

天地一体化新路径：手机直连卫星发展热点、挑战与关键技术

何元智¹, 杨岭才², 肖永伟³, 张世杰⁴, 李志强¹, 刘 韵¹

(1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100141;

2. 中国电信股份有限公司卫星通信分公司, 北京 100088;

3. 中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;

4. 银河航天(北京)网络技术有限公司, 北京 100192)

摘要: 手机直连卫星作为未来实现天地一体化融合的一种潜在技术手段, 得到了产业界和学术界的广泛关注。与传统的卫星移动通信相比, 当前手机直连卫星技术存在诸多挑战。针对基于同步轨道卫星和非同步轨道卫星的两种手机直连技术路线, 分析国内外发展现状、系统组成架构, 并从空口侧、卫星侧、网络侧和终端侧梳理技术挑战, 提出星地同步、星载超大阵面天线、星地异构网络漫游等若干解决方案, 为手机直连卫星技术的发展提供技术支撑。最后对手机直连卫星的发展进行展望。

关键词: 卫星通信; 手机直连卫星; 非地面网络; 天地一体化; 星地融合

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024011

New Approach of Integration Space-Ground: Hotspots, Challenges, and Key Technologies of Direct-to-Smartphone

HE Yuanzhi¹, YANG Lingcai², XIAO Yongwei³, ZHANG Shijie⁴, LI Zhiqiang¹, LIU Yun¹

1. Institute of Systems Engineering, Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China

2. China Telecom Satellite Communications Co., Ltd., Satellite Communication Branch, Beijing 100088, China

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

4. Yinhe Hangtian (Beijing) Internet Technology Co., Ltd., Beijing 100192, China

Abstract: Direct-to-smartphone, as a potential technological means for achieving the integration of space and ground in the future, has received widespread attention from industry and academia. Compared with traditional satellite mobile communication, there are many challenges in the current direct-to-smartphone technology. The current development status and system architecture of two direct-to-smartphone technology routes based on synchronous orbit satellites and asynchronous orbit satellites were introduced, and the technical challenges from the air-interface side, satellite side, network side, and terminal side were summarized. Several solutions were proposed, included satellite-terrestrial synchronization, satellite-borne ultra-large array antenna, and satellite-terrestrial heterogeneous network roaming, providing technical support for the development of direct-to-smartphone technology. Finally, a brief outlook were provided.

Keywords: satellite communication, direct-to-smartphone, non-terrestrial network, integration space-ground network, satellite-terrestrial integrated

0 引言

手机直连卫星是指手机或手持类终端不需要地面中转设备, 直接与卫星连接实现数据传输或进行通信的技术^[1]。严格来说, 直连卫星的手机也包括传统专用卫星手机。由于专用卫星手机往往体积大、重量大且配置外置天线, 不便于用户携带, 未在消费者群体中获得大范围的推广应

用。近期国内外发展得如火如荼的手机直连卫星技术与传统的卫星电话技术最大的区别是, 手机是普通消费级的终端, 可将使用最广泛的手机终端与覆盖范围最大的卫星网络紧密结合, 具有极大的使用价值和广阔的应用场景, 代表了未来手机直连卫星终端形态的发展趋势。手机直连卫星作为面向未来的通信技术, 已成为卫星互联网之后的又一个全球关注的热点。

手机直连卫星相关技术并非突然井喷式发展,而是经过了长时间的技术积淀^[2]。自 1998 年美国铱星系统开通首个卫星手机业务以来^[3],陆续建设的 Globalstar、Thuraya、海事卫星以及我国的天通一号等卫星通信系统均支持专用卫星手持终端直连卫星进行通话^[4]。这些系统发展初期与地面蜂窝系统相互独立,费用较为昂贵,无法形成与地面蜂窝移动通信相似的规模效应,发展较为缓慢。为了有效拓展地面手机网络的覆盖范围,陆续出现了可供普通手机直接连接卫星的手机壳以及集成卫星通信和蜂窝通信的双模手机。为了保证可靠的卫星通信,上述终端均配置了外置卫星天线,体积小、重量较轻,但也未能在消费者中广泛推广。

近年来,研究人员开始研究面向未来的手机直连卫星技术。新一代的手机直连卫星系统要求通信速率大,手机终端重量轻、体积小、功耗低、内置天线,并且集成卫星通信和地面蜂窝通信,目前得到卫星运营商、地面移动通信运营商、终端制造商和卫星制造商等各方面的关注。

目前手机直连卫星有多种技术路线,按照运营商进行分类^[5],分为以卫星运营商为主体的技术路线和以地面移动通信运营商为主体的技术路线;按照终端与卫星体制进行分类,分为使用定制手机终端和传统移动通信卫星、使用现有手机终端和星载基站以及采用 3GPP 标准的天地融合体制手机终端合一的 3 种技术路线^[6];按照卫星轨道使用情况进行分类,分为使用同步轨道(GSO)卫星和非同步轨道(NGSO)卫星的技术路线。本文重点研究了使用不同轨道卫星的手机直连卫星系统的组成架构、技术挑战、关键技术与解决方案。

1 手机直连卫星技术发展现状

手机直连卫星涉及传统卫星运营商业务和地面移动通信运营商业务。目前国内外已形成产业链上下游多家公司加强合作的局面,表 1 展示了典型合作案例。

表 1 典型合作案例

序号	卫星轨道	卫星运营商/卫星网络	地面公司
1	GSO	天通一号	华为、小米等
2	GSO	Skylo	高通等
3	GSO	Inmarsat	联发科技、Bullitt
4	LEO	Globalstar	苹果公司
5	LEO	AST SpaceMobile	沃达丰、AT&T
6	LEO	Link Global	Optus、Rogers 等
7	LEO	SpaceX	T-Mobile、KDDI
8	LEO/MEO	Omnispace、Ligado Networks	沙特电信公司

1.1 基于同步轨道卫星的技术路线

基于 GSO 卫星的技术路线较为成熟,也是当前手机直连卫星主流商用路线。

2023 年 8 月,华为公司发布基于天通一号卫星的 Mate60 Pro 卫星通信手机,支持卫星语音通话。中国电信积极开展手机直连卫星业务研究:一方面参与天通一号卫星的运营,并开展相关业务系统的研发和推广应用,如与华为、荣耀、小米等手机终端厂商合作,实现普通消费级手机直连卫星语音和低速数据传输业务;另一方面,还积极开展基于 5G 非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)手机直连卫星相关研究。

