

DOI:10.20079/j.issn.1001-893x.230328002

机载低轨卫星通信发展及关键技术综述*

陈书恒¹, 莫嘉倩¹, 莫小欣²

(1. 中国人民解放军 92728 部队, 上海 200436; 2. 广东工业大学 建筑与城市规划学院, 广州 510006)

摘要: 卫星通信是保障机载平台远程飞行的主要通信手段。低轨卫星通信具有传输损耗小、传输时延短、卫星发射灵活、能全球覆盖等优点, 已成为机载卫星通信领域的研究热点。梳理了国内外机载低轨卫星通信技术发展历程, 开展了机载低轨卫星通信应用分析, 重点从相控阵天线、信号同步、编码调制、接入与切换等方面阐述了机载低轨卫星通信需要解决的关键技术, 探讨了机载低轨卫星通信发展趋势, 可为机载低轨卫星通信系统建设应用提供借鉴。

关键词: 机载低轨卫星通信; 相控阵天线; 信号同步; 编码调制; 接入与切换

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



微信扫描二维码
听独家语音释文
与作者在线交流
享本刊专属服务

中图分类号: TN927 文献标志码: A 文章编号: 1001-893X(2024)01-0149-09

Development and Key Technologies of Airborne LEO Satellite Communication: a Review

CHEN Shuheng¹, MO Jiaqian¹, MO Xiaoxin²

(1. Unit 92728 of PLA, Shanghai 200436, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Satellite communication is the main communication method to guarantee long-range flight of airborne platform. Low Earth orbit (LEO) satellite communication with characteristics of low transmission loss, short transmission delay, flexible launch and global coverage, is the current research hotspot in the field of airborne satellite communication. The authors introduce the development history and research status of airborne LEO satellite communication at home and abroad, carry out its application analysis, review its key technologies including phased array antenna, signal synchronization, coded modulation, access and handover, and analyze its development trends. The research results can provide reference for construction and application of airborne LEO satellite communication.

Key words: airborne LEO satellite communication; phased array antenna; signal synchronization; coded modulation; access and handover

0 引言

近年来,随着航空产业的快速发展,机载平台得到了广泛应用。机载平台数量不断增加,机载平台远程通信手段的需求与日俱增。卫星通信具有覆盖范围广、通信距离远、可靠性高、组网灵活、不受地形限制等一系列突出优点^[1],是机载平台主要的远程

通信手段。现有机载卫星通信大多基于地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星通信系统实现,但由于 GEO 卫星通信系统存在传输损耗大、传输时延长、研制成本高、部署周期长、无法及时引入先进技术等问题,体积、重量、功耗受限的机载卫星通信设备已无法满足日益增长的低时延、高速率

* 收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-10-18
通信作者: 莫嘉倩 Email: njumojiaqian@163.com

业务传输需求。

与 GEO 卫星通信系统相比,低轨 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星通信系统在相对低的轨道上绕地球运行,具有传输损耗小、传输时延短、卫星发射灵活等优点,并可通过星座组网实现包含南北极的全球覆盖。同时,随着集成电路技术、通信技术等方面的快速发展和成熟,LEO 卫星通信系统通过采用高性能星上处理载荷、高级调制编码、先进多波束天线、高效频率复用等先进技术,极大提升了系统传输性能。因此,机载低轨卫星通信系统在体积、重量、功耗受限条件下更易实现低时延、高速率业务传输,是进一步满足未来机载卫星通信需求的重要手段^[2-3]。并且,随着星间链路和星间路由技术的广泛应用,低轨卫星通信系统可支持机载平台间的直接组网应用,减少了对地面信关站的依赖,进一步降低了卫星通信时延。

虽然 LEO 卫星通信系统可为机载卫星通信带来诸多好处,但同时也带来了不少挑战。LEO 卫星通信系统由大量高速运行的卫星组成,机载平台接收到的低轨卫星信号遭受了更为严重的多普勒效应,将给信号接收带来极大的挑战。同时,LEO 卫星波束相对地面高速移动,高移动性的机载平台面临频繁的接入和切换,给连续通信带来了挑战。为了应对上述挑战,机载低轨卫星通信应结合 LEO 卫星通信系统特点从机载卫星通天线、信号处理、跨星跨波束接入与切换等方面开展针对性的设计。

本文首先概述了国内外低轨卫星星座和机载卫星通信发展现状,在此基础上进行了机载低轨卫星通信应用分析,给出了机载低轨卫星通信的关键技术,探讨了机载低轨卫星通信的发展趋势,以期机载低轨卫星通信系统建设应用提供借鉴。

