



专题：手机直连卫星通信

手机直连卫星关键技术分析与发展展望

宋艳军, 肖永伟, 孙晨华

(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: 手机直连卫星技术的快速发展是卫星载荷技术突破、手机终端技术创新、体制标准制定并验证等多种因素叠加的结果, 通过对手机直连卫星发展现状的介绍, 总结了手机直连卫星的2条技术路线和3种实现方式。面对星地频率共用、星载天线、星载基站等技术瓶颈, 结合实际系统和应用场景给出了重点研究内容。探讨了作为5G通信重要组成部分和6G通信基础支撑的手机直连卫星技术未来的发展方向。

关键词: 手机直连卫星; 非地面网络; 频率共用; 星载天线; 星载基站

中图分类号: TN393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024097

Analysis and future development of direct-to-handset satellite key technologies

SONG Yanjun, XIAO Yongwei, SUN Chenhua

The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: The technology of direct-to-handset satellite is developing rapidly, which is the result of many factors such as the breakthrough of payload technology, the innovation in mobile phone technology, and the standards verification. Through the introduction of direct-to-handset satellite, two technical routes and three realization methods of direct-to-handset satellite were summarized. According to the technical problems of satellite-ground frequency sharing, space-borne antenna and space-borne base station, the key research contents were given based on the actual system and application scenarios. As the component of 5G communication and the basic of 6G communication, the future development of direct-to-handset satellite were discussed.

Key words: direct-to-handset satellite, non-terrestrial network, frequency sharing, space-borne antenna, space-borne base station

0 引言

在“手机直连卫星”这个名词出现以前, 铱

星 (Iridium)、全球星 (Globalstar)、海事卫星 (Inmarsat) 和中国天通卫星均支持类手机终端直连卫星进行通信^[1]。早在20世纪90年代就出现了

专题策划人: 彭木根

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-15



手机直连卫星的应用场景，当时的卫星手机终端在形态和收发能力上均不同于现在的手机。现在的手机直连卫星场景是使用同一部手机，既能接收地面移动信号，又能接收卫星信号，可根据网络情况选择使用地面移动网络或者卫星网络。

手机直连卫星是地面移动通信向天空延伸发展的必然过程，是实现5G全球覆盖的有效手段，也是塑造6G物理世界的重要支撑。相比高轨卫星，低轨卫星可提供更短的处理时延、更强的信号质量^[2-3]，轨道资源也更加丰富，通过星座组网可实现全球覆盖^[4-5]，这些特点为手机直连卫星技术发展提供了便利条件。随着卫星载荷、用户终端、火箭发射等技术的进步，低轨卫星星座的部署加快，推动了手机直连卫星通信的发展。

本文从手机直连卫星的发展现状出发，分析手机直连卫星的技术路线和实现方式；根据手机直连卫星的特点及实现方式，探讨手机直连卫星星地频率共用、星载天线、星载基站、手机天线等方面需要解决的关键技术，从星地融合、系统化、体系化角度分析提出手机直连卫星的发展趋势和未来关注的技术方向。

1 手机直连卫星发展现状

近几年，手机直连卫星发展迅速，2022年6月，第三代合作伙伴计划（3rd Generation Partnership Project, 3GPP）发布了非地面网络（non-terrestrial network, NTN）的相关标准，将手机连接卫星变得有据可依，间接推动了手机直连卫星的发展；同年9月，华为手机直连北斗卫星、苹果手机直连全球星，支持直连卫星手机的推出，实现了手机通过卫星网络发送短消息，直接推动了手机直连卫星的发展；2023年4月，AST公司基于BlueWalker3卫星和普通手机首次完成语音通信测试；同年8月，华为Mate60 Pro手机集成了天通卫星体制协议芯片，实现了直连卫星手机的商用化；2024年1月，SpaceX公司发

射6颗搭载了直连手机载荷的卫星，并与地面运营商合作，使用普通手机完成短信和数据等业务测试，同时完成了使用天地频率协调的初步探索，计划年底向全球提供短信服务；2024年3月，美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）通过了太空补充覆盖监管架构，使美国成为星地融合通信落地的国家，极大地促进了手机直连卫星及天地频率融合的发展。