在专用芯片研究方面,联发科技开发的窄带物联网(NB-IoT)芯片通过 Inmarsat 的 Alphasat 高轨卫星完成测试^[7],证明通过小幅修改便可让移动通信技术有效地运行于地球静止轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)卫星,为卫星和移动通信网络的整合奠定基础。2023 年联发科技开发了 MT6825 物联网非地面网络(Internet of Things Non-Terrestrial Network, IoT-NTN)芯片组,可连接 GEO 卫星,易于转换为 3GPP NTN 标准卫星网络使用。我国的平台型芯片设计公司紫光展锐于 2023 年 7 月发布了 5G NTN 卫星通信通用系统级芯片(System on Chip, SoC) V8821。V8821 基于 3GPP NTN R17 标准,利用 IoT-NTN 作为基础设施,易与地面核心网融合。V8821 可通过海事卫星或天通一号卫星,提供数据传输、文字消息、通话和位置共享等功能。

1.2 基于非同步轨道卫星的技术路线

当前基于 NGSO 卫星的技术路线发展的公司包括 Globalstar、AST SpaceMobile(ASTS)、Link Global、SpaceX 和 Omnispace 等。

2022 年苹果公司与 Globalstar 合作,利用 Globalstar 的卫星为苹果手机提供紧急 SOS 信息传输服务。Globalstar 的定位是一个卫星物联网解决商,其卫星通信主要使用 S 频段的 2.4 GHz 频段和 n53 频段。

2022 年 9 月 AST SpaceMobile 发射了 BlueWalker-3 试验卫星,其目标是无须任何地面设备,为用户手机提供直接的 4G 和 5G 互联网接入^[8-9]。如图 1 所示,为了与地面标准移动电话达到可靠的连接,BlueWalker-3 卫星配备了展开面积达 64 m² 的超大相控阵天线阵列。基于 BlueWalker-3 卫星,2023 年 9 月 ASTS 与电信运营商 AT&T、沃达丰等实现 5G 通话^[10]。

Link Global 公司发起的 Link 低轨卫星星座项目计划通过 5 000 多颗低轨(LEO)卫星为现有手机终端提供直

连卫星通信服务，无须用户购买额外的附件^[11]。2020年2月，Lynk Global通过试验卫星实现了“使用在轨卫星向地面标准手机发送了世界上第一条短信”。同年9月Lynk Global公司获得由FCC颁布的卫星到手机通信商业许可^[12]。

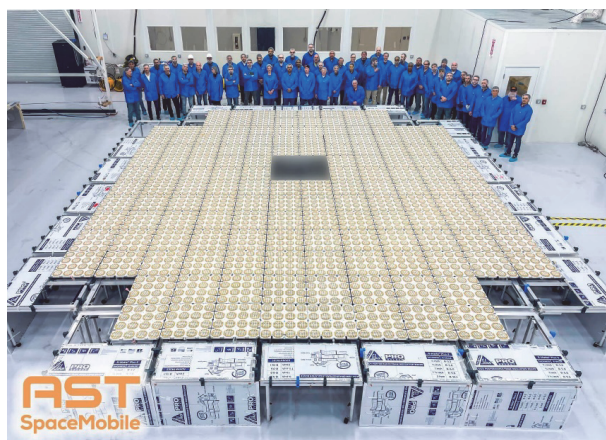


图1 BlueWalker-3 试验卫星配备的天线

SpaceX 公司拟基于星链（Starlink）星座提供手机直连卫星业务。为支持手机直连卫星业务，SpaceX 使用 Starlink V2 卫星在搭载 Ku 及 Ka 频段通信载荷、星间激光链路的基础上，增加一个用于手机直连的面积为 25 m² 的阵列天线。Starlink V2 卫星的天线单元具有大孔径、高增益、窄波束的特点，可以实现对指定区域的精准覆盖，但是单副天线的覆盖半径只有 36 km。2024 年 1 月，SpaceX 发射了首批 6 颗支持手机直连卫星的 Starlink V2 Mini 卫星，用未经改造的手机测试通信速率约达到 17 Mbit/s。

Omnispace 公司致力于建立一个卫星星座，使各种移动智能设备能够在蜂窝网络和卫星网络之间漫游，相关技术遵循 3GPP NTN 标准规范^[13]。为此，其从 ICOGlobal 购买了 ICO-F2 卫星和 2 GHz S 频段的频谱许可。2023 年 2 月，Omnispace 和 Ligado Networks 联手创建最大的许可卫星频谱组合，用于全球直接到设备的语音、文本和数据连接，扩展了 Omnispace 公司在 L 频段的通信许可。

2023 年 9 月，中国移动携手中兴通讯和是德科技完成国内首次运营商 NR-NTN LEO 卫星宽带业务实验室验证。2024 年 2 月，中国移动发射了搭载星载基站的卫星中国移动 01 星，将在现实条件下进行基于星上再生模式的手机直连 LEO 卫星技术测试，该基站载荷基于 3GPP R17 NR-NTN 标准。

1.3 发展现状小结

从以上国内外发展现状可以看出，我国目前主要发展的是基于高轨卫星的手机直连卫星技术，这得益于我国天通一号卫星移动通信系统储备的技术基础，可以快速实现业务的推广应用。近些年国外则更倾向于发展基于中轨（MEO）和 LEO 卫星的手机直连卫星系统，以提供更高速率的网络体验，该技术路线目前挑战巨大，短时间内难以实现业务的推广应用。我国在基于 NGSO 卫星的手机直连卫星技术方面仍处于初步探索阶段。

2 手机直连卫星系统架构及技术挑战

2.1 手机直连卫星系统架构

典型手机直连卫星系统架构如图 2 所示，包括空间段、用户段和地面段 3 个部分。

空间段包括同步轨道或非同步轨道卫星，其中同步轨道卫星一般仅需要配置较少数量，而非同步轨道卫星则由多层不同轨道高度和倾角的卫星构成规模庞大的卫星星座。卫星可采用透明载荷转发或者星上处理后转发的模式，星间采用微波链路或者激光链路转发数据，扩展用户的通信范围。