1 LEO 卫星星座发展现状与机载卫星通信发展现状

1.1 LEO 卫星星座发展现状

自 20 世纪 90 年代起,以“铱”星、全球星、轨道通信为代表的三大系统开启了低轨卫星通信星座发展热潮,但试图与地面通信网络竞争的错误定位使三大系统并未广泛应用。2010 年前后,三大系统都开始逐渐更新换代。2014 年, O3b 系统的巨大成功使得大型 LEO 卫星星座的发展达到高潮^[4]。这些新兴系统采用了先进的数字通信有效载荷、高阶调

制方案、多波束天线和复杂的频率复用方案,使得系统性能获得了极大提升。在可预见的未来,大型 LEO 卫星星座将带来更加廉价、方便、快捷、稳定、安全的宽带通信服务。国内外的诸多企业和机构纷纷推出了大型 LEO 卫星星座建设计划,以抢占有限的卫星轨道及频率资源。

1.1.1 国外发展现状

随着商业 LEO 卫星星座井喷式发展,以电信卫星公司 (Telesat)、一网公司 (One Web)、太空探索公司 (SpaceX) 为代表的国外商业航天企业陆续公布了各自的 LEO 卫星星座计划,并快速推进星座部署进程。

Telesat 的 Ka 频段星座由不少于 117 颗卫星的星座组成,卫星分布在两组轨道面上,星座模式如图 1 所示。就功能而言,第一组极轨道卫星的主要功能是提供全球覆盖,第二组倾斜轨道则重点加强对全球大部分人口集中区域的覆盖。Telesat 星座的每颗卫星将作为 IP 网络的节点,其通信载荷具有星上处理模块,从而解耦上下行链路。相控阵天线能够在上下行链路方向上分别形成至少 16 个波束,每个波束的功率、带宽、大小和视轴可动态分配,最大限度地提高性能并减少对 GEO 和 N GEO 卫星的干扰。Telesat 的星座在 Ka 频段的低段 (17.8 ~ 20.2 GHz) 中使用 1.8 GHz 的带宽用于下行链路,在 Ka 频段的高段 (27.5 ~ 30.0 GHz) 中使用 2.1 GHz 的带宽用于上行链路,用户的最小仰角为 20°。Telesat 星座的相邻卫星间可以通过激光链路进行通信。由于使用了星间链路,即使用户和地面站不在同一卫星的覆盖范围内,用户也能够在这个世界上任何地方互联互通。



图 1 Telesat 系统星座模式
Fig. 1 Constellation pattern of Telesat system

OneWeb 的 Ku+Ka 频段星座包括在 18 个圆形

轨道平面上的 720 颗卫星,轨道高度 1 200 km,轨道倾角 87°,星座模式如图 2 所示。OneWeb 星座的每颗卫星都包括 16 个相同的、不可调整的、高椭圆形的用户波束,这些波束保证了任何用户都在至少一个仰角大于 55°的卫星的视线范围内。OneWeb 系统用户链路分别使用 Ku 频段的 10.7~12.7 GHz 和 12.75~14.5 GHz 频段用于下行链路和上行链路,馈电链路分别使用 Ka 频段的 17.8~20.2 GHz 和 27.5~30.0 GHz 频段用于下行链路和上行链路。用户前向链路上的信道将具有 250 MHz 的带宽,而用户返向链路上的信道将具有 125 MHz 的带宽。由于卫星不使用卫星间链路,只能在用户和地面站同时位于卫星视线范围内的区域提供服务。



图 2 OneWeb 系统星座模式
Fig. 2 Constellation pattern of OneWeb system

SpaceX 的“星链”星座的空间段^[5-6]计划由 4 409 颗分布在 550~1 300 km 的 LEO 卫星和 7 518 颗分布在 340 km 左右的极低地球轨道 (Very Low Earth Orbit, VLEO) 卫星构成,组网卫星总数达到 11 927 颗。SpaceX 星座的每颗卫星都携带一个包含相控阵天线的高级数字有效载荷,这将允许每个波束单独转向和成形。用户终端的最小仰角是 40°,链路时延为 15~20 ms,每个卫星的总吞吐量为 17~23 Gb/s,星座总容量将达到 200~276 Tb/s,单个用户链路的传输速率最高达 1 Gb/s。此外,卫星间还具有激光星间链路,以确保持续通信,并减轻干扰的影响。SpaceX 