-H Block	1 915~1 920、1 995~2 000	用于地面 MS	

区，且均为次要业务划分，不能对相应频段内已存在的地面移动通信业务造成有害干扰。虽然该框架规则目前还未真正实现星地系统同频同区域星地融合的目标，但是可以看出美国 FCC 对使用地面 MS 频率发展手机直连卫星业务的支持程度。目前该框架规则中手机直连卫星业务和已存在的地面 MS 业务之间在频率方面还是空分多址的使用方式。未来随着美国手机直连卫星业务的发展和探索，该框架规则可能会逐步修改为进一步朝着更加接近星地融合的目标和趋势迈进，最终实现手机直连卫星业务和地面 MS 业务的同频同区域的星地融合。

通过以上分析可知，未来一段时间内，手机直连 NGSO 卫星业务仍然会基于“修改的智能手机+现有及即将运行的 MSS 卫星系统”以及“存量手机+修改的 MSS 卫星系统”的方式开展运营及测试，并且从表 1 中及相关调研中可以发现，使用 MSS 频率开展手机直连卫星业务运营及测试的用频中没有涉及扩展 L 频段。目前 ITU 关于手机直连卫星业务设立了一项新的 2027 年世界无线电通信大会（2027 World Radio and Communication Conference, WRC-27）1.13 议题^[17]，旨在研究从超高频（Ultra High Frequency, UHF）到 S 频段范围内为手机直连卫星业务增加新的频段划分，并研究新增划分频段内手机直连卫星业务和其他同频业务之间的频率协调方案等，其中扩展 L 频

段资源也在其研究范围。因此以下集中研究手机直连 NGSO 卫星业务在扩展 L 频段的协调态势及和空间业务的同频协调方案。

2 手机直连 NGSO 卫星业务在扩展 L 频段协调态势分析

2.1 扩展 L 频段业务划分现状分析

ITU 在 2003 年世界无线电通信大会（WRC-03）上为 MSS 新增上下行各 7 MHz 的 L 频段资源划分，即下行 1 518~1 525 MHz/上行 1 668~1 675 MHz 频段，简称为扩展 L 频段，我国也在颁布的 2014 年版《中华人民共和国无线电频率划分规定》中在扩展 L 频段增加了 MSS（次要业务）的划分^[8]，并在后续更新的 2018 年版和 2023 年版的《中华人民共和国无线电频率划分规定》中将扩展 L 频段中的 MSS 划分为主要业务。如图 1 所示，将国际国内在扩展 L 频段内划分的各业务进行了列举，其中手机直连 NGSO 卫星业务属于 MSS，可以看出每一段频段内均有包括 MSS 在内的 3 种以上的业务划分。