目前，手机直连卫星的技术路线总体来说可以分为两类。一类是沿用现有标准，关键技术取得突破。当前主要的手机直连卫星应用均属于这类技术路线，便于手机直连业务的快速落地，但其或者采用私有协议而无法迅速做大生态链^[4]，或者为适应存量手机而增加星载基站的实现难度。第二类是研究制定新标准，技术取得全面突破。这类技术路线是指3GPP已开展的NTN标准制定工作，该标准可以支持手机直连卫星通信，但其关键技术正处于探索阶段，标准规范也正处于讨论完善阶段。手机直连卫星在两种技术路线的框架下分为以下3种主要实现方式。

（1）手机改直连卫星方式。在手机内增加适应卫星体制协议的芯片，使同一部手机中既有适应地面移动通信体制协议的芯片，又有适应卫星体制协议的芯片。采用此种方式的有华为手机+北斗卫星、华为手机+天通卫星、苹果手机+全球星等。此种方式由手机厂商主导，手机厂商为适应卫星能力和体制协议，加大手机终端相关技术投入，促进了手机的芯片、射频、天线等技术进步。随着技术的突破与成熟，越来越多的手机厂商（特别是中国手机厂商）将加入手机改直连卫星方式的阵营。

（2）卫星改直连卫星方式。将地面基站改动后布置在卫星载荷（星载基站）上，直接使用现有的4G手机接入卫星即可完成手机直连卫星通信。实现此种方式的卫星厂商有SpaceX公司的

Starlink-V2 mini 卫星和 AST 公司的 BlueWalker3 卫星等。此种方式由卫星厂商主导, 卫星厂商根据低轨卫星的信道特性、运行特点, 对地面移动通信协议进行了适应性研究, 并移植到星载基站上, 推动星载基站、星载天线等技术的发展。由于该实现方式是面向存量手机的手机直连卫星解决方案, 有技术能力的卫星厂商通过此方式可以快速抢占市场, 因此这在中期是一种比较好的解决手机直连卫星应用的方式。

(3) 基于 NTN 标准逐步实现手机直连卫星。3GPP 在开始制定 5G 标准之初, 就计划将卫星通信与移动通信融合^[7], 建立一个 NTN, 并将 NTN 作为未来卫星网络的标准, 以解决全球 90% 以上区域缺少通信手段的问题, 保证无服务或服务不足地区的互联网服务的可达性和连续性, 同时提高地面网络应对自然灾害和人为灾害时的能力。NTN 标准经历了 Release 15 (Rel-15) 阶段研究信道场景等需求研究^[8]、Rel-16 阶段潜在解决方案研究^[9-10]、Rel-17 阶段 NTN 具体技术研究和标准确定。在此期间, 中国移动、中兴通讯、中信科移动、紫光展锐等公司开展了基于 NTN 标准的手机直连卫星在轨验证。

综上所述, 手机直连卫星的 3 种实现方式各有如下优缺点。

(1) 手机改直连卫星方式不需要发射卫星, 缩短了卫星建设周期, 降低了成本, 使手机厂商可以根据各自的技术实力自主研发, 见效快, 但由于通信速率限制, 其仅能解决基本通话问题。

(2) 卫星改直连卫星方式可以实现目前全球数亿的存量手机直连卫星, 对于个人用户来说, 不用更换手机即可体验卫星互联网服务。这种实现方式的驱动是卫星厂商, 要建设一个手机直连卫星网络需要较高成本和周期, 并且有许多复杂的关键技术需要攻关, 实现难度较大。同时, 采用 4G-LTE 体制, 系统能力受限, 不利于后续 5G/6G 移动通信的发展。

(3) 基于 NTN 标准实现手机直连卫星的优点和缺点同样突出。NTN 标准是集全世界行业内公司、专家的智慧而制定的, 其技术的可行性、系统的可用性均是经过充分论证和研究的, 一旦发布实施, 将会是一个合理可行的方案。但是, 目前 NTN 的技术和架构正处在初步研究阶段, NTN 网络部署、卫星节点建设、与 5G NR 整合等方面均存在障碍^[11-12], 从标准的研究制定, 到系统的建设、手机终端的研制, 整个周期很长, 无法快速满足当前偏远地区的通信需求。

