



专题：6G 空间互联网

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

孙耀华，彭木根

(北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室，北京 100876)

摘要：为满足全时、全域通信需求，低轨卫星通信将成为 6G 的重要组成部分。通过对地面移动通信协议体制进行适应性改进，低轨卫星可为地面移动手机终端提供直连服务。介绍了面向手机直连的低轨卫星通信关键技术和商业项目发展现状，探讨了未来需解决的关键问题和潜在技术途径。

关键词：低轨卫星通信；手机直连卫星；星地融合网络

中图分类号：TP393

文献标志码：A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2023031

Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions

SUN Yaohua, PENG Mugen

State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing
University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: In order to realize anytime and anywhere communication, low earth orbit (LEO) satellite communication becomes a key component in 6G. Through the adaptive enhancement of terrestrial mobile communication protocol, LEO satellites can provide direct connection services for mobile phones. The related key technologies and the recent progress of various commercial programs were introduced, and future issues were also identified together with potential technical solutions.

Key words: low earth orbit satellite communication, direct connection between satellites and mobile phones, integrated satellite-terrestrial network

收稿日期：2023-01-15；修回日期：2023-02-11

基金项目：国家重点研发计划项目 (No.2022YFB2902600)；北京市新一代信息通信技术创新项目 (No.Z211100004421017)；中国通信学会青年人才托举项目 (No.2021QNRC001)

Foundation Items: The National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB2902600), The Beijing Municipal Science and Technology Project (No.Z211100004421017), The Young Elite Scientists Sponsorship Program by China Institute of Communications (No.2021QNRC001)



0 引言

当前, 5G 已得到较大规模的部署与应用, 各国正在争相开展 6G 技术的储备和研发工作。随着载荷平台、火箭发射等技术的突破, 低地球轨道 (low earth orbit, LEO, 以下简称低轨) 卫星通信将在 6G 时代扮演重要角色^[1-2]。相比高地球轨道 (以下简称高轨) 卫星, 低轨卫星可提供更强的信号质量, 轨道资源也更加丰富, 能够形成覆盖全球的密集组网星座^[3]。在该背景下, 各类低轨卫星项目不断涌现, 国内外代表性项目包括 Starlink、Kuiper、OneWeb 以及我国的虹云和鸿雁工程等。

传统低轨卫星通信中, 为了提升信号发射和接收增益, 进而提升通信速率, 终端往往采用尺寸较大的抛物面天线或平板天线, 而在协议上, 主要采用卫星通信自有协议, 例如, 基于数字视频广播 (digital video broadcast, DVB) 标准的协议等。然而, 面向 6G 时代提出的全时、全域个人通信能力要求, 如何实现普通手机直接通过卫星与外界通信成为产、学、研界关注的焦点^[4]。2022 年 9 月, 华为发布具备卫星通信功能的高端机型, 通过在手机中集成北斗通信所需的射频和基带硬件, 可在荒漠无人区、地震救援等无地面网络信号覆盖环境下对外发送文字和位置信息。此外, 苹果手机也集成了卫星通信功能, 通过与 Globalstar 合作, 实现了短消息发送。虽然华为和苹果产品均初步实现了普通手机与卫星间的通信, 但主要通过集成遵从卫星通信专有协议的通信硬件实现, 未涉及卫星通信和地面移动通信协议体制的融合。

本文探讨的“手机直连卫星”的含义限定为通过对地面第三代合作伙伴计划 (3rd Generation Partnership Project, 3GPP) 移动通信体制进行适应性改进增强来实现普通手持移动通信终端通过卫星与外界互联。从 Release 16

(Rel-16) 起, 3GPP 开始进行非地面网络 (non-terrestrial network, NTN) 的研究工作, 在 Rel-17 中开始进行具体系统设计^[5]。在应用测试方面, 中国移动联合中兴通讯、交通运输通信信息集团等完成了基于 3GPP Rel-17 NTN 协议的技术外场验证, 实现了基于地球同步卫星的 5G NTN 端到端全链路贯通, 而国外的 AST SpaceMobile、Lynk Global、SpaceX 等公司均提出了手机直连低轨卫星的服务计划, 部分公司发射了试验卫星。后文将首先对手机直连卫星的关键技术进行探讨, 随后对相关商业项目进展进行详细介绍, 最后给出未来的技术发展方向。

1 关键技术

本节首先对手机直连低轨卫星的基础关键技术进行梳理, 涵盖时频同步、随机接入、混合自动重传请求 (hybrid automatic repeat request, HARQ)、功率控制、调制编码方式 (modulation and coding scheme, MCS) 自适应以及卫星波束规划和调度等。

1.1 时频同步

由于低轨卫星相对地面高速运动, 在没有任何频偏补偿的情况下, 手机将面对几十千赫兹甚至兆赫兹级别的多普勒频移 (相比之下, 手机在高铁场景中仅需要应对几千赫兹的频偏), 给手机和网络间的时频同步带来较大挑战。在传统地面网络初始下行同步流程中, 手机首先进行主同步信号 (primary synchronization signal, PSS) 检测, 其中, 传统的互相关检测算法将接收信号直接与 3 组本地 PSS 序列进行互相关运算, 根据相关峰值确定粗定时点, 之后进行频偏估计与补偿, 并进行精定时同步。然而, 大频偏的存在容易显著降低 PSS 互相关性能, 导致同步失败。为此, 文献[6]提出了一种改进的粗同步算法, 利用快速傅里叶变换运算代替互相关运算中共轭乘法后的求和运算, 同时从算法中的指数形式频偏