2.2 手机直连 NGSO 卫星业务在扩展 L 频段需要开展协调的空间业务分析

根据上文关于在扩展 L 频段划分的空间业务信息，以及根据 ITU《无线电规则》的相关规定，若手机直连

NGSO 卫星业务系统按照规则使用扩展 L 频段开展全球 MSS, 则需要与空间业务开展的频率协调工作以及相关协调依据见表 3。

基于表 3 的信息可知, 我国在扩展 L 频段开展全球手机直连 NGSO 卫星业务需要在以下区域开展与相应空间业务的频率协调工作, 见表 4。

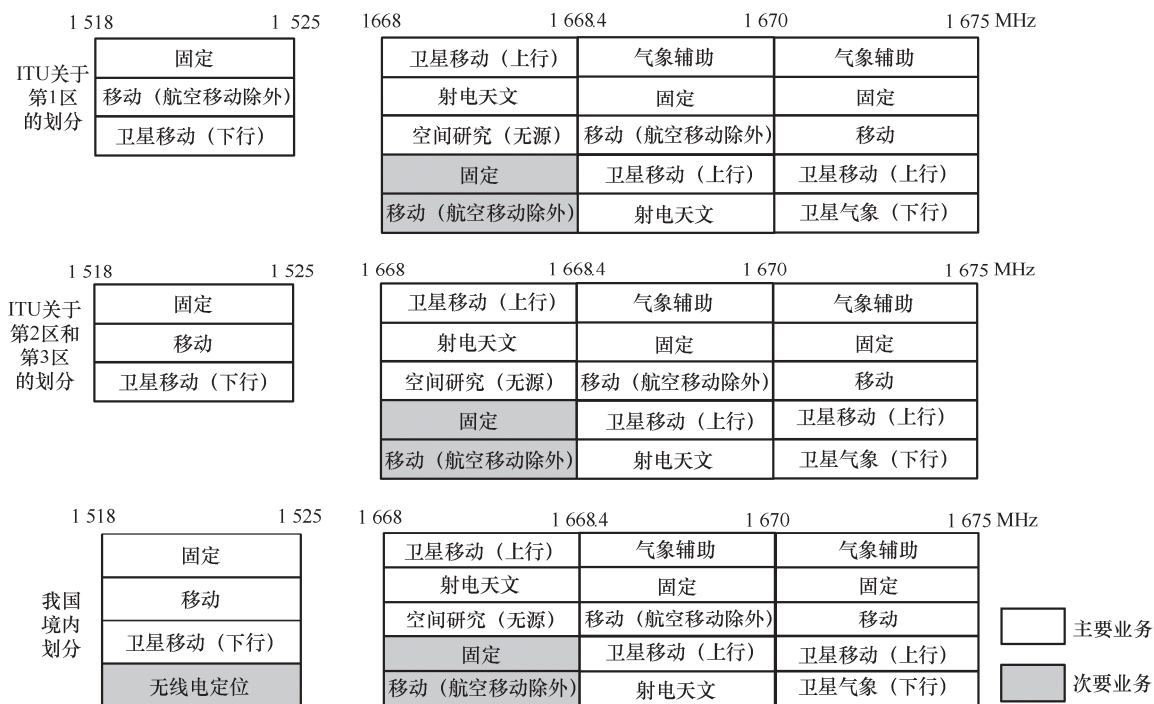


图 1 扩展 L 频段内的业务划分示意

表 3 扩展 L 频段内全球手机直连 NGSO 卫星业务需与空间业务开展的频率协调工作以及相关协调依据

协调类型	协调业务类型	具体的业务和系统	协调依据 (主要依据 ITU《无线电规则》和《中华人民共和国无线电频率划分规定》)
国内协调、国际协调	卫星气象业务	在下行 1 670~1 675 MHz 频段内, 国内外开展卫星气象业务的 GSO 或者 NGSO 卫星系统; 德国、法国、日本、俄罗斯和美国在 2014 年 1 月 1 日前报送网络资料的 GSO 卫星系统	第 9 条和第 11 条的“先登先占”原则; 5.380A: 在 1 670~1 675 MHz 频段, 卫星移动业务电台不得对 2004 年 1 月 1 日前通知的现有卫星气象业务地球站造成有害干扰或者限制其发展。在该频段中对这些地球站的任何新的指配亦须受到保护, 使其免受卫星移动业务电台的干扰 (WRC-07); CHN32: 在 1 668.4~1 675 MHz 频段, 卫星移动业务在与气象辅助业务和卫星气象业务完成协调后方可投入使用 (2018 年)
	射电天文业务	在 1 668~1 670 MHz 频段内, 在国内外分布的各射电天文电台	5.379C: 为保护 1 668~1 670 MHz 频段内的射电天文业务, 在该频段内运行的卫星移动业务网络的移动地球站产生的集总功率通量密度的值在超过总时段 2 000 s 的 2% 的时间内, 对于《国际频率登记总表》登记的任何射电天文电台, 在 10 MHz 频段内不得超过 -181 dB(W/m ²), 在 20 kHz 频段内不得超过 -194 dB(W/m ²) (WRC-03)
	卫星移动业务	在上行 1 668~1 675 MHz/下行 1 518~1 525 MHz 频段内开展 MSS 的其他 NGSO/GSO 卫星系统	第 9 条和第 11 条: “先登先占”原则, NGSO MSS 系统需要避免对协调地位优先的其他 NGSO/GSO MSS 卫星系统的干扰
国际协调	空间研究业务 (无源)	在 1 668~1 668.4 MHz 频段内, 国外开展空间研究业务 (无源) 的 SPECTR-R 等卫星系统和项目	5.379B: 卫星移动业务使用 1 668~1 675 MHz 频段时须按照第 9.11A 款进行协调。对于 1 668~1 668.4 MHz 频段, 第 904 号决议 (WRC-07) 适用

表 4 在扩展 L 频段内全球手机直连 NGSO 卫星业务需要
与空间业务开展的协调工作

需要协调的空间业务类别	协调区域	备注
卫星气象业务	全球	国内协调、国际协调
射电天文业务	全球	国内协调、国际协调
卫星移动业务	全球	国内协调、国际协调
空间研究业务（无源）	国外	国际协调

3 与不同空间业务的同频协调方案分析

3.1 与卫星气象业务的同频协调方案

（1）干扰场景分析

在 1 670~1 675 MHz 频段，手机直连 NGSO 卫星业务与卫星气象业务产生频率重叠，但两种系统属于反向应用（参照图 1），即卫星气象业务系统是空对地应用，而手机直连 NGSO 卫星业务是地对空应用。手机直连 NGSO 卫星业务用户终端的上行信号可能会通过卫星气象地面站天线的旁瓣到达，从而对卫星气象业务系统地面站带来干扰，如图 2 所示。