用户段主要是指用户终端设备，通常需要与所连接卫星系统适配，包括各种经过专门改造的手机终端和普通手机终端。

地面段包括测控站、运维管理中心、数据中心、地面基站设备以及连接核心网的设备。测控站和运维管理中心负责卫星网络、星座、数据、运营等的管理；信关站、地面基站设备以及连接核心网的设备负责数据的接入并连接核心网。

2.2 手机直连卫星技术挑战

当前从使用卫星的角度来看，手机直连卫星可分为基于 GSO 卫星和基于 NGSO 卫星两种技术路线。基于 GSO 卫星的技术路线源于卫星移动通信，技术相对比较成熟，只需要克服少量的困难便可快速实现业务拓展、扩大用户群体。基于 NGSO 卫星的技术路线相对而言面临更多的技术挑战。下面将从空口侧、卫星侧、网络侧和终端侧 4 个方面，结合 GSO 和 NGSO 技术路线的特点分析手机直连卫星相关技术挑战，具体见表 2。

2.2.1 空口侧技术挑战

手机直连卫星系统空口侧主要面临信道特性复杂、误码率高和星地精准同步的挑战。基于 LEO 卫星的手机直连卫星系统在信道特性和星地同步方面面临更大的挑战。

星地信道面临大尺度衰落和小尺度衰落两种不同的

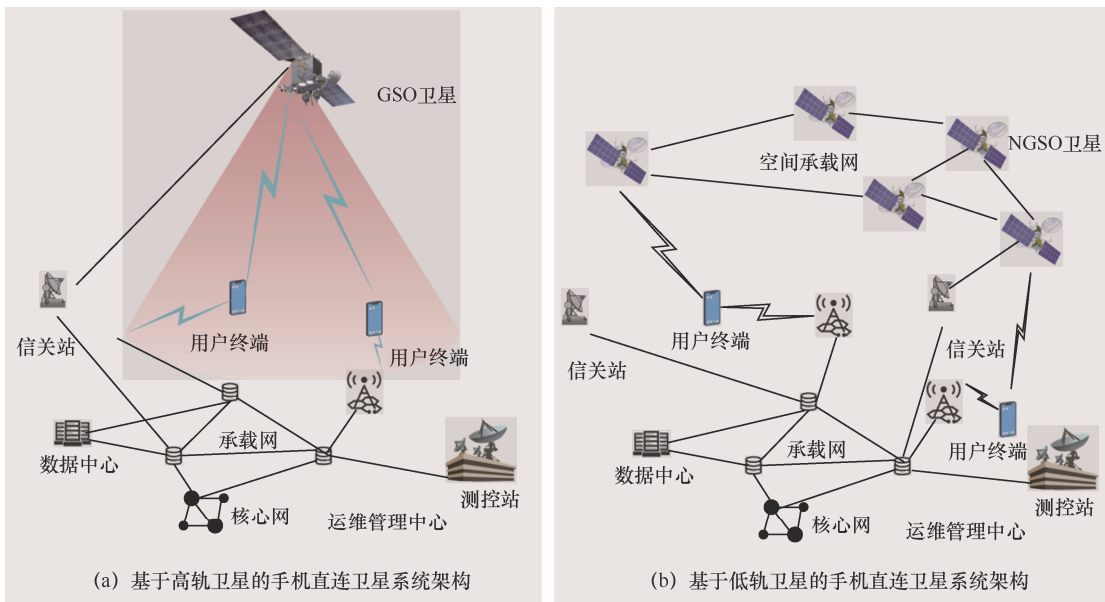


图 2 典型手机直连卫星系统架构

表 2 基于不同轨道卫星的手机直连卫星技术挑战

对比项	GSO	NGSO
空口侧	多普勒频移小, 时频同步简单, 通信时延大	多普勒频移大, 时频同步难, 通信时延较小
卫星侧	满足语音通信的星载天线较为成熟	满足宽带业务的星载天线要求天线尺寸大, 重量轻, 波束网络复杂
网络侧	网络认证鉴权, 业务漫游	网络认证鉴权, 业务漫游, 网络拓扑变化快, 波束切换, 频率复用, 多星协同难
终端侧	内置大功率天线, 多模块集成, 散热挑战大	内置大功率天线, 多模块集成, 散热等挑战相对于 GSO 方案较小

衰落特性^[14]。大尺度衰落以大气吸收、雨衰和地物损耗为代表, 小尺度衰落以多普勒频移、多径传播、闪烁效应为代表^[15]。卫星信号的传播会受到降雨、云雾、大气以及手机终端附近的植被或建筑物等多种因素的影响, 一方面造成了信道衰减的增加, 另一方面也使得其信道特性更加复杂。此外, 卫星信号质量变化相对较快, 这对信号的传输和处理带来了巨大的挑战, 进而影响星地无线通信系统的性能^[16]。

传统手机终端与地面基站距离近, 终端的移动性是产生多普勒频移的主要因素, 因此多普勒频移较小。同理, GSO 卫星动态性小, 多普勒频移影响也相对较小^[17]。由于 NGSO 卫星相对地面高速运动, 引起的多普勒频移达几十 kHz 至 MHz 级别, 因此, 手机终端与 NGSO 卫星网络之间的频率同步存在较大的困难, 尤其是与 LEO 卫星之间。假设卫星工作在 2 GHz 频段, 在距离地面 500 km 处以约 7.6 km/h 的速度运动, 则卫星运动引起的多普勒频移近 48 kHz, 远超现有 5G 通信技术体制的适应范围^[18-19]。

在频率使用方面, 当前基于 GSO 卫星的手机直连卫

星一般使用移动卫星服务 (MSS) 频段。基于 LEO 卫星的手机直连卫星, 有采用传统移动卫星服务频段的方案, 也有采用地面移动运营商通信频段的方案。采用地面移动通信的频段, 不符合国际电信联盟现行规则^[20]。采用这种频率使用方案, 首先, 因地面移动通信与手机直连 LEO 卫星采用相同的频段, 如何避免对频段内原有合法用户的有害干扰, 该方面的研究较为薄弱; 其次, 缺乏国际电信联盟统一的频率划分和保护, 手机直连卫星之间频率冲突现象突出, 频率兼容和频谱共享难度大。当前国际电信联盟已经就手机直连卫星业务可使用的频谱问题开展了研究^[21]。