中得到对应的整数倍频偏估计,简化了后续小数倍频偏估计,可更好地适应大频偏场景。文献[7]提出了一种基于差分运算和频域相关运算的同步算法,通过将 PSS 与本地序列进行差分运算减少频偏的影响,随后对差分运算得到的信号进行傅里叶变换并进行频域快速相关检测以降低运算复杂度,实验结果表明相较于传统互相关算法,改进算法在较大频偏环境下能实现快速、准确同步。

此外,由于设备晶体振荡器的输出频率与标称频率间存在偏差且卫星和用户相对移动状态时变,初始下行时频同步状态无法长久维持,手机需进行时频跟踪与调整。在 3GPP 协议中,定义了多种参考信号,其中,跟踪参考信号(tracking reference signal, TRS)作为一种特殊的信道状态信息参考信号,用于检测时偏与频偏的变化。具体地,用户对接收到的两个不同 TRS 位置处的信道频域响应进行互相关运算,可得到定时误差与频率偏移量。除了对参考信号进行检测,时频跟踪还可通过同步信号以及循环前缀检测实现。与此同时,网络侧可对多普勒频移变化率以及时延变化率进行预估算,辅助手机端进行时频偏调整。最后,考虑两个相邻帧间的定时误差变化较小,可基于前一帧定时位置直接得到当前的粗定时位置,以简化时频跟踪过程。

1.2 随机接入

手机直连卫星对随机接入过程的影响主要包括 4 个方面:一是星地传播时延不可忽略,四步随机接入时延较大;二是星地时频偏明显,影响前导码检测性能;三是卫星波束覆盖广,大量用户同时接入干扰严重,需要对前导码进行增强设计;四是卫星侧前导检测的窗口长度和用户侧接收随机接入响应的窗口长度可能需要进行对应调整,以适应波束小区的差分时延。

针对上述前 3 个影响,笔者前期提出了基于时频预补偿的两步随机接入流程和基于多个短序列灵活级联的前导结构^[8]。以卫星搭载可再生载

荷为例,两步随机接入流程如图 1 所示。首先,用户通过导航定位获得自身位置和速度,随后结合从下行同步信号块中获取的卫星位置和速度、接收同步信号块的频点和卫星上下行工作频点,预估用户和卫星间的初始定时提前量 t_{offset} 和频偏补偿 f_{offset} 。之后,用户随机生成一个可选的前导序列,相对于卫星指定的发送前导序列和物理上行共享信道(physical uplink shared channel, PUSCH)数据的时频资源位置,时间上提前 t_{offset} 、频率上偏移 f_{offset} 进行发送。其中,加扰 PUSCH 数据的序列由卫星波束的小区 ID、发起随机接入的时间点、选择的前导序列编号决定,PUSCH 中的数据包括用户身份标识、用户前导序列编号和时频偏移补偿。接着,卫星进行多用户前导序列检测,获得用户采用的前导序列编号,并估计用户的时频偏移。卫星在与前导序列相关联的 PUSCH 时频资源位置处提取用户身份信息、前导序列编号和时频偏移补偿,并通过下行广播信道向所有用户广播成功检测出的用户身份信息、前导序列编号、初始时频偏移补偿误差和分配给该用户的小区无线网络临时标识的组合。用户在一定时间窗口内监听卫星广播信息,当收到自身身份信息和前导序列编号时,认为成功接入网络。此时,用户根据卫星提供的时频补偿误差调整射频工作状态,设置小区无线网络临时标识,结束两步随机接入流程。

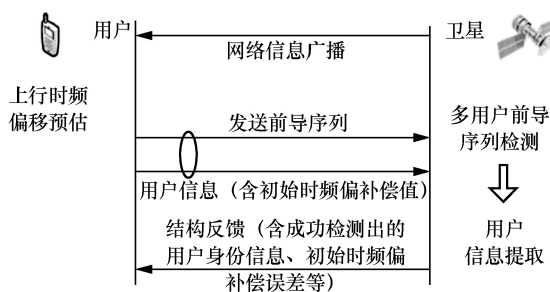


图1 两步随机接入流程

在前导序列设计方面,沿用 5G NR (new radio) 中的级联前导序列格式,即多段相同的短



前导序列 SQ 在时域上进行级联, 共同构成长前导序列 LS, LS 的基本格式如图 2 所示。其中, LS 的持续时间 T_{LS} 相比地面通信场景适当延长, 以便在卫星侧前导检测窗口内积累足够的信号能量。SQ 的持续时间 T_{SQ} 为物理随机接入信道子载波间隔 Δf_{PRACH} 的倒数, 即 $T_{SQ} = \frac{1}{\Delta f_{PRACH}}$ 。保护间

隔 (guard interval, GT) 主要用于吸收传播时延, 避免两步随机接入时当前用户的随机接入信号对其他用户的 PUSCH 数据造成干扰。循环前缀 (cyclic prefix, CP) 用于应对上行到达时间的不确定和最大时延扩展。 T_{CP} 和 T_{GT} 分别表示 CP 和 GT 的持续时间。