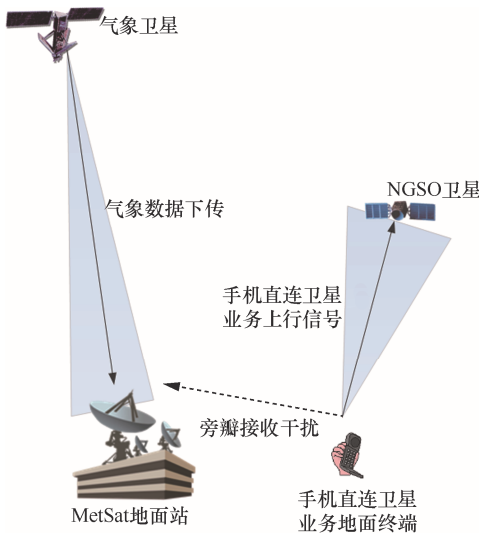


图 2 扩展 L 频段内手机直连 NGSO 卫星业务对
卫星气象业务干扰场景示意

（2）频率协调方案研究

一般情况下卫星气象业务的地面接收站位置是固定的，而手机直连 NGSO 卫星业务的地面用户终端是移动的。因此应该以卫星气象业务接收站为核心，根据气象接收站技术参数及相关标准判断不同场景下卫星气象业务接收站接收端允许的最大干扰功率谱密度 I_0 ，然后再根据手机直连 NGSO 卫星业务地面用户终端的技术参数（如果

是多个用户终端，需要考虑等效集总发射功率等参数），反推手机直连 NGSO 卫星业务用户终端需要和卫星气象业务接收站之间保持的距离，以此作为手机直连 NGSO 卫星业务对卫星气象业务的保护距离。然后再以卫星气象业务接收站为圆心，以保护距离为半径得到卫星气象业务接收站的干扰保护范围。当已知卫星气象业务的接收站位置后，则手机直连 NGSO 卫星业务系统通过控制用户终端不出现在卫星气象业务接收站的干扰保护范围内来完成和卫星气象业务之间的频率协调工作。

卫星气象业务接收站接收端允许的最大干扰功率谱密度可以参考 ITU-R SA.1163-3 建议书^[18]，进行 1 670~1 675 MHz 频段内卫星移动业务和卫星气象业务之间的干扰分析。该建议书中关于卫星气象业务接收站接收端允许的干扰功率谱密度 I_0 的计算公式如下

$$I_0 = 10 \log(kT) + 10 \log \left(10^{\frac{A}{10}} - 1 \right) \quad (1)$$

其中， k 是玻尔兹曼常数， T 是接收系统噪声温度， A 为噪声增加容限。

根据 ITU-R SA.1163-3 建议书中的相关描述，噪声增加容限 $A = q \times M$ ，其中 M 为链路余量， $M_{\min} = 1.2$ dB。对于长期干扰（干扰超标时间百分比不超过 20%），系数 $q = 1/3$ ，对于短期干扰（干扰超标时间百分比不超过 0.025%）系数 $q = 1$ ，即长期干扰时噪声增加容限 A 可以取值为 0.4 dB，短期干扰时噪声增加容限 A 可以取值为 1.2 dB。

3.2 与射电天文业务的同频协调方案

（1）干扰场景分析

射电天文业务使用扩展 L 频段中的 1 668~1 670 MHz 频段，是空对地业务（参照图 1），在该频段内手机直连 NGSO 卫星业务属于反向共用，手机直连 NGSO 卫星业务用户终端的上行信号可能会通过射电天文电台天线的旁瓣到达，从而对射电天文电台带来干扰，干扰场景如图 3 所示。

（2）频率协调方案研究

参考 ITU-R RA.769-2 建议书^[19]中关于射电天文业务干扰标准，以及 ITU《无线电规则》中 5.379C 款规定（具体见表 3 中的叙述），在 1 668~1 670 MHz 范围内，手机直连 NGSO 卫星业务系统用户终端对射电天文电台接收端产生的干扰协调标准为：手机直连 NGSO 卫星业务系统地球站对射电天文电台产生的集总功率通量密度（PFD）超过 $-181 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 10 \text{ MHz))}$ 或者 $-194 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 20 \text{ kHz))}$ 的时间百分比不能超过 2%（若

总的时间为 2 000 s, 则时间不能超过 40 s), 否则即认为可能产生有害干扰, 需要采取措施来规避干扰。其中 PFD 限值为 $-181 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 10 \text{ MHz))}$ 时主要针对射电天文连续观测业务, PFD 限值为 $-194 \text{ dB(W/(m}^2 \cdot 20 \text{ kHz))}$ 时主要针对射电天文谱线观测业务。