由于两个方案的星地链路距离的巨大差异, 在通信时延方面二者也呈现出明显的区别。基于 GSO 卫星的手机直连卫星方案由于星地距离较远, 星地通信时延也相对较高, 终端-卫星-终端通信时延约为 270 ms^[22]。基于 LEO 卫星的时延通常在 50 ms 以内, 如 OneWeb 星座通信时延约为 30 ms, Starlink 的通信时延不大于 20 ms^[6]。

在卫星动态性方面, GSO 卫星和 NGSO 卫星也差别很大。GSO 卫星相对地面静止, 或星下点轨迹相对地面仅

以微小的幅度呈“8”字。然而，NGSO 卫星尤其是 LEO 卫星，其运动速度快，相对地面动态性大，会造成时频同步难题。

2.2.2 卫星侧技术挑战

手机直连卫星系统卫星侧面临两大技术挑战。一是宽带通信业务需求以及手持终端超小内置接收天线，要求星载部署超大阵面天线，对天线设计、功耗和重量等方面提出挑战；二是对于采用星载手机基站的技术方案，由于卫星平台能力有限，对星载基站载荷提出轻量化的要求。

当前基于 GSO 卫星的手机直连卫星技术主要用于满足语音和短消息的需求，相比 NGSO 卫星实现更高速率通信的代价更大，费效比低。典型代表有 Thuraya 卫星系统、海事卫星通信系统、天通一号卫星移动通信系统等。由于星地超大链路损耗，在卫星天线和功率受限的条件下，手机直连卫星通信速率为 kbit/s 级别。如天通一号卫星移动通信系统的外置天线专用卫星手机终端通信速率一般为 1.2 kbit/s、2.4 kbit/s、4.0 kbit/s，满足该通信速率要求的星载大天线设计相对较为成熟。与基于 GSO 的卫星相比，NGSO 卫星星座由于可以多颗卫星同时为多个用户提供服务，并且 NGSO 卫星距离用户终端更近，链路损耗相对较小，在天线能力和功耗同等的条件下能提供更高的通信速率。因此基于 NGSO 卫星的手机直连卫星技术未来主要用于满足宽带通信业务的需求。当前 NGSO 卫星平台承载能力相对较弱，在手机终端能力受限的条件下，存在链路预算不足的问题^[23]，必须极大幅度地提高卫星载荷的发射和接收能力^[24]。这意味着必须增大天线尺寸和波束数量。这将带来以下挑战：一是天线尺寸增大带来功耗和重量剧增的挑战，需要轻量化、低损耗、高集成的星载射频前端；二是对于超大规模的阵列，模拟波束网络非常复杂，特别是在多波束应用中，随着波束数量的上升，网络复杂度急剧增加，大口径相控阵的模拟波束成形网络实现难度非常大。

使用现有手机终端和星载基站的手机直连卫星技术，可实现直连卫星用户和地面基站用户接入同一个网络，降低网络时延。由于卫星平台能力有限，在轻量化、高集成、热管理等方面对星载基站载荷提出较高要求^[25]。

2.2.3 网络侧技术挑战

手机直连卫星网络侧涉及地面电信运营商通信网络和卫星运营商通信网络。由于前期地面电信运营商与卫星运营商独立发展，二者分别建立的通信网络在网络结构、标准体制、特征参数等方面存在较大差异，因此需要在网络认证鉴权、业务漫游等方面进行新的适配研究。除

上述地面电信运营商和卫星运营商独立发展通信网络，通过网络侧技术融合互联的手机直连卫星方式外，还存在基于 3GPP NTN 标准星地共同演进建设，以及在卫星网络中使用现有地面网络技术的方式。当前 3GPP NTN 标准规范仍在进一步研究中，而卫星侧采用地面网络的方式的性能仍需进一步测试验证。不管是针对哪种方式，如果卫星不能星间组网，在全球部署时都需要部署大量的信关站，部署和运营成本将急剧增加。

在网络运维方面，基于 GSO 卫星的手机直连卫星技术网络拓扑相对固定。基于 NGSO 卫星的手机直连卫星技术由于卫星网络拓扑变化快、时延大、波束覆盖面积有限，因此卫星帧结构、星内/星间波束切换、频率复用方法和多星协同方面面临巨大挑战^[25-26]。

2.2.4 终端侧技术挑战

基于 GSO 卫星的手机直连卫星系统终端侧主要面临手机终端小型化与链路预算不足的挑战。GSO 卫星和 NGSO 卫星由于星地距离相差巨大，星地空间自由损失也相差很大。在通信信号频率为 2 GHz 时，GSO 卫星到地面的信号损失高达 189.54 dB，而 LEO 卫星（以轨道高度 500 km 计算）到地面的信号损失约为 152.45 dB，链路损耗差约 37 dB。在使用超大星载天线后，基于 NGSO 卫星的手机直连卫星系统终端侧可采用消费者现有普通手机终端，终端侧基本不涉及重大技术挑战。消费者使用的普通手机连接地面基站，信号的传输距离一般是几千米，考虑到电磁和辐射标准、功耗、内部空间大小等因素，内置天线功率并不高；若与 GSO 卫星直连，信号需传输数万千米，链路损耗较大，需考虑在手机内置大功率天线。若基于现有卫星并改造手机终端实现手机直连卫星，需要在手机终端内置卫星通信专用模块。如何在有限的空间内将基带、射频处理、功率放大器、滤波器以及卫星模块高密度集成并降低功耗、增加散热，将是在手机终端小型化中面临的挑战。

3 手机直连卫星解决方案

针对手机直连卫星存在的技术挑战，下面将从空口侧、卫星侧、网络侧、终端侧 4 个方面分别对相应的关键技术进行分析。

3.1 空口侧

3.1.1 混合自动重传请求技术

针对星地信道特性复杂、传输误码率高的挑战，可考虑采用混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ）技术提高无线通信系统性能。HARQ 结合了自动重传请求（ARQ）和前向纠错（Forward Error

Correction, FEC) 两种技术, 在增强数据传输可靠性、提高系统吞吐量的同时降低通信时延。然而, 在手机直连卫星技术的应用背景下, 星地链路具有更高的传输时延, 这增加了 HARQ 机制的复杂性, 可以考虑以下解决方案。

(1) 优化 HARQ 的重传策略, 使其能够有效处理高时延的情况。例如, 可以根据信道质量的变化情况自适应调整重传次数, 在信道质量较好时减少重传次数, 在信道条件较差时增加重传次数。