因此, 由于服务需求不同、商业驱动不同, 在未来几年内, 手机直连卫星的 3 种实现方式将会共存, 但长期来看, 大概率会走向基于 NTN 标准的技术路线。无论未来手机直连卫星朝哪个方向发展, 星地频率共用、星载高增益天线、星载高性能基站、手机终端高增益天线等都是需要解决的关键技术。

2 制约发展的关键技术

2.1 频率共用技术

目前, 国际上关于星地频率的使用规则均在国际电信联盟 (International Telecommunications Union, ITU)《无线电规则》的整体框架下进行。ITU《无线电规则》的“频率划分”章节中将 8.3 kHz~300 GHz 的频段划分给地面和卫星, 有些频段单独给地面/卫星使用, 有些频段既划分给地面又划分给了卫星。各个国家使用星地共用频段时, 会根据各自国内的需求考虑将这些频段用于地面或者卫星。总体而言, 目前星地频段已经按照规则完成分配, 且分开使用。

根据现有无无线电使用规则, 在手机直连卫星的场景下实现全球覆盖必然会对某些地区造成频率干扰, 因此需要研究天地频率干扰规避和频率共用相关技术。

(1) 卫星适应地面通信频率的频率共用

低轨卫星在移动过程中, 会经过多个国家或



地区，可以按照各个国家或地区的要求，以地面通信频率为主，通过不断更改卫星的发射和接收频率，避免星地间频率干扰。此种方式的好处是能够服务全球所有地区的用户，可以有效形成与地面运营商的合作关系，缺点是地面通信频率在不同国家或地区分散在 600 MHz~2.4 GHz 的多个频段，为了能够适应全球的工作范围需要研究 600 MHz~2.4 GHz 的宽带射频通道和天线，同时还需要研究基于服务对象位置的频率干扰规避策略。

（2）星地间、星星间、系统内频率干扰规避

手机直连卫星时不仅需要考虑卫星和地面之间的频率干扰，还要考虑不同系统卫星之间的频率干扰，同时要考虑系统内不同卫星之间对同一个用户的干扰。由于系统内部的工作频率可以提前规划，借鉴地面频率多色复用规则，研究星地统一频率多色复用策略，可以避免星地间、星星间、系统内的频率干扰。但在用户即将跨星切换时，系统内源卫星和目的卫星对用户同时覆盖可能造成同频干扰，此时应考虑将两颗卫星配置成不同频点，减少干扰，但这样又会引起用户切换的复杂度增加，因此需要针对特殊场景研究频率干扰规避策略。

（3）频率共用技术对星载天线波束成形提出了高要求

由于卫星与地面用户相对位置快速变化，星载天线如果不随着卫星移动而调整波束成形将会导致覆盖区域变大，进而引起对其他卫星或地面设施的干扰。因此，对星载天线的控制策略也是频率干扰需要研究的一部分内容，通过研究手机直连卫星频率共用技术可以促进星载天线技术的发展。

（4）使用非授权频段

使用非授权频段无须授权，但要与其他通信体制共存，共同竞争信道资源。非授权频段分布在 5~6 GHz 和 Ka 频段的多个频段，由于 5~6 GHz 的频率与地面 5G 通信频率相近，2 种信号的星地

传输衰减和处理方法大致相同，可以选择 5~6 GHz 这段频率作为手机直连卫星的天地共用频率。同时借鉴 4G 使用许可证辅助访问 (licensed-assisted access, LAA) 实现非授权频谱接入^[13]，在手机直连卫星场景下，利用授权频谱接入地面网络，之后通过地面网络辅助实现手机利用非授权频谱接入卫星。