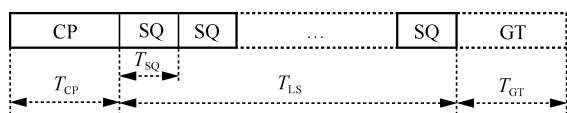


图2 LS的基本格式

SQ 由具有良好正交特性的 ZC (Zadoff-Chu) 序列生成, 与此同时, 对 ZC 序列进行循环移位、利用 m 序列对部分 SQ 进行加扰可以为用户创造更多可用的前导序列, 具有适应卫星波束大量接入特点。在此基础上, 基于短序列灵活级联和差异化功率分配的前导码生成如图 3 所示 (其中, $M(\bullet)$ 表示利用 m 序列加扰的 SQ), 其中, 对加扰 SQ 和未加扰 SQ 进行差异化功率分配, 使加扰 SQ 的功率高于未加扰 SQ 的功率, 并灵活调整 SQ 的级联顺序, 能够显著降低用户间干扰, 提高卫星侧上行定时检测结果的可靠性。此时, m 序列加扰的 SQ 用于整数倍定时提前估计, 且加扰后的序列可以更好地应对频偏影响。前期仿真结果表明, 当小区最大差分时延为 0.75 ms、补偿后的上行频偏残留为 4 kHz、信噪比为 -18~-6 dB、接入用户数为 32 个时, 所提基于短序列灵活级联和差异化功率分配的前导码生成方案相比主流方案可降低前导漏检率 20% 以上。

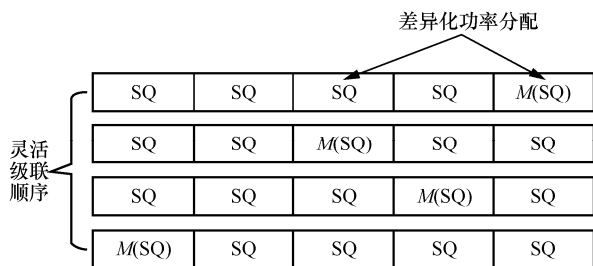


图3 基于短序列灵活级联和差异化功率分配的前导码生成

1.3 HARQ

考虑手机直连场景下的链路传播时延及用户业务时延需求, HARQ 协议也需要进一步增强。一方面, 现有 HARQ 机制利用并行停等式协议进行数据反馈重传, 但直连链路下的长传输时延特性使得现有机制中的 16 个并行 HARQ 进程无法充分利用传输资源。3GPP 相关提案证明了将并行 HARQ 进程数提升至 32~50 个的可行性, 但并行 HARQ 进程数的增加需要手机及卫星具备更大的数据缓存空间, 带来了额外硬件成本。此外, 用户链路预算有限, 为保证用户数据正确传输, 不仅需要考虑 HARQ 机制, 还需要考虑无线链路控制层自动重传请求 (automatic repeat request, ARQ) 机制的影响。从 3GPP TR38.821 可以看到, 在综合考虑 HARQ 进程数及无线链路控制层 ARQ 机制的情况下, 增加 HARQ 进程数是否会在系统吞吐量及频谱效率等方面带来性能提升依旧存在争议。

另一方面, 现有 HARQ 机制依赖接收侧的反馈, 因此, 发射端需要至少等待一个往返时延才可进行错误数据包的重传, 使得低时延业务的性能需求无法得到满足。为解决这一问题, 可在手机直连中针对特定业务取消 HARQ 机制, 并通过引入更低编码速率的 MCS 以及时隙聚合机制保障数据传输的可靠性。时隙聚合机制在多个相邻时隙上对同一数据进行重复传输, 接收侧在完成相应数据接收后进行软合并, 降低了信息反馈引入的时延, 但该机制的参数配置方法还需进一步研究, 如如何确定时隙聚合数目等。

1.4 功率控制和 MCS 自适应

受限于天线定向传输能力,手机终端上行数据传输时,可能会对其他低轨卫星用户产生干扰。同时,手机终端功耗严重受限,如何降低发射功耗、保障用户终端续航成为手机直连场景下需要解决的关键问题。为此,可沿用地面移动通信网络中的用户上行功率控制机制,通过控制终端发射功率,有效提升功率利用效率,降低用户间的同频干扰。传统地面网络上行功率控制分为开环功率控制和闭环功率控制,其中,开环功率控制主要应用于随机接入过程,手机依据系统广播信息及信道状态估计,直接确定自身发射功率;闭环功率控制主要应用于调度请求、业务数据的传输,此时,手机与网络间已建立连接,网络将接收的用户信号干扰比(signal-to-interference ratio, SIR)与预期值进行对比,基于此下发功率控制指令。手机结合该指令以及开环控制中的有关信息,完成发射功率计算。

从机制上可以看到,开环功率控制和闭环功率控制均依赖信道状态信息,然而,星地信道具有显著的快变特点,导致发射功率调整始终落后于信道变化。另外,功率控制震荡产生示意图如图4所示,过短的功率控制周期还容易导致手机发送功率振荡。为此,本文在现有机制的基础上提出了适用于手机直连的上行功率控制方案。首先,手机端根据历史信道信息对下一时刻的上行信道状态进行预测,上行发射功率由预测信道状态信息及历史信道状态信息共同确定。考虑直连链路遮挡物的变化可能导致信道状态信息非线性变化,如何进行信道状态的准确预测是一个难点。此外,功率控制周期调整示意图如图5所示,其中 T_{pro} 为星地单向传播时延。如图5所示,可令功率控制周期大于两倍星地传播时延,从而有效规避上行功率控制震荡问题。

自适应调制编码(adaptive modulation and coding, AMC)是一种链路自适应技术,其原理为根据信道质量,动态调整链路传输的调制阶数与编