(2) 选择重传丢失或损坏的数据块, 从而减少重传的数据量。

(3) 混合使用 ARQ 和 FEC 技术, 在传输过程中先尝试通过 FEC 进行纠错, 如果失败再进行 ARQ 重传。

(4) 根据当前信道质量变化自动调整传输参数, 实现自适应调制和编码, 在信道质量较好时, 可以使用高阶调制和低编码率来提高传输速率, 信道质量较差时则可以通过降低调制方式和提高编码率来提高传输的可靠性。

3.1.2 星地同步技术

面向 LEO 大多普勒频移场景, 提出一种基于多步进整数分频模式下的初始时频同步估计方法。

首先利用主同步信号 (Primary Synchronization Signal, PSS) 序列的时频特性, 在本地生成 $2N+1$ 组带有整数倍频偏的 PSS 时域序列组, 每组包含 3 个不同索引号的 PSS 时域序列, 将所有这些 PSS 序列分别与接收到的信号进行滑动互相关, 估算出 PSS 序列的起始位置, 并且判断出最大相关峰值所对应的本地 PSS 序列索引号, 确定扇区 ID。所设计算法检测度量函数如下

$$\text{Alpha}(\text{idx}, \text{icfo}, d) = \left| \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=0}^{L-1} |r(n+d)|^2}} \sum_{n=0}^{L-1} r(n+d) \cdot p_{\text{idx}, \text{icfo}}^*(n) \right|^2 \quad (1)$$

其中, $r(n)$ 为接收信号, $p_{\text{idx}, \text{icfo}}(n)$ 为本地 PSS 序列, idx 为扇区 ID 值, icfo 为整数倍频偏值, L 表示单个子帧内 PSS 的采样点长度。通过接收序列与 $2N+1$ 个本地 PSS 副本组进行滑动相关, 当最大相关峰值大于预设判决门限时, 得到最大的相关峰值所对应的位置偏移 d 作为接收到时域数据的定时点, 相关性最大的本地 PSS 序列所对应的扇区 ID 值和整数倍频偏值即为接收序列的扇区 ID 值和整数倍频偏值。

PSS 定时偏移估计以及整数倍频偏估计完成后, 利用时域的本地 PSS 序列共轭点乘接收到的时域 PSS 符号, 再分成两部分分别求和, 最后估计频偏大小

$$C_i = \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} r_{\text{pss}, i}(n) s_{\text{pss}}^*(n) \right] \times \left[\sum_{n=0}^{N/2-1} r_{\text{pss}, i}(n+N/2) s_{\text{pss}}^*(n+N/2) \right] \quad (2)$$

其中, $r_{\text{pss}, i}(n)$ 为第 i 副天线接收到的 PSS 序列, $s_{\text{pss}, i}^*(n)$ 为本地生成的 PSS 序列共轭, N 为正交频分复用 (OFDM) 符号 FFT 样点长度。如果接收为 2 副天线, 相关运算结果合并为 $C = C_1 + C_2$, 也可以多个 PSS 信号联合估计 $C_{\text{acc}} = \sum_l C^{(l)}$, 由此计算归一化小数倍频偏, 从而实现初始同步。

归一化小数倍频偏计算方法为

$$\varepsilon_f = \frac{1}{\pi} \text{angle}(C_{\text{acc}}) \quad (3)$$

其中, $\text{angle}(\cdot)$ 表示对复数求角度。

3.2 卫星侧

3.2.1 星载超大阵面天线技术

在星载天线波束成形中采用数字波束成形。采用数字器件, 在单元/子阵上对信号数字化, 波束的幅度与相位控制在数字域实现。数字波束成形可采用天线本地成形方式, 信号通过光纤与舱内基带处理器相连, 基带处理器从顶层对全阵多副子天线的波束扫描控制、信号路由进行调度, 每副子天线可以在独立扫描、波束汇聚、蜂窝模式、重构窄波束之间切换使用。除了天线本地的波束成形外, 通过光纤互联到基带处理器的信号, 还可以选择若干副相邻的子天线, 乃至全部天线进一步合成, 合成以后等同于采用更大口径、更高增益的天线, 该合成可在基带处理器上实现。为了提高星地链路预算, 可以考虑采用分布式天线阵列, 由多颗卫星的天线阵波形成叠加, 实现分布式波束成形。

3.2.2 星载轻量化基站载荷

传统手机基站由天线、远端射频模块 (Remote Radio Unit, RRU)、光纤、基带处理单元 (Base Band Unit, BBU)、机房等部分组成。其中 5G 基站中, BBU 的非实时部分被分离出来, 定义为集中式单元 (Centralized Unit, CU), 负责处理非实时协议和服务, BBU 的其他部分作为分布式单元 (Distributed Unit, DU), 负责处理物理层协议和实时服务。BBU 的部分物理层处理功能与原 RRU 及无源天线合并为大规模有源天线单元 (Active Antenna Unit, AAU)。

手机直连卫星技术可以考虑将基站部署到卫星上, 实现直连卫星用户和地面基站用户接入同一个网络, 减少网络时延。可以考虑将实时性要求高的业务接入和信令处理部分部署在卫星载荷上, 将网络控制、资源配置部分放置

在地面侧。如将 5G 基站的 DU 等部分部署在卫星载荷上，将 CU、AAU 部分部署在地面侧。轻量化的载荷可以降低制造和发射成本，便于手机直连卫星系统的快速推广应用。

3.3 网络侧

3.3.1 星地异构网络漫游技术

为了实现卫星与地面移动网络的网络、用户、业务、终端天地一体化，在星地异构网络环境下，地面移动网络用户单点签约，不换卡号，一键切换卫星网络和地面网络，最大程度确保用户对星地融合业务的一致性体验。主要技术如下。

一是星地网络融合：实现卫星核心网络与地面移动网络国际信令节点链路直通。在 No.7 信令国际网间结算（iSTP）节点及其网关侧，优化和配置卫星核心网媒体网关（Media Gateway, MGW）的信令代码、移动交换中心/拜访位置寄存器（MSC/VLR）的 GT（Global Title）码，确保漫游用户在被叫场景下正确地路由和寻址。