（5）与地面电信运营商合作

手机直连卫星的星地频率共用问题单从技术层面无法被有效解决，需要联合地面电信运营商共同规划频率，进行区域内星地频率统一协调。以 SpaceX 公司的手机直连卫星用频为例，SpaceX 公司向 FCC 申请用于手机直连卫星业务的频段（原地面使用频段），同时与地面电信运营商签订合作协议，开展手机直连卫星试验验证。SpaceX 公司申请手机直连卫星频段与合作运营商的关系见表 1，可以看出，SpaceX 公司申请手机直连卫星频段覆盖目前合作的地面电信运营商使用频率，同时也为未来拓展合作奠定了基础。2024 年 3 月 14 日，FCC 批准 SpaceX 和其他卫星运营商使用有合作关系的地面电信运营商频率资源，极大地推动了星地频率共用的进步。

表 1 SpaceX 公司申请手机直连卫星频段与合作运营商的关系

申请手机直连卫星频段/MHz	已达成合作的地面电信运营商
614~652	—
663~698	—
698~758	美国 T-Mobile、加拿大 Rogers、 澳大利亚 Optus、日本 KDDI
775~788	日本 KDDI
805~806	—
824~849	美国 T-Mobile、日本 KDDI
869~894	美国 T-Mobile、日本 KDDI
1 850~1 915	美国 T-Mobile
1 930~1 995	美国 T-Mobile、澳大利亚 Optus、日本 KDDI
2 305~2 320	—
2 345~2 360	澳大利亚 Optus

2.2 星载天线技术

地面4G-LTE通信能够为用户提供100 Mbit/s的峰值速率和10 Mbit/s的体验速率,地面5G通信能够为用户提供1 Gbit/s的峰值速率和100 Mbit/s的体验速率,当前手机直连卫星仅能提供kbit/s量级的数据服务,比地面4G-LTE通信的体验差很多。受手机直连卫星通信场景限制并根据服务能力需求,手机直连卫星要想实现10 Mbit/s量级的数据传输和服务用户最大化,必须增加卫星的收发能力,即星载天线应具备很强的收发能力。手机直连卫星的星载天线需要具备波束高增益、波束数量多、波束覆盖小、波束可成形、波束跳变快、波束带宽大等要素。

(1) 波束高增益

星载天线应具备较高的发射等效全向辐射功率(equivalent isotropic radiated power, EIRP)值和接收G/T值。以L/S频段、500 km低地球轨道卫星为参考进行星地链路预算,同时参考SpaceX公司、AST公司公布的天线指标对比与实测结果,星载天线辐射的EIRP值需要达到58 dBW,才能使手机直连卫星的通信速率达到10 Mbit/s量级。由于手机用户更注重下载速率的服务体验,因此上行速率比下行速率的要求低,达到Mbit/s量级即可。以手机发射功率23 dBm为例,星地链路损耗变化相对固定且有一定规律,要实现Mbit/s量级的数据传输,需要卫星具备不小于15 dB/K的G/T值。星载天线在考虑高增益时,也要考虑其

功耗和散热能力,确保整星能够为其提供充足能源。

(2) 波束数量多

卫星用户侧的星载天线需要灵活调度,多数情况下使用阵列形式,星载阵列天线的使用需考虑指向损失,俯仰角越大,指向损失越大,因此星载阵列天线的俯仰角指向变化最大值不超过60°。以卫星轨道高度500 km为例,当卫星俯仰角为60°时,卫星视场内覆盖面积达到318万平方千米。实现如此大面积区域内的信号覆盖,如果使用宽波束,势必会造成功率浪费和频率干扰,因此应使用点波束进行目标位置覆盖。考虑避免出现与地面频率、其他卫星频率相互干扰的问题,需要将点波束覆盖半径设置为10~50 km,如果使用点波束覆盖卫星视场面积,需要数百至上万个点波束,波束覆盖与波束个数对应关系见表2。星载天线无法实现如此多的点波束,只能采用点波束结合波束跳变^[14-15]功能实现卫星视场全覆盖,由于点波束跳变采用时分复用原理,每跳变一次需要的时间固定,如果全部跳完整个卫星视场,需要的时间为秒级,这个等待时间长度对于用户来说是无法忍受的。因此,需要研究星载天线的点波束数量、跳变位置数量、波束跳变策略等内容,以优化服务等待时间。