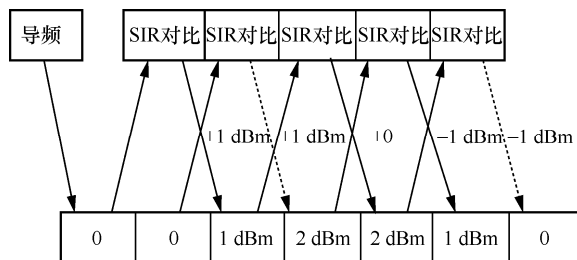


图4 功率控制震荡产生示意图

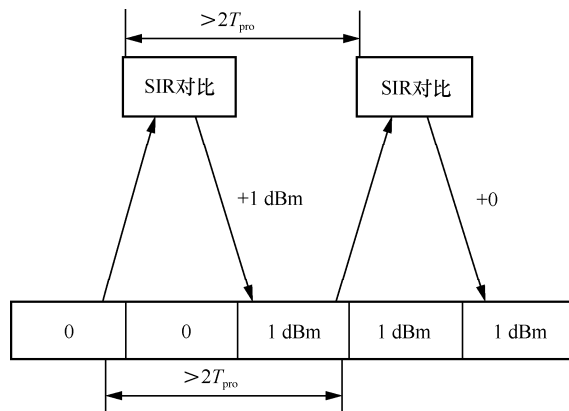


图5 功率控制周期调整示意图

码方式,以充分利用链路传输能力。传统5G网络的MCS根据测得的信道质量指示(channel quality indication, CQI)参数,基于查表进行调整。具体地,在下行AMC技术中,用户根据参考信号测得CQI并上报,基站据此调整MCS;在上行AMC技术中,基站根据上行参考信号测得CQI,随后通过控制信令通知用户调整MCS。在手机直连场景下,星地链路传播时延不可忽略,导致CQI反馈/控制信令下发严重滞后且信道波动更大,传统AMC技术难以直接适用。为此,与功率控制类似,引入信道预测十分必要,通过对信道状态进行预测以及时获得准确的CQI,从而保证MCS调整的准确性。

1.5 卫星波束规划和调度

本文提出卫星波束规划应区分两种波束服务方式。方式一为低轨卫星产生两类波束,称为控制波束和业务波束,分别负责控制信息和业务信息的传输,此时,业务波束调度依赖用户通过控制波束上报的传输需求和信道质量信息等。为实现用户需求及时被卫星获知,控制波束可采用宽波束周期性快



速扫描的方式，而业务波束可采用窄点波束以提供高数据速率，同时有利于规避波束间干扰，实现空间多色复用。在方式二中，不区分控制和业务波束，此时波束宽度被设置成核心问题。具体地，当波束宽度较窄时，单波束覆盖范围变小，可能导致用户接入时延变大；而当波束宽度较宽时，不仅可能导致波束增益不足、用户峰值速率下降，同时还可能带来更大的波束间干扰。与方式二相比，方式一通过更加复杂的波束管理在保证覆盖性能的同时换取了业务波束调度的灵活性，可充分应对卫星广覆盖区域内的非均匀用户分布特点和差异化数据传输需求。此外，根据卫星天线能力，卫星波束还分为移动波束和固定波束。在移动波束下，波束小区相对地面快速运动，导致用户在小区间频繁切换，与此同时，卫星波束间的重叠覆盖程度不断变化，使得星间/波束间干扰管理更加复杂。在固定波束下，卫星通过相控阵天线实现波束对地面固定小区的凝视服务，此时可显著降低用户在小区间的切换频率，同时有望简化小区间频谱共享机制设计。

在低轨卫星波束调度算法设计方面，文献[9]针对单个低轨卫星多波束服务场景（考虑移动波束小区且波束间全频率复用），提出了基于多决策体随机学习的波束调度算法，其中，虚拟决策体个数与卫星波束个数相同，每个虚拟决策体负责

确定对应波束是否激活，在给定波束激活状态下进一步采用基于联盟博弈的贪婪算法和凸优化算法，联合优化用户的波束接入以及波束内用户间传输时间分配。仿真结果表明，在文献[9]考虑的仿真场景下，所提算法能够近似满足 96% 用户的速率需求，同时激活的波束个数不到一半，显著降低了星上功耗。面向多低轨卫星多波束传输场景，文献[10]将多低轨卫星波束联合跳变图案设计问题解耦为低轨卫星与地面小区的关联关系优化和小区服务时隙分配优化，前者主要考虑了星间负载均衡和对高轨卫星通信的干扰限制，后者则在给定低轨卫星和地面小区关联关系的基础上，通过迭代优化改善小区间干扰以及小区业务满意度。然而，前述研究均未考虑低轨卫星高速运动下的网络拓扑和干扰状态时变特点。此外，波束调度还需要解决各小区业务动态到达下如何保证系统队列稳定以及如何降低星间切换频率等问题。

2 手机直连低轨卫星商业项目进展

本节将详细介绍手机直连低轨卫星商业项目的进展情况，手机直连低轨卫星商业项目进展情况汇总见表 1。

2.1 AST SpaceMobile 手机直连卫星项目

AST SpaceMobile 手机直连卫星项目由位于美

表 1 手机直连低轨卫星商业项目进展情况汇总

项目名称	Starlink V2	AST SpaceMobile	Lynk Global	Omnispace
上行频段	1 910~1 915 MHz	830~835 MHz 845~849 MHz	1 GHz 以下	2 GHz
下行频段	1 900~1 995 MHz	890~894 MHz	1 GHz 以下	2 GHz
在轨（实验）卫星数/颗	0	2	6	2
预计星座规模/颗	>2 000	243	>1 000	>100
星座类型	LEO	LEO	LEO	LEO+MEO
协议类型	地面移动通信协议增强	地面移动通信协议增强	地面移动通信协议增强	地面移动通信协议增强
预期速率	2~4 Mbit/s	>35 Mbit/s	—	—
应用状态	预备进行测试	完成大型相控阵天线波束控制测试	完成手机和卫星间的接入信令交互	—
技术/业务特性	短消息和语音通话	支持高速上网/透明转发架构	支持短消息业务/星上处理架构	—