二是信令转换：卫星通信系统和地面移动通信系统可能在信令方面存在区别，需要开展信令转换技术研究。例如卫星侧采用 3G 宽带码分多址接入（Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA）移动应用部分（Mobile Application Part, MAP）信令协议，而地面移动通信网络采用 C-MAP 信令协议。此时需研究基于 GC 网关实现 G-MAP/C-MAP 协议转换，确保异构网络控制信息正确地翻译握手。

三是业务信令优化：优化手机终端的 SIM（eSIM）卡识别流程、入网鉴权流程以及通信业务信令流程。最终实现地面移动网络用户以漫游形式驻留卫星网络，发起和接

收卫星语音、短信业务。

3.3.2 基于网络二次鉴权的业务安全可控技术

在传统漫游组网方式下，存在漫入网络服务商不能自主掌控漫游用户和运营数据的问题，因此需要研究卫星网络二次鉴权认证技术，实现对来自地面移动网络用户卫星业务订购权限的管控。通过在卫星核心网增加用户归属方漫游码号权限表，记录用户归属方码号、用户 ID（来源于用户归属方用户关系管理系统）和业务权限（语音、短信），并以此数据为基础实现漫游业务二次鉴权。

3.3.3 星地融合的电路域 IMS 语音解决方案

星地融合的电路域 IP 多媒体子系统（IMS）语音解决方案主要是通过制定新的 IMS 应用协议栈，实现卫星移动通信网络与全 IP 化地面移动通信网络的协议转换、信令互通和媒体流互通，完成卫星与地面网络用户的互联互通。

其中，IMS 语音和电路交换（Circuit Switching, CS）语音的协议转换由卫星核心网的移动交换中心（Mobile Switching Center, MSC）、关口局（Gateway MSC, GMSC）、会话边界控制器（Session Border Controller, SBC）3 个网元完成并生成会话发起协议（Session Initiation Protocol, SIP）信令消息，IMS 语音和 CS 语音控制面信令的互通由网元媒体控制网关（MGCF）实现，IMS 语音和 CS 语音的媒体流互通由多媒体资源处理器（Multimedia Resource Function Processor, MRFP）和 IP 多媒体网关（IP Multimedia Media Gateway, IM-MGW）在卫星移动通信信关站控制下完成。主叫终端用户和被叫终端用户按照双方速率协商结果进行通话，如图 3 所示。

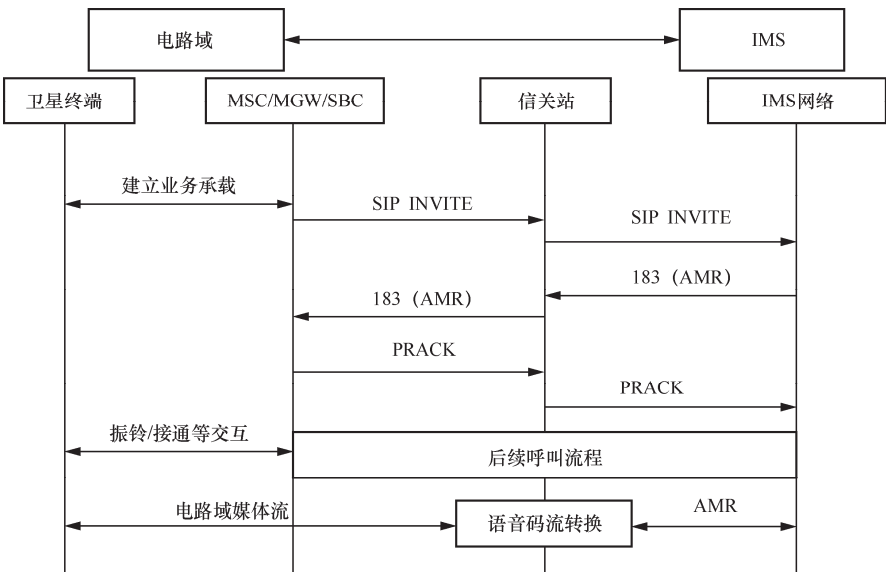


图 3 电路域 IMS 语音方案

3.4 终端侧

3.4.1 小型化内置手机卫星天线

由于手机的轻薄化设计需求,手机内部各组件高度紧凑、集成化,新增卫星天线将使得手机内部空间更加紧张,因此考虑天线共形设计,甚至天线与手机边框结构共形。在设计天线时,极化损耗也是必须考虑的因素。极化损耗一般发生在收发信号极化不匹配的情况下,如当线性极化天线接收圆极化天线信号时,会发生极化损耗。由于圆极化波可以有效减少雨雾天气对电磁波传输的影响,因此卫星通信常用的是圆极化波,而地面移动通信手机天线采用线性极化方式。当线性极化天线接收圆极化天线信号时,约有 50%的信号功率会因为极化损耗而无法传递到接收天线。该损失在手机终端这种小型化、能量受限、功率受限的应用背景下必须克服。因此,提出一种双线性极化天线定向拟合圆极化技术。该技术采用一个 3 dB 电桥耦合器对内嵌于手机的两个正交双频线性极化天线馈电,同时在高频段和低频段形成两个等幅相位正交的激励,实现多天线圆极化定向拟合,仿真

结果如图 4 所示。

3.4.2 软件可重构多功能芯片

手机终端内部板载元器件布局紧凑,增加卫星通信模块势必也会增加空间的大幅度占用。因此需通过改进工艺制程,将多个模块集成到一个 SoC 上。具体而言,包括如下技术:一是通过提高工艺制程,将基带、射频、存储等集成到一个 SoC 上,解决芯片小型化问题;二是采用微控制单元+数字信号处理器+专用集成电路(MCU+DSP+ASIC)的低功耗可重构 SoC 架构,解决软件可重构问题。

3.4.3 散热设计

由于手机终端的高度集成,为了避免在使用过程中器件发热累积而导致性能下降,影响用户体验,甚至损坏硬件,散热设计也成为必须重点考虑的问题。考虑使用更加先进、高效、稳定的均热板(Vapor Chamber, VC)液冷散热技术,其散热原理如图 5 所示。相较于传统的散热方式,VC 液冷散热技术具有更高的散热效率和更快的响应速度。具体解决思路如下。