(3) 波束覆盖小

星载天线的波束覆盖面积小,可以有效减少与地面频率、其他卫星频率的同频干扰问题,由

表2 波束覆盖与波束个数对应关系

卫星最大 俯仰角/(°)	手机终端 对应仰角/(°)	卫星视场内 覆盖面积/km ²	波束半径10 km 波束个数/个	波束半径15 km 波束个数/个	波束半径20 km 波束个数/个	波束半径50 km 波束个数/个
60	21	3 184 457	10 136	4 505	2 534	405
55	28	1 933 231	6 154	2 735	1 538	246
50	34	1 263 749	4 023	1 788	1 006	161
45	40	855 310	2 723	1 210	681	109
40	46	586 509	1 867	830	467	75
35	52	400 953	1 276	567	319	51
30	57	269 018	856	381	214	34



于波束覆盖面积与星载天线的波束角有关，而波束角与天线的面积有关，波束覆盖面积越小，星载天线的面积越大，大口径星载天线工程实现难度越大。因此，需要研究同等天线面积条件下减小波束角的方法。

(4) 波束可成形

由于低轨卫星的高速运动，地面目标终端相对卫星基本是静止状态，二者之间位置变化引起星载天线方向图变化，如果改变星载天线方向图，会导致波束覆盖范围的增大与变形，将对周边波束或地面基站造成频率干扰。因此，需要研究星载天线的波束成形技术。

(5) 波束跳变快

由于星载天线无法提供大量点波束，需要结合波束跳变实现卫星视场内的覆盖。波束跳变的周期与通信协议中规定的资源调度周期有关，如4G-LTE的资源调度周期为10 ms，5G的资源调度的最小周期为125 μ s，如此快速的资源调度给星载天线波束跳波控制带来了挑战。

(6) 波束带宽大

当前手机工作的频率分布在700 MHz~2.4 GHz各个频段，要想实现手机直连卫星的全球通信，需要卫星在全球范围内不断切换工作频点以适应所在地区的频率规则，这就要求星载天线具备700 MHz~2.4 GHz的收发能力，而当前手机直连卫星的天线工作频段在几十MHz以内，因此需要研究适应大带宽的星载天线。

2.3 星载基站技术

一直以来，卫星的处理模式分为透明模式和再生模式，对于手机直连卫星来说，也同样存在这两种模式，从服务时延、通信效率、资源调度的实时性等方面考虑，手机直连卫星应该使用再生模式，即通过星载基站完成用户接入、数据信息交互、资源调度等功能，SpaceX公司的手机直连卫星是再生模式，星上实现了4G-LTE的星载基站。由于星载基站的服务范围广、管理用户

多、业务种类多，又是卫星的数据面和控制面中心节点，所以需要针对手机直连卫星的应用环境和使用特点，研究多体制高性能星载基站技术。星载基站技术的特点如下。

(1) 需适应多种通信体制

手机直连卫星的3种实现方式决定了将会有不同通信体制的手机用户同时接入星载基站的需求，其星载基站不仅需要具备不同用户同时接入、与不同核心网交互等功能，还要能适应4G-LTE、5G、NTN-NR、NTN-IoT等多种通信体制协议，这对星载基站提出了很高的要求。在手机直连卫星场景中，分别针对每种通信体制单独存在、多种体制共存等不同情况，开展星载基站研究。

(2) 服务范围广、接入用户多

地面4G基站的覆盖范围为1~3 km，地面5G基站的覆盖范围为100~300 m，而低轨卫星星载基站的覆盖范围由卫星轨道高度和星载天线工作仰角决定，其覆盖范围是地面4G、5G基站的上万倍，覆盖范围上的差距，决定了一个星载基站需要接入和管理更多的用户终端，因此需要研究海量用户的资源分配技术、大算力高性能星载基站平台。