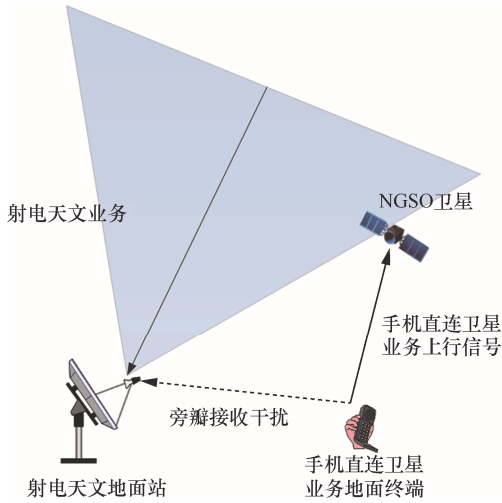


图 3 扩展 L 频段内手机直连 NGSO 卫星业务对射电天文业务干扰场景示意

因此可以上述标准为依据开展手机直连 NGSO 卫星业务用户终端对射电天文电台的干扰保护距离的计算, 以射电天文电台为中心, 干扰保护距离为半径确定射电天文电台的干扰保护范围; 然后控制手机直连 NGSO 卫星业务用户终端不出现在射电天文电台的干扰保护范围内, 或者出现在干扰保护范围内的时间百分比不超过 2%。将此策略作为协调方案来完成 1 668~1 670 MHz 频段内手机直连 NGSO 卫星业务与射电天文业务的频率协调工作。

以上标准中功率通量密度值的计算公式如下

$$\text{PFD} = \text{EIRP}_{\text{MSS}} - 10 \times \log(4 \times \pi \times d^2) - 10 \times \log(B) \quad (2)$$

其中, PFD 和 EIRP_{MSS} 均为 dB 值, d 为手机直连 NGSO 卫星业务用户终端和射电天文电台之间的距离, B 为卫星移动业务用户终端工作带宽; 以上计算的 PFD 值均为每赫兹下的 PFD 值, 而具体对应到相应的门限值则再进一步换算到相应的 10 MHz 带宽或者 20 kHz 带宽下对应的 PFD 值。通过将 PFD 值设置为 PFD_{门限} 值来计算出射电天文电台的干扰保护距离, 从而确定其干扰协调保护范围。

3.3 与其他 NGSO/GSO 卫星移动业务的同频协调方案

(1) 干扰场景分析

在 1 518~1 525 MHz/1 668~1 675 MHz 频段与其他协

调地位较高的 NGSO/GSO 卫星 MSS 系统干扰属于同向干扰, 上行、下行均会产生干扰。上行手机直连 NGSO 卫星业务地面用户终端对其他 NGSO/GSO 卫星产生的干扰; 下行为手机直连 NGSO 卫星业务中 NGSO 卫星对其他 NGSO/GSO 地面用户终端的干扰, 如图 4 所示。

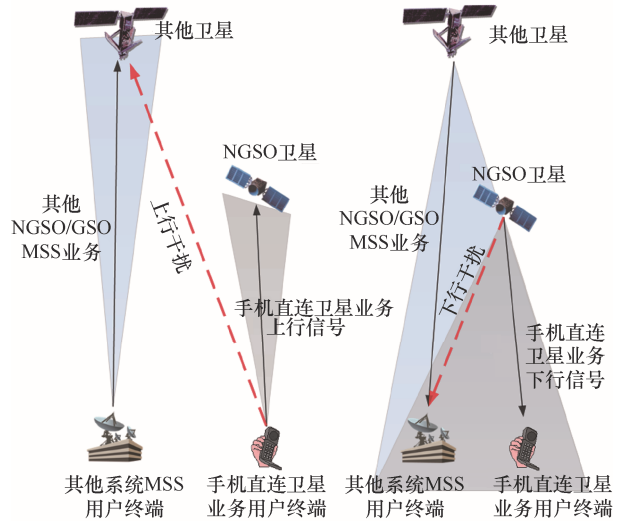


图 4 扩展 L 频段内手机直连 NGSO 卫星业务对其他 NGSO/GSO 系统干扰场景示意

(2) 干扰协调方案研究

扩展 L 频段内手机直连 NGSO 卫星业务对其他同频 NGSO/GSO MSS 干扰分析时可采用 C/I (载波干扰功率比) 或者 I/N (干扰噪声功率比) 作为干扰评估指标, 同时以满足一定的干扰时间保护比要求作为输入推导出所需的干扰减缓条件。以下以 C/I 作为干扰评估标准为例。

1) C/I 计算方法根据 ITU-R S.740 建议书^[20]建立

载波功率 C 的计算公式如下

$$C = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 = [\text{EIRP}] + [G_r] - [L_d] \quad (3)$$