国得克萨斯州的 AST SpaceMobile 公司发起,旨在构建一个包含 16 个轨道面、243 颗卫星的低轨通信星座,实现普通智能手机不做任何功能修改即可通过卫星获得 4G 和 5G 服务。相比地面移动通信,由于低轨卫星的高速运动以及星地间的长传播时延,卫星和用户间存在较大的时频偏移,给时频同步带来较大挑战。根据文献[11],AST SpaceMobile 采用了缩小地面固定波束小区半径并结合卫星侧利用小区中心点位置进行频偏预补偿的技术方案。为评估该方案的可行性,采用文献[11]给出的地面小区直径为 48 km 的假设,同时假设星地通信最小仰角为 30 度且当仰角为 90 度时用户恰好位于星下点。令卫星轨道高度为 500 km (当前 AST SpaceMobile 试验卫星的轨道高度) 且卫星和用户间采用 881.5 MHz 的中心频点通信 (881.5 MHz 为 AST SpaceMobile 试验的目标频率之一)。卫星根据小区中心点位置进行频偏预补偿,频偏预补偿的残留多普勒频偏如图 6 所示,其中,最大频偏略高于 1.5 kHz。一般认为,当产生的频移小于子载波间隔的 5% 时,对下行同步没有影响,因此按照测算中的数据,子载波间隔可取 30 kHz 及以上。另外,当卫星与小区中心点的仰角在一定范围内时,小区等效半径与地面通信网络小区半径相当。上述结果意味着,在选择合适的子载波间隔并限制最小服务仰角后,普通手机不做任何功能修改即可完成初始下行同步和上行随机接入。

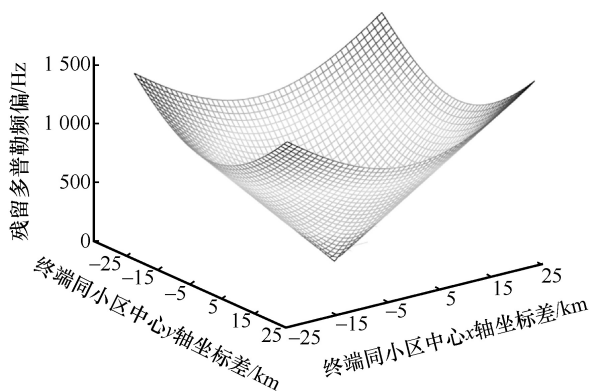


图 6 频偏补偿后的残留多普勒频偏

此外,为满足窄波束传输以及波束指向灵活调整需求,AST SpaceMobile 手机直连项目的一大特色是为卫星搭载了目前尺寸最大的商用星载相控阵天线,其已在 BlueWalker 3 试验星上在轨展开,面积达 64 m²。根据 AST SpaceMobile 公司官网消息,AST SpaceMobile 于 2023 年第一季度进行手机直连性能测试。根据文献[12],AST SpaceMobile 项目潜在测试架构如图 7 所示,为基于卫星透明转发的 NTN 架构。

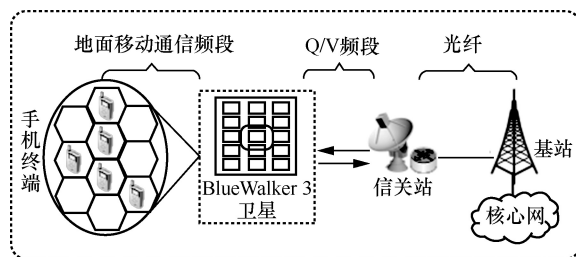


图 7 AST SpaceMobile 项目潜在测试架构

2.2 Lyrnk Global 手机直连卫星项目

Lyrnk Global 手机直连卫星项目由美国 Lyrnk Global 公司发起,旨在利用上千颗低轨微小卫星为标准移动手持终端提供全球通信服务。为实现手持终端不进行任何修改与卫星正常通信,Lyrnk Global 公司在文献[13]中提出在卫星侧对接收到的手机发送的物理随机接入信道 (physical random access channel, PRACH) 和 PUSCH 上行信号进行处理,完成卫星和手机间的传播时延和多普勒频偏估计,并在下行发送时基于估计结果对信号进行调整。此外,针对多地面用户通信场景,Lyrnk Global 公司在文献[14]中给出了星载收发机的多址通信方案,其中,收发机主要由测距模块、定时模块、资源调度模块、多普勒频偏补偿模块等组成,根据卫星和每个用户间的距离针对性调整接收信号的检测定时。考虑卫星和地面基站采用相似通信体制后,卫星信号对地面基站用户的潜在干扰以及地面基站用户对卫星信号接收的干扰,Lyrnk Global 公司在文献[15]中提出了基于数据驱动的卫星



小区-地面基站小区间频谱划分方法,在文献[16]中提出了基于干扰探测的卫星侧对地面基站用户上行干扰的缓解方法。据报道, Lyrnk Global 已先后发射 5 颗试验卫星,且已完成上千部智能手机接入测试。在整体架构上,文献[17]表明该项目可能采用了星上处理技术以在太空中部署完整的长期演进(long term evolution, LTE)网络,地面用户接入卫星网络时相当于从地面网络漫游至卫星网络。