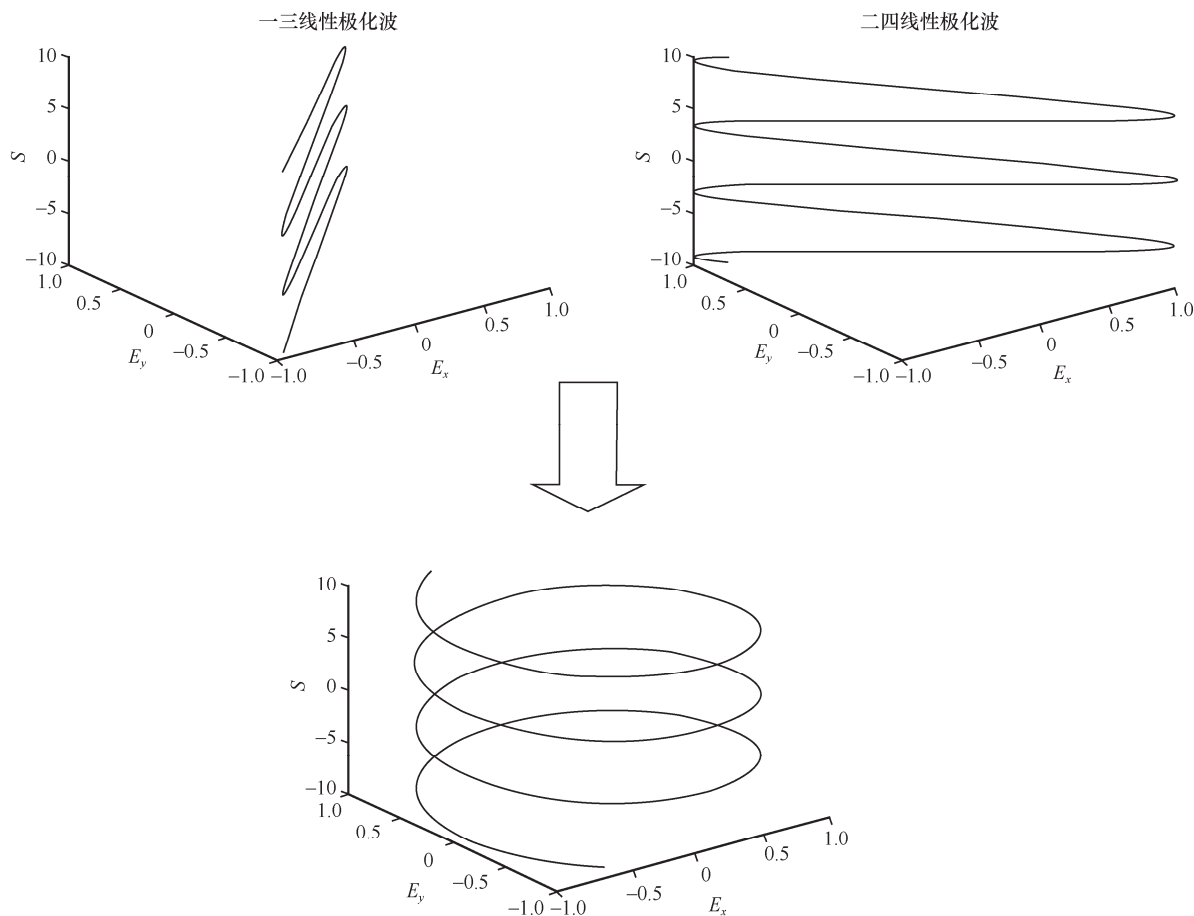


图 4 线性极化拟合圆极化仿真结果

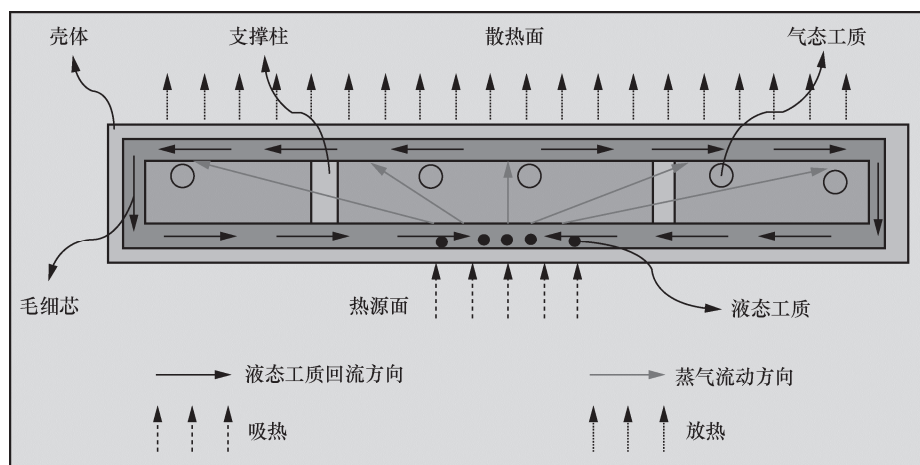


图5 VC液冷散热技术原理

（1）手机散热分析：采用红外测温 and 温度传感器相结合的方式，对手机终端在高负载工作情况下的温度分布进行测量和分析，确定实际散热需求和优化效果。

（2）散热技术研究：根据不同的应用场景，进行关键位置的热模拟，测试并分析散热效果和性能表现。根据测试和分析结果进行硬件布局，优化均热板和散热通路。

（3）散热器-芯片热性能建模：根据VC液冷散热器的实际情况，建立散热器-芯片的热性能模型，采用数值模拟的方法对散热效果进行模拟和预测，并对模型进行验证和改进。

（4）散热材料研究：研究和开发适合VC液冷的材料，提高到热效率和散热效果，确保手机终端长时间稳定工作。

4 结束语

手机直连卫星作为未来天地一体化融合的典型场景和技术手段，得到了国内外广泛的关注，新的研究和实践不断出现。本文针对基于不同轨道卫星的手机直连卫星系统进行研究，总结了手机直连卫星系统发展现状，分析了空口侧、卫星侧、网络侧和终端侧面临的技术挑战，提出了相应的关键技术及解决方案，为未来手机直连卫星技术的发展提供了技术支撑。需要注意的是，尽管手机直连卫星技术发展火热且具有广阔的应用前景，但其并不能取代地面移动通信的地位，而仅是作为地面移动通信的有效补充，以实现通信广域覆盖、解决网络覆盖匮乏区域的通信难题。此外，鉴于当前阶段手机直连卫星在技术上仍面临诸多巨大挑战，全面商业化还有一定的距离，