对于 C 而言, 式(3)中的 P_t 、 G_t 、 G_r 分别表示被干扰系统本身链路的发射功率、发射增益、接收增益, d 表示被干扰系统本身链路的传输距离, λ 为信号波长。具体结合实际通信卫星系统的设计参数, 换算成 dB 值则如式(3)中右边所示, $[\text{EIRP}]$ 为被干扰系统本身发射 EIRP 的 dB 值, $[G_r]$ 为接收增益 dB 值, $[L_d]$ 为路径损耗 dB 值。

其中 I 的计算公式如下

$$I = P'_t G'_t G'_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d'} \right)^2 - L_x \quad (4)$$

$$= [\text{EIRP}'] + [G'_r] - [L'_d] - [L_x] + 10 \log(B)$$

对于 I 而言, 式(4)中的 P'_t 、 G'_t 分别表示干扰系统干扰链路发射端的发射功率、发射增益, G'_r 表示干扰信号到达被干扰系统时接收端的接收增益, d' 表示干扰发射端到达被干扰接收端的干扰链路传输距离, L_x 为极化隔离值, λ 为信号波长。具体结合实际通信卫星系统的设计参数, 换算成 dB 值则如式(4)中右边所示, $[EIRP']$ 为干扰系统发射的 EIRP 的 dB 值, $[G'_r]$ 为到达被干扰系统接收端的接收增益 dB 值, $[L'_d]$ 为干扰链路路径损耗 dB 值, $[L_x]$ 为极化隔离值 dB 值, B 为被干扰系统载波带宽。

2) C/I 干扰保护标准根据 ITU-R S.741 建议书^[21]建立, 即

$$C/I_{\text{门限}} = C/N_{\text{门限}} + 12.2 \quad (5)$$

手机直连 NGSO 卫星业务系统操作者首先通过链路计算以及干扰仿真的方式得出手机直连 NGSO 卫星业务系统到达被干扰 NGSO/GSO MSS 系统的上下行 C/I 值, 然后再和 $C/I_{\text{门限}}$ 值进行对比, 一般情况下如果 $C/I \geq C/I_{\text{门限}}$, 则认为手机直连 NGSO 卫星业务系统不会对被干扰 NGSO/GSO MSS 系统造成有害干扰, 即可完成频率协调。如果 $C/I < C/I_{\text{门限}}$, 则可进一步制定手机直连 NGSO 卫星业务系统 C/I 小于 $C/I_{\text{门限}}$ 的时间百分比 (时间百分比需要协调双方卫星操作者认可, 参考 ITU-R S.741 建议书, 该时间百分比为 10%)。如果满足时间百分比要求, 则同样认为手机直连 NGSO 卫星业务不会对被干扰 NGSO/GSO 卫星移动业务系统造成有害干扰, 即可以完成频率协调; 如果不满足时间百分比要求, 则认为手机直连 NGSO 卫星业务可能会对干扰 NGSO/GSO MSS 系统造成有害干扰, 需要手机直连 NGSO 卫星业务系统调整相关技术参数或者采取相关技术手段直至满足以上标准后, 才能确认完成了频率协调工作。

3.4 与空间研究业务的同频协调方案

(1) 干扰场景分析

ITU《无线电规则》频率划分规定中关于扩展 L 频段内空间研究业务的划分只有在 1 668~1 668.4 MHz 频段内划分有空间研究业务 (无源), 是地对空业务 (参照图 1)。在该频段内与手机直连 NGSO 卫星业务属于同向应用, 手机直连 NGSO 卫星业务用户终端的上行信号可能会通过空间研究业务卫星天线旁瓣到达, 从而对空间研究业务带来干扰, 干扰场景如图 5 所示。

(2) 干扰协调方案研究

参考 ITU《无线电规则》的决议和建议中的第 904 号决议^[22]以及 ITU-R M.2124 报告^[23]中的内容, 目前国外主

要有一项空间甚长基线干扰测量 (S-VLBI) 的国际项目, 项目名称为 RADIOASTRON, 其中已向 ITU-R 申报的网络资料 SPECTR-R 与此项目紧密相关, 且 SPECTR-R 卫星网络资料已于 2007 年之前完成登记, 因此参照《无线电规则》5.379B 款, 在扩展 L 频段发展手机直连 NGSO 卫星业务需要在 1 668~1 668.4 MHz 频段内完成和 SPECTR-R 等空间研究业务 (无源) 系统的频率协调工作。