2.3 其他手机直连卫星项目

Omnispace 手机直连卫星项目由美国 Omnispace 公司发起,旨在利用非地球同步卫星提供符合 3GPP 标准的全球 5G 网络服务,工作频段为 3GPP 定义的 n256。在技术可行性方面, Omnispace 于 2021 年在试验室环境下为美国海军演示了商用 5G 终端可通过卫星获取语音和数据服务。目前该项目已发射 Omnispace Spark-1 和 Omnispace Spark-2 两颗试验星,然而尚未看到公开的技术专利及相关性能测试结果。此外,Starlink 和 T-Mobile 已宣布开展合作,利用第二代 Starlink 低轨卫星为现有手机提供空中服务,单小区速率为 2~4 Mbit/s,满足短信和语音通话需求。根据官方公布的信息,第二代 Starlink 卫星的通信载荷将额外增加一个面积达 25 m² 的相控阵天线,用于实现与地面手机的直接通信。

3 手机直连卫星未来发展展望

虽然各类手机直连低轨卫星项目和有关测试已取得一定进展,但目前各方仍主要聚焦于链路层面的“连得上”。面向未来,还需要进一步解决星地高效频谱共享和移动性管理这两大技术问题;此外,为了解决上下行业务流量非对称带来的卫星频谱资源浪费,基于时分双工的通信制式也将是重要研究方向之一;最后,亟须突破手机直连下的低轨通信卫星组网信息理论,为实际系统设计提供有益指导。

3.1 星地高效频谱共享

在手机直连场景下,由于卫星通信采用与地面移动通信网络相同/相似的技术体制,星地通信和地-地通信间可能存在复杂干扰,包括卫星对地面基站用户的干扰、地面基站对卫星接收的干扰等。与此同时,由于手机天线等硬件能力限制,手机直连卫星目前主要聚焦于低频,频谱资源稀缺,容易和地面移动通信网络频谱规划冲突。因此,手机直连下的星地频谱共享研究十分迫切。在传统地面网络中,频谱共享方案包括多色空间复用、软频率复用、基于时域干扰协调的方案和基于功率控制的方案。由于地面网络小区位置固定,上述方案配置参数较易确定。然而,在引入手机直连低轨卫星后,星地间频谱共享面临如下 4 个方面的挑战。

- 由于低轨卫星单波束覆盖范围可达几十至上百千米,覆盖范围内可能包含数十个地面基站小区,对地干扰影响广泛。
- 低轨卫星高速运动导致星地间干扰程度复杂多变。具体地,当卫星采用相对自身位置固定的波束小区配置(即移动波束)时,随着卫星移动,波束小区与地面基站小区的空间相对位置不断变化;而当卫星采用凝视波束模式服务地面固定小区时,波束指向在卫星移动过程中不断调整,在上述两种情况下,使用相同频谱的地面基站小区用户所受干扰均动态变化。
- 由于地面基站和低轨卫星间缺乏类似地面基站间的 Xn 接口,地面基站和卫星间的干扰难以直接进行细粒度协调。
- 手机天线定向传输能力差,可能存在低轨卫星和地面基站用户间的干扰。

为实现星地高频谱资源利用率,本文提出针对星地均处于下行传输时的频谱共享方案。假设低轨卫星可同时产生低功率宽波束和高功率窄波束,前者用于发送下行控制信息,后者用于传

输下行高速率业务,而对于每个地面基站小区,划分小区中心和小区边缘。由于基站小区中心用户接收信号强度较大,在卫星宽波束功率得到适当控制的情况下,地面基站小区中心用户和宽波束可共享频谱。对于地面基站小区边缘用户,由于接收信号强度较弱,分配与卫星宽波束正交的频谱资源。与宽波束覆盖区域广泛相反,窄波束空间指向性更强、具有更加灵活多变的跳变特性,可在不同时间照亮不同方位,此时,若窄波束和地面基站小区仍采用静态频谱共享方式,会大大牺牲频谱利用率。为此,本文提出地面基站可通过增加专门的信号接收模块从卫星宽波束控制信息中获取未来一段时间内的窄波束跳变信息(包括波束发射功率、相对卫星的波束中心朝向、波束工作频点等),随后结合卫星星历、链路预算模型,计算未来各时刻卫星窄波束对小区的干扰程度,从而确定是否使用和卫星波束相同的频谱资源。

3.2 手机直连下的移动性管理

移动性管理包括链路切换管理、用户位置管理、移动IP管理等。在链路切换规则方面,由于低轨卫星通信场景下的信号强度测量难以准确反映手机终端相对卫星/波束小区的位置,地面网络中基于信号强度的切换触发和判决准则难以直接应用。为此,可采用基于多属性信息的链路切换判决方法,综合考虑卫星对手机的剩余覆盖时间、手机应用服务质量(quality of service, QoS)需求以及卫星空口负载等。针对手机直连网络架构中存在的用户链路和馈电链路频繁切换问题,笔者前期提出了基于多属性信息的链路切换判决方法,核心思想为将用户链路和馈电链路剩余覆盖时间进行联合,构建用户到信关站的端到端链路剩余存续时间指标,同时考虑卫星空口剩余资源、用户-卫星仰角等,利用熵权法对各类指标进行合并,最终得到用户-信关站端到端链路切换判决的综合指标。仿真结果表明,采用基于多属性信息

的切换判决可降低切换信令开销约29%^[18]。在切换流程方面,随着手机硬件能力的提升,预期未来可具备两个或以上收发射频链,从而能够同时与多颗卫星通信,实现基于“先建后断”的近似无缝切换。具体地,在手机向某卫星小区发起随机接入流程的同时,依然可以继续接收来自当前接入卫星的下行业务数据,有望实现下行数据传输零中断。在用户位置管理方面,位置区划分和寻呼策略会影响网络运行效率和信令开销,其中,信令开销进一步包括用户位置更新开销和网络对用户的寻呼开销。由于二者均与位置区划分方式有关,因此需提出合适的数学模型建模位置区划分与开销间的定量关系,实现开销最小化。此外,模型应综合考虑用户移动性特征、业务数据到达特征以及位置区范围设置较大时导致的球面位置区形变等。