(3) 移动性管理难度大

由于基站与手机用户间的相对位置不断变化，需要对手机用户进行移动性管理。与地面移动通信系统的基站位置固定不同，手机直连卫星的星载基站自身具有高速移动性，因此星载基站不只要对手机用户进行移动性管理，还要对自身的移动性进行管理和信息上报，这就导致按照地面基站的管理方法无法管理星载基站，造成星载基站的移动性管理难度加大。因此，需要研究星载基站移动性管理策略、手机直连卫星用户的移动性管理策略等。

(4) 多波束控制策略复杂

手机直连卫星具备为整星视场内的用户提

供服务的能力,要求星载天线形成数十个点波束的同时,还应具备点波束跳变功能,星载基站需要根据手机用户的服务要求和星载天线的使用特点,控制星载天线的波束指向,调度其点波束资源。由于服务的用户数量大、调度的点波束个数多,在调度点波束时不仅要考虑点波束的空间维度(点波束数量),还要考虑点波束的时间维度(点波束跳变时分复用),同时要考虑用户分布特点、用户优先级等用户维度。因此,星载基站的波束控制非常复杂,需要综合考虑多种因素,研究星载基站的多波束控制与调度策略。

2.4 手机天线技术

在手机直连卫星中,卫星与地面通信传输距离长,对卫星的指向要求高,手机与卫星之间的传输链路损耗大,制约了通信速率。传统的卫星电话往往搭载一根体积大、长度长、增益高的卫星天线。但对于一部大众智能手机,天线受制于终端体积和功耗,通常采用的是低增益全向天线,因此一般无法做到连接卫星完成信号同步和系统同步。若需要在大众手机上实现卫星通话,不仅需要提高星载天线收发能力,也需要增强手机天线收发能力,具体需求如下。

(1) 增强接收能力

手机的全向辐射灵敏度可衡量手机接收空间信号的能力,在手机直连卫星场景下,星地下行链路传输速率一方面由星载天线的发射 EIRP 决定,另一方面由手机的接收能力全向辐射灵敏度决定,因此需要研究超表面、透镜等新型天线设计方法。

(2) 提高发射增益

手机的辐射功率是 200 mW (即 23 dBm),在手机直连卫星场景下,为避免引起对其他基站和用户的干扰,此辐射功率不会增大,但可以通过提高手机天线的发射增益,而降低射频通道功放的输出功率,以达到降低整机功耗、增长待机

时间的目的。因此,提高手机天线发射增益技术,是解决基础设施缺乏的偏远地区手机超长待机需求的有效措施。

(3) 手机天线的方向性需特殊设计

地面移动通信系统的基础设施很完备,手机周围各方向布满了基站,手机可以在各种姿态下进行通信;在手机直连卫星场景下,手机直连卫星星座虽然由成百上千颗卫星构成,但在手机用户上空同时可见、可用的卫星数量较少。由于卫星位置和通信方向既相对固定,又实时快速变化,为适应低轨卫星位置的快速变化,要求手机天线辐射信号是全向的,但同时卫星的移动又会导致星地之间通信链路受到遮挡,引起星地通信中断问题,所以为实现可靠通信需要研究手机直连卫星手机天线的方向性控制方法。

3 手机直连卫星发展展望

手机直连卫星的痛难点需系统化解决。目前,手机直连卫星主要有两个痛难点问题需要尽快解决:一是卫星载荷的关键技术突破问题,二是星地一体协调共用问题。卫星载荷需要突破的关键技术主要有星载天线技术、星载基站技术。星载天线技术与卫星平台技术、火箭运载能力相关,星载基站技术与地面核心网、用户终端息息相关,同时星载天线技术和星载基站技术之间也有波束资源控制调度等技术上的关联,因此,对于卫星载荷关键技术的研究需要以卫星载荷为分系统进行整体考虑,以星地系统为参考进行优化。星地一体协调共用要以星地频率共用的研究成果为基础,卫星运营商与地面运营商合作,开展手机直连卫星系统网络的常态化运营,同时持续开展手机直连卫星系统优化、技术体系等方面的研究,从星地系统层面、面向人机物的服务层面布局研究内容。