产业链上各厂商和科研院所需要逐步推进相关的研究工作，加大相关技术创新，以推动手机直连卫星通信的大规模应用。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] LLUC P. Satellite direct-to-device: a new differentiator and growth engine for mobile operators[EB]. 2023.
- [3] 王亚, 朱立东. 太空互联网发展及应用[J]. 国际太空, 2016(3): 43-49.
WANG Y, ZHU L D. Development and application of space Internet[J]. Space International, 2016(3): 43-49.
- [4] 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.
- [5] 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]. Space International, 2023(3): 58-62.
- [6] 张世杰, 赵祥天, 赵亚飞, 等. 星地融合网络: 一体化模式、应用与展望[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 775-787.
ZHANG S J, ZHAO X T, ZHAO Y F, et al. Integrated satel-

- lite-terrestrial networks: integrated mode, frequency usage and application prospects[J]. *Radio Communications Technology*, 2023, 49(5): 775-787.
- [7] 翟立君, 潘沐铭, 汪春霆. 卫星 5G 技术的发展和展望[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(1): 1-9.
- ZHAI L J, PAN S M, WANG C T. Development and prospect of satellite 5G technology[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(1): 1-9.
- [8] 赵瑞环, 杨艳芹, 宋洁琼, 等. 基于专利分析的手机直连卫星技术发展研究[J]. *军民两用技术与产品*, 2023(4): 29-32.
- ZHAO R H, YANG Y Q, SONG J Q, et al. Research on the development of direct connection between satellites and mobile phones based on patents analysis[J]. *Dual Use Technologies & Products*, 2023(4): 29-32.
- [9] 陈东, 张千, 秦兆涛, 等. 面向手机直连的卫星移动通信系统架构与特性[J]. *天地一体化信息网络*, 2023, 4(4): 11-18.
- CHEN D, ZHANG Q, QIN Z T, et al. Architecture and features of mobile communication satellite system for mobile phone[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2023, 4(4): 11-18.
- [10] 陈宏. 全球手机直连卫星应用发展与思考[J]. *卫星应用*, 2023(11): 37-43.
- CHEN H. Development and thinking of global mobile phone direct satellite applications[J]. *Satellite Application*, 2023(11): 37-43.
- [11] 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.
- [12] RACHEL J. FCC approves Linc's satellite-to-cell service[EB]. 2022.
- [13] HOSSEINIAN M, CHOI J P, CHANG S H, et al. Review of 5G NTN standards development and technical challenges for satellite integration with the 5G network[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2021, 36(8): 22-31.
- [14] YOU X H, WANG C X, HUANG J, et al. Towards 6G wireless communication networks: vision, enabling technologies, and new paradigm shifts[J]. *Science China Information Sciences*, 2020, 64(1): 110301.
- [15] 苏昭阳, 刘留, 艾渤, 等. 面向低轨卫星的星地信道模型综述[J/OL]. *电子与信息学报*, 2024: 1-19.
- SU Z Y, LIU L, AI B, et al. Survey of satellite-ground channel models for low earth orbit satellites[J/OL]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2024: 1-19.
- [16] 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.
- [17] LIN X Q, HOFSTRÖM B, WANG Y P E, et al. 5G new radio evolution meets satellite communications: opportunities, challenges, and solutions[M]//LIN X, LEE N. *5G and Beyond*. Cham: Springer, 2021: 517-531.
- [18] EULER S, FU X T, HELLSTEN S, et al. Using 3GPP technology for satellite communication[J]. *Ericsson Technology Review*, 2023, 2023(6): 2-12.
- [19] 翟华. 融合 5G 的卫星移动通信系统[J]. *空间电子技术*, 2020, 17(5): 71-76.
- ZHAI H. Integration of 5G and satellite communication systems[J]. *Space Electronic Technology*, 2020, 17(5): 71-76.
- [20] ITU. Radio regulations[S]. 2020.
- [21] 郝才勇. 手机直连卫星业务发展现状与挑战[J]. *中国无线电*, 2023(12): 36-38.
- HAO C Y. Developments and challenges of satellite-direct-to-phone[J]. *China Radio*, 2023(12): 36-38.
- [22] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16): TR 38.821[R]. 2019.
- [23] XU Z A, GAO Y, CHEN G J, et al. Enhancement of satellite-to-phone link budget: an approach using distributed beamforming[J]. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2023, 18(4): 85-93.
- [24] 孙晨华, 卢山, 赵海峰. 卫星互联网发展亮点分析及启示[J]. *卫星应用*, 2023(8): 19-24.
- SUN C H, LU S, ZHAO H F. Analysis on the highlights of satellite Internet development and its enlightenment[J]. *Satellite Application*, 2023(8): 19-24.
- [25] 张晓凯, 郭道省, 张邦宁. 空天地一体化网络研究现状与新技术的应用展望[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2(4): 19-26.
- ZHANG X K, GUO D X, ZHANG B N. Research status of space-air-ground integrated network and application prospects of new technologies[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2(4): 19-26.
- [26] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述[J]. *软件学报*, 2024, 35(1): 266-287.
- JIANG C L, LI Q, WANG Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network[J]. *Journal of Software*, 2024, 35(1): 266-287.

[作者简介]



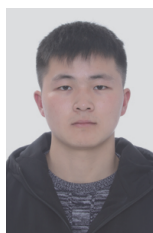
何元智（1974—），女，军事科学院系统工程研究院研究员，博士生导师，主要研究方向为卫星通信、卫星互联网。



张世杰（1979—），男，银河航天（北京）网络技术有限公司首席科学家，北京邮电大学兼职教授，主要研究方向为卫星互联网、空间通信、卫星总体设计。



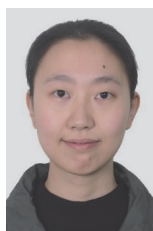
杨岭才（1975—），男，中国电信股份有限公司卫星通信分公司总经理，北京邮电大学兼职教授，主要研究方向为星地网络融合架构及关键技术。



李志强（1996—），男，军事科学院系统工程研究院博士生，主要研究方向为卫星干扰分析。



肖永伟（1976—），男，中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师，主要研究方向为低轨卫星系统设计。



刘韵（1990—），女，军事科学院系统工程研究院工程师，主要研究方向为卫星通信系统、空间信息网络。