3.3 基于时分双工的手机直连卫星通信

与主要支持电视广播业务、短消息业务的传统卫星通信系统相比,手机应用的丰富性使得网络流量具有高度的上下行非对称特点,频分双工通信易导致频谱资源浪费。同时,由于上下行链路预算相对有限,为实现数据的高速传输,预计未来手机直连将使用更高的传输带宽,若继续采用频分双工方式,上下行共口径天线的设计将成为难点问题。为此,可考虑引入基于时分双工的通信体制,通过帧结构中的上下行时隙灵活配比,实现有限频谱资源与上下行业务需求的有效匹配。此外,上下行传输可位于同一频率资源块上,有利于通过双工器或开关电路简化天线设计,降低硬件成本。最后,不需要成对频谱资源,这降低了频谱规划难度。

与地面时分双工移动通信系统类似,当帧结构中的上下行保护时间间隔设置过短时,基于时分双工的手机直连卫星通信同样面临上下行时隙间的干扰问题。终端自干扰示意图如图8所示,其中 T_{prog} 为直连链路传播时延,DCI为卫



星发送的调度控制信息，因传播时延不可忽略，为保证上行数据在指定时刻到达卫星，手机终端需要在上行调度指示的基础上提前 2 倍传播时延发送数据，而此时，终端可能正处于下行数据接收状态，从而导致严重的自干扰。另外，考虑手机终端天线方向性差，当同一波束内终端传输调度不当或波束间时隙配比差异较大时，易产生终端间上下行时隙干扰，终端间上下行时隙干扰示意图如图 9 所示。为此，卫星侧在确定用户传输的时频资源时不仅需要考虑到信道质量，还需要考虑历史调度信息、终端位置信息等。具体地，在调度同一终端时，合理安排上下行传输的时隙位置，避免自干扰；而在调度不同终端时，需要根据终端-卫星间的传播时延、业务请求量、业务时延需求等确定资源块分配方案，降低终端间上下行时隙干扰。

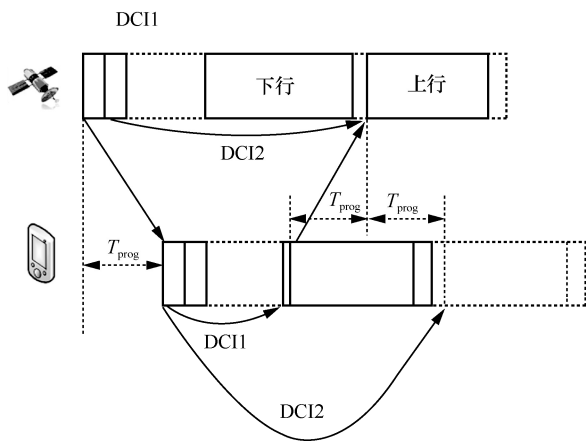


图 8 终端自干扰示意图

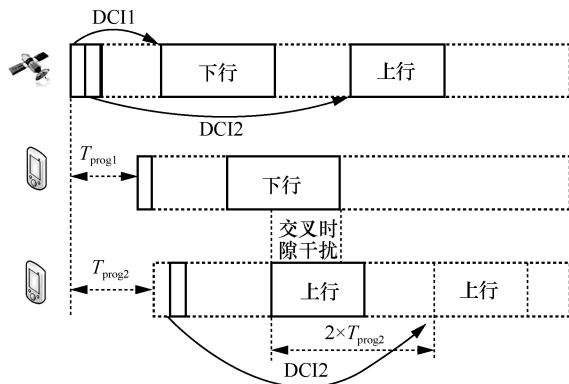


图 9 终端间上下行时隙干扰示意图

3.4 手机直连下的低轨卫星组网信息理论

围绕地面移动通信网络（如蜂窝网络、异构蜂窝网络等），学术界利用随机几何等工具，阐明了基站部署密度、发射功率、不同接入策略等对用户传输成功率和遍历速率的影响。相比可视为二维平面分布的地面网络，手机直连低轨卫星场景将具有更加显著的立体空间几何特征，例如，低轨卫星沿特定轨道运行、星载天线的发射增益与卫星和用户间的离轴角密切相关等。在此情况下，亟须构建易于分析且能够反映星地空间几何特性的组网信息理论模型，指导实际系统参数和接入策略设计。

目前已有部分文献分析了低轨卫星组网下的用户通信性能。与传统卫星通信仿真采用的基于确定性位置的卫星组网模型不同，文献[19]采用均匀二项点过程对低轨卫星分布进行建模，分析了一般低轨卫星通信网络的下行覆盖概率和平均数据速率，此外，还引入了有效卫星数以反映卫星在纬度间的非均匀分布特点。为了说明利用随机几何进行低轨星座建模的准确性，文献[20]基于沃瑟斯坦距离度量，定量比较了齐次二项点过程与基于轨道的点过程以及基于斐波那契网格的点集间的相似度，结果表明，当卫星轨道高度越低、星座规模越大时，齐次二项点过程可以更好地代替后两种星座建模方式。