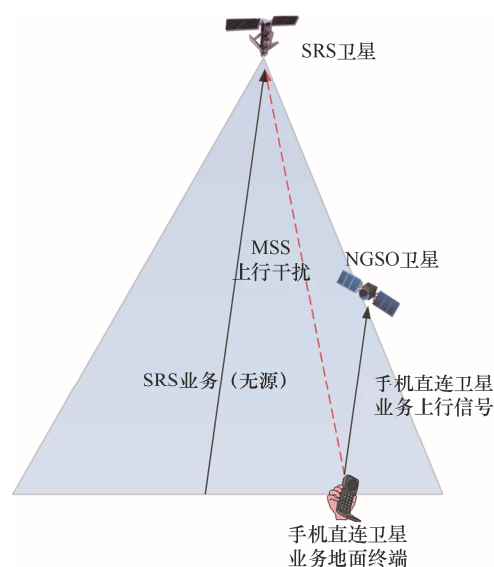


图 5 扩展 L 频段内手机直连 NGSO 卫星业务对空间研究业务干扰场景示意

目前没有严格的关于在扩展 L 频段内手机直连 NGSO 卫星业务和空间研究业务 (无源) 之间的干扰协调标准, 第 904 号决议中提到的《无线电规则》的附录 5 中提到的干扰协调门限以及 ITU-R M.2124 报告中建议的干扰协调标准均是基于 GSO MSS 系统和空间研究业务 (无源) 之间的干扰协调场景。本文方案建议在进行手机直连 NGSO 卫星业务和空间研究业务 (无源) 之间的同频频率协调工作时, 可以参照 ITU-R M.2124 报告中描述比较细致的 GSO MSS 系统和空间研究业务 (无源) 之间的干扰协调标准。该报告中建议的干扰协调标准总结如下。

1) 干扰门限值采用接收 RADIOASTRON 卫星接收端的噪声功率谱密度的 1%, 即 $I_{0\text{门限}} = 1\% \times N_0$ 。

2) 判断最终是否造成干扰的标准为: 单个手机直连 NGSO 卫星业务系统中用户终端对 RADIOASTRON 卫星接收端产生的集总干扰 I_0 超过 $1\% \times N_0$ 的时间百分比不能超过 2%, 否则即为造成干扰, 无法完成频率协调; 多个手机直连 NGSO 卫星业务系统中用户终端对 RADIOASTRON 卫星接收端产生的集总干扰 I_0 超过

$1\% \times N_0$ 的时间百分比不能超过 5%，否则即为造成干扰，无法完成频率协调。

因此手机直连 NGSO 卫星业务和空间研究业务（无源）之间的频率协调工作建议采纳以上标准，如果手机直连 NGSO 卫星业务对 RADIOASTRON 等系统接收端的 I_0 值满足频率协调的单入干扰和集总干扰要求，则可以完成两系统之间的频率协调工作。如果不满足，则需要采取措施调整手机直连 NGSO 卫星业务的相关技术参数或者采取相关技术手段使得到的单入干扰或者集总干扰 I_0 满足要求后，才可以完成两系统之间的频率协调工作。

4 同频协调方案举例

以上手机直连 NGSO 卫星业务和其他各同频空间业务的同频协调方案中，以和卫星气象业务、射电天文业务的协调方案为例，来说明上文中的频率协调方案实施方法。

4.1 针对与卫星气象业务的同频协调方案

针对手机直连 NGSO 卫星业务与同频卫星气象业务之间的同频协调方案，主要以计算卫星气象业务系统地面站的干扰保护距离为核心，如下所示。

以 ITU-R SA.1163-3 建议书中表 A-1 提供的 FY 静止卫星气象业务系统为例，计算干扰协调需要的相关参数见表 5，表 5 中假设 $EIRP_{直连}$ 为集总等效的 EIRP 值。

表 5 手机直连 NGSO 卫星业务系统和卫星气象业务参数

参数	值	备注
发射 $EIRP_{直连}/dBW$	1	假设为集总值
工作频段 f/GHz	1.671 5	—
MetSat 地面站保护距离/km	d	得出最终计算结果
MetSat 接收地面站（被干扰系统）参数		
天线旁瓣接收增益 G_{METSAT}/dB	-10	参照 ITU-R S.465-6 建议书 ^[24]
工作频段 f/GHz	1.671 5	—
工作带宽 B/MHz	2	参考 FY 网络资料 ^[25]
接收噪声温度 T/K	186	参考 ITU-R SA.1163-3 建议书
长时噪声增加容限 A/dB	0.4	
短时噪声增加容限 A/dB	1.2	
长时干扰 $I_0 \text{ (dBW/(dBW} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-204.1	参考 ITU-R SA.1163-3 建议书和式(1)计算得出
短时干扰 $I_0 \text{ (dBW/(dBW} \cdot \text{Hz}^{-1})$	-194.2	