手机直连卫星实现地面与非地面一体化通信。NTN 与地面 5G 网络本质是使用同一设计,



由于5G NR的前向兼容性，如果采用NTN标准的手机直连卫星技术路线，NTN协议能够很好地融合地面5G网络协议。手机直连卫星系统可将地面移动通信与卫星融合，实现全球覆盖，即使发生地震、海啸等自然灾害，通信也能保持较高的可用性和鲁棒性。随着手机直连卫星技术的发展，除了地面移动通信系统会接入手机直连卫星系统，未来极低地球轨道卫星、高空平台、无人机也有可能接入手机直连卫星系统，因此需要研究支持多样化异构网络接入、多星分布式协同MIMO、多平台分布式协同MIMO等技术。

手机直连卫星是未来6G物理世界的基础。6G要实现“人联、物联、万物智联”，需要一个全球覆盖的网络，手机直连卫星系统可实现地面与非地面（高轨卫星、低轨卫星、极低轨卫星、高空平台、无人机等）一体化通信，能为6G提供全球覆盖，除此还可以提供低时延、精确定位等能力，成为6G网络的重要组成部分。针对未来6G通信需求，可研究通信感知一体化、超大规模连接、超高可靠通信、高精度定位等技术。

4 结束语

随着卫星系统建设成本降低、载荷关键技术突破、商业航天快速发展的多重作用，手机直连卫星变成了现实，SpaceX公司和AST公司均已发射了能够实现存量手机直连的卫星，华为、苹果等公司利用手机终端技术创新实现了偏远地区的人们能够随时发送短消息或者语音通话，在NTN体制标准上持续研究促进手机直连卫星发展。手机直连卫星将卫星系统与地面移动通信系统结合，利用卫星系统的全球覆盖特点，解决地面移动通信系统无法覆盖偏远和人口稀少地区的问题，推动了天、空、地一体化通信的发展。手机直连卫星是未来6G通信的基础，通过解决立体组网一体化架构、终端一体化、频率一体化等若干关键技术，将实现天、空、地的万物智联。

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] 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.
- [3] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 505-510.
SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of GEO and LEO broadband satellite communication system[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 505-510.
- [4] 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.
- [5] 王艳峰, 谷林海, 刘鸿鹏. 低轨卫星移动通信现状与未来发展[J]. 通信技术, 2020, 53(10): 2447-2453.
WANG Y F, GU L H, LIU H P. Status quo and future development of LEO satellite mobile communication[J]. Communications Technology, 2020, 53(10): 2447-2453.
- [6] 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.
- [7] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN关键技术研究及演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21.
MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 10-21.
- [8] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks: TR 38.811[S]. 2020.
- [9] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2019.
- [10] 3GPP. Study on using satellite access in 5G: TR 22.822[S]. 2018.

- [11] EL JAAFARI M, CHUBERRE N, ANJUERE S, et al. Introduction to the 3GPP-defined NTN standard: a comprehensive view on the 3GPP work on NTN[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2023, 41(3): 220-238.
- [12] 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.
- [13] 田力, 袁弋非, 张俊峰, 等. 5G 随机接入增强技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
TIAN L, YUAN Y F, ZHANG J F, et al. 5G random access enhancements[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2021.
- [14] 唐璟宇, 李广侠, 边东明, 等. 卫星跳波束资源分配综述[J]. 移动通信, 2019, 43(5): 21-26.
TANG J Y, LI G X, BIAN D M, et al. Review on resource allocation for beam-hopping satellite[J]. Mobile Communications, 2019, 43(5): 21-26.
- [15] 丁祥, 续欣, 张森柏, 等. 业务自适应的卫星跳波束系统资源分配方法[J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1(3): 29-35.
DING X, XU X, ZHANG S B, et al. Service-adaptive resource allocation method for satellite beam-hopping systems[J]. Journal of Army Engineering University of PLA, 2022, 1(3): 29-35.

[作者简介]



宋艳军 (1983-), 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通信、卫星载荷。



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通信、低轨体制协议。



孙晨华 (1964-), 女, 中国电子科技集团公司第五十四研究所正高级工程师, 主要研究方向为卫星通信、天基网络协议、天基网络融合。