然而，目前对手机直连下低轨卫星组网的性能分析仍有待进一步研究，具体挑战包括以下几点。

- 如何构建易于分析且能够反映实际空间几何特点的理论模型，其中需要考虑星载天线空间定向性、低轨卫星多波束等特点。
- 在低轨星座发展初期，卫星部署密度不高，假设卫星在球面上服从均匀分布易带来较大分析误差，因此需要考虑更加精细的星座建模方式，反映卫星轨道倾角等对系统性能的影响。
- 手机在低轨卫星间、不同卫星波束间的接

入策略同样会影响上下行传输性能, 如何分析不同接入策略对性能的影响, 从而为接入策略设计提供有益指导是亟须解决的问题。

4 结束语

本文首先介绍了面向手机直连的低轨卫星通信关键技术, 包括时频同步、随机接入、HARQ、功率控制、MCS 自适应、卫星波束规划和调度; 随后调研总结了相关商业项目的进展情况, 并参考有关企业公开的发明专利提炼了关键技术特征等; 最后, 针对未来手机直连卫星后潜在的星地频谱共享、移动性管理、组网信息理论以及基于时分双工的通信体制, 进行了深入探讨, 给出了启发性思路。

参考文献:

- [1] 孙智立, 李天儒. 大规模低轨星座卫星通信网发展展望[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 48-51.
SUN Z L, LI T R. Development prospect of mega low earth orbit constellation satellite communication networks[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(5): 48-51.
- [2] SUN Y H, PENG M G, ZHANG S J, et al. Integrated satellite-terrestrial networks: architectures, key techniques, and experimental progress[J]. IEEE Network, 2022, 36(6): 191-198.
- [3] 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.
- [4] 吴晓文, 焦侦丰, 凌翔, 等. 面向 6G 的卫星通信网络架构展望[J]. 电信科学, 2021, 37(7): 1-14.
WU X W, JIAO Z F, LING X, et al. Outlook on satellite communications network architecture for 6G[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 1-14.
- [5] 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.
- [6] WANG D, MEI Z Q, ZHANG H Q, et al. A novel PSS timing synchronization algorithm for cell search in 5G NR system[J]. IEEE Access, 2021, 9: 5870-5880.
- [7] 孙倩楠, 张治中. 5G 系统小区搜索 PSS 定时同步方法[J]. 电讯技术, 2020, 60(6): 678-683.
SUN Q N, ZHANG Z Z. Cell search PSS timing synchronization method in 5G system[J]. Telecommunication Engineering, 2020, 60(6): 678-683.
- [8] 朱剑锋, 孙耀华, 彭木根. 低轨卫星通信系统的前导序列设计[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 75-81.
ZHU J F, SUN Y H, PENG M G. Design of preamble sequence for LEO satellite communication system[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 75-81.
- [9] SUN Y H, PENG M G. Edge intelligence assisted resource management for satellite communication[J]. China Communications, 2022, 19(8): 31-40.
- [10] LIN Z Y, NI Z Y, KUANG L L, et al. NGSO satellites beam hopping strategy based on load balancing and interference avoidance for coexistence with GSO systems[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(1): 278-282.
- [11] YAO H W, AVELLAN A, JAYASIMHA S, et al. Satellite MIMO system: US11515935[P]. 2022-11-29.
- [12] TOMASSO K C. Wide area network access management computer: US8832425[P]. 2014-09-09.
- [13] SPEIDEL T R, BUVARP A, LIU J. Receiver-based computation of transmitter parameters and state for communications beyond design ranges of a cellular network protocol: US11546726[P]. 2023-01-03.
- [14] SPEIDEL T R, GERBER A J. Method and apparatus for handling communications between spacecraft operating in an orbital environment and terrestrial telecommunications devices that use terrestrial base station communications: US10985834[P]. 2021-04-20.
- [15] SPEIDEL T R, MILLER C E. Method for interference minimization and optimization of orbital mobile cellular services: US20220368411[P]. 2022-11-17.
- [16] 环球星链公司. 对来自地面-地面通信的干扰的轨道基站滤波: CN112236953A[P]. 2021-01-15.
Lynk Global. Orbital base station filtering of interference from terrestrial-terrestrial communications: CN112236953A[P]. 2021-01-15.
- [17] 环球星链公司. 蜂窝核心网络和无线电接入网基础设施以及

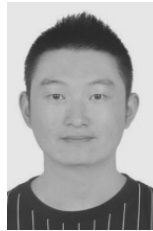


空间管理: CN113056877A[P]. 2021-06-29.

Lynk Global. Cellular core network and radio access network infrastructure and management in space: CN113056877A[P]. 2021-06-29.

- [18] 王则予, 张梦菲, 孙耀华, 等. 星上透明转发非地面网络中的切换机制[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(6): 101-108.
WANG Z Y, ZHANG M F, SUN Y H, et al. Handover mechanism in on-board transparent forwarding non-terrestrial network[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(6): 101-108.
- [19] OKATI N, RIIHONEN T, KORPI D, et al. Downlink coverage and rate analysis of low earth orbit satellite constellations using stochastic geometry[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(8): 5120-5134.
- [20] WANG R B, KISHK M A, ALOUINI M S. Evaluating the accuracy of stochastic geometry based models for LEO satellite networks analysis[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(10): 2440-2444.

[作者简介]



孙耀华 (1992-), 男, 博士, 北京邮电大学副教授, 主要研究方向为低轨卫星通信和无线接入网络智能化。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院院长、教授、博士生导师, 网络与交换技术国家重点实验室副主任, IEEE Fellow, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士。主要研究方向为智能无线网络、空天地海一体化网络、通信感知计算融合等。担任《电信科学》副主编, *IEEE IoT* 期刊指导委员会委员, *IEEE Network*、*IEEE TVT*、*IEEE TNSE* 等期刊的编委等。