手机直连 NGSO 卫星业务系统对 FY 静止卫星气象业务系统的保护距离由式(6)得出

$$EIRP_{MSS} - L_{MSS} + G_{METSAT} - 10 \log(B) = I_{0 \text{ 门限}} \quad (6)$$

其中，链路损耗 L_{MSS} 计算公式如下

$$L_{MSS} = 92.45 + 20 \log(f) + 20 \log(d) + A_g \quad (7)$$

其中， A_g 为大气损耗，按照 ITU-R P.676-6 建议书^[26]中的相关内容， A_g 取值约为 0.4 dB。

将表 3 中的相关参数代入式(6)~式(7)中，可得长时干扰保护距离和短时干扰保护距离（单位为 km）分别为

$$d_{\text{长时}} = 10^{\frac{-169.3 + \text{长时 } I_{0 \text{ 门限}}}{20}} = 54.8$$

$$d_{\text{短时}} = 10^{\frac{-169.3 + \text{短时 } I_{0 \text{ 门限}}}{20}} = 17.5$$

基于以上计算结果，干扰保护范围即为以卫星气象业务地球站为中心，以上述计算出的干扰保护距离为半径的地理区域范围。在手机直连 NGSO 卫星业务操作者和卫星气象业务操作者均认可以上干扰保护范围的基础上，手机直连 NGSO 卫星业务系统只要遵循不在以上干扰保护范围内发射信号，就完成了和同频卫星气象业务系统之间的同频协调工作。

4.2 针对与射电天文业务的同频协调方案

针对手机直连 NGSO 卫星业务和同频射电天文业务之间的同频协调方案，主要以计算射电天文地面站的干扰保护距离为核心。

以 ITU-R RA.769-2 建议书中表 1 提供的干扰门限值为例，计算干扰协调保护范围需要的相关参数见表 6，表 6 中假设 $EIRP_{直连}$ 为集总等效的 EIRP 值。

表 6 手机直连 NGSO 卫星业务系统和射电天文业务参数

参数	值	备注
发射 $EIRP_{直连}/dBW$	1	假设为集总值
工作频段 f/GHz	1.669	—
工作带宽 B/MHz	0.125	—
RAS 电台干扰保护距离/km	d	得出最终计算结果
RAS 接收地面站（被干扰系统）参数		
天线旁瓣接收增益 G_{RAS}/dB	0	参照 ITU-R RA.769-2 建议书 ^[19]
工作频段 f/GHz	1.669	—
等效带宽 $\Delta f/MHz$	10	参照 ITU-R RA.769-2 建议书 ^[19]
接收天线噪声温度 T_A/K	12	—
接收机噪声温度 T_R/K	10	—
PFD $\text{ (dBW/(m}^2 \cdot 20 \text{ kHz))}$	-194	具体计算方法参照 ITU-R RA.769-2 建议书 ^[19]
PFD $\text{ (dBW/(m}^2 \cdot 10 \text{ MHz))}$	-181	

基于表6的参数,将以上参数代入公式(2)中,得出手机直连 NGSO 卫星业务系统在 1 668~1 670 MHz 频段内对射电天文电台的保护距离非常大,达到上万千米,这显然是不合理的。因此基于此规则,为避免在 1 668~1 670 MHz 频段内手机直连 NGSO 卫星业务用户终端对射电天文电台产生有害干扰,建议在 1 668~1 670 MHz 范围采取上行手机直连 NGSO 卫星业务信号扩频或者避免在该频段射电天文电台使用 1 668~1 670 MHz 频段进行通信的方式规避对射电天文电台产生的有害干扰,从而完成 1 668~1 670 MHz 频段内 MSS 和射电天文业务的频率协调工作。

5 结束语

通过以上关于手机直连 NGSO 卫星业务的分析可知,相关干扰协调标准还是比较严格且不利于手机直连 NGSO 卫星业务发展,因此下一步的工作主要在两方面进行规划:一方面继续开展手机直连 NGSO 卫星业务系统在扩展 L 频段和其他同频地面业务频段的同频协调方案研究,包括手机直连 NGSO 卫星业务在扩展 L 频段和同频的气象辅助业务、地面固定业务、地面移动业务频率协同的研究等;另一方面紧跟未来手机直连 NGSO 卫星业务用频及星地融合的发展趋势,进一步研究促进同频频率协调工作完成的频率共用及干扰规避技术。例如基于频谱感知的星地融合频率动态共用技术、面向手机直连 NGSO 卫星业务和地面 MS 合作场景的智能频谱资源分配技术以及面向未来 6G 星地融合场景的干扰规避和干扰抑制技术等。通过本文的研究工作以及未来以上两方面的规划,希望可以进一步推动关于手机直连卫星业务的同频协调规则的研究,激发手机直连卫星关键技术的创新,以及促进我国手机直连卫星业务的发展等。

参考文献:

- [1] 肖永伟, 卢山, 宋艳军. “手机直连卫星” 发展及关键技术[J]. 国际太空, 2024(1): 20-27.
XIAO Y W, LU S, SONG Y J. Development and key technologies of “mobile phone direct satellite” [J]. Space International, 2024(1): 20-27.
- [2] 3GPP. Technical specification group radio access network; Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)(Release 16): TR 38.821 v16.2.0[S]. 2023.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] International Telecommunication Union. Radio Regulations Articles[M]. Geneva, Switzerland. 2020.
- [6] 潘冀, 刘珊杉, 韩锐. 天地一体化信息网络卫星频率资源可行性研究[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 546-552.
PAN J, LIU S S, HAN R. Feasibility study on satellite frequency resource for space-terrestrial integrated information network[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 546-552.
- [7] 工业和信息化部. 工信部第 62 号令《中华人民共和国无线电频率资源划分规定》[Z]. 2023.
Ministry of Industry and Information Technology. Ministry of industry and information technology order No.62 “Provisions on the division of radio frequency resources in the People's Republic of China” [Z]. 2023.
- [8] 工业和信息化部无线电管理局. 《中华人民共和国无线电频率资源划分规定》[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014.
Radio Administration of Ministry of Industry and Information Technology. Provisions on the division of radio frequency resources in the People's Republic of China[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 2014.
- [9] 王达, 童建飞, 穆飞宇. 手机直连卫星通信: 发展现状、应用场景和标准演进[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 795-802.
WANG D, TONG J F, MU F Y. Satellite communication supporting direct connection with mobile phones: development trend, application scenario, and standards evolution[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 795-802.
- [10] 蓝天翼. “手机直连卫星”的发展与挑战[J]. 国际太空, 2023(3): 58-62.
LAN T Y. Development and challenge of “mobile phone direct satellite” [J]. International Space, 2023(3): 58-62.
- [11] Space Exploration Holdings, LLC. SpaceX sends first text messages via its newly launched directto cell satellites[EB]. 2024.
- [12] 卫星通信观察. 高通终止与铱星的卫星直连手机交易[EB]. 2024.
Observation of Satellite Communication. Qualcomm terminates the direct satellite phone transaction with Iridium[EB]. 2024.
- [13] FCC 22-91. Request for orbital deployment and operating authority

- for the SpaceX Gen2 NGSO satellite system[EB]. 2022.
- [14] Lynk Global, Inc. Lynk completes pre-commercial trials for 5th satellite ahead of commercial launch[EB]. 2023.
- [15] FCC 23-22. Single network future: supplemental coverage from space[EB]. 2023.
- [16] FCC 24-28. Single network future: supplemental coverage from space[EB]. 2024.
- [17] ITU-R. RESOLUTION COM6/9 (WRC-23): studies on possible new allocations to the mobile-satellite service for direct connectivity between space stations and International Mobile Telecommunications (IMT) user equipment to complement terrestrial IMT network coverage[S]. 2023.
- [18] ITU-R. Aggregate interference criteria for service links in data collection systems for GSO satellites in the Earth exploration-satellite and meteorological-satellite services: ITU-R SA.1163[S]. 2018.
- [19] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases: ITU-R RA. 769-2[S]. 2020.
- [20] ITU-R. Technical coordination methods for fixed-satellite networks: ITU-R S. 740-0[S].1992.
- [21] ITU-R. Carrier-to-interference calculations between networks in the fixed-satellite service: ITU-R S.741 FRENCH[S]. 1994.
- [22] ITU-R. ITU-R Resolution 904 (WRC-07): transitional measures for coordination between the mobile-satellite service (Earth-to-space) and the space research (passive) service in the band 1 668-1 668.4 MHz for a specific case[S]. 2007.
- [23] ITU-R. Interference calculations to assess sharing between the mobile-satellite service and space research (passive) service in the band 1 668-1 668.4 MHz: ITU-R REPORT M.2124[S]. 2007.
- [24] ITU-R. Reference radiation pattern for earth station antennas in the fixed-satellite service for use in coordination and interference assessment in the frequency range from 2 to 31 GHz: ITU-R S.465-6[R]. 2010.
- [25] ITU-R SNL database[EB]. 2024.
- [26] ITU-R. Attenuation by atmospheric gases: ITU-R P.676-11[S]. 2016.

[作者简介]



王丽冲（1990—），女，中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师，主要研究方向为低轨卫星通信、星地融合通信、卫星网络频率协调及干扰分析等。

孙晨华（1964—），女，中国电子科技集团公司首席科学家，中国电子科技集团公司第五十四研究所研究员，主要研究方向为高低轨卫星通信网络总体及网络应用、星地融合通信等。

赵伟松（1990—），男，中国电子科技集团公司第五十四研究所工程师，主要研究方向为低轨卫星通信、卫星网络应用、卫星网络频率协调及干扰分析等。

刘全（1985—），女，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星通信、星地融合通信等。

卢山（1982—），女，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为卫星通信、星地融合通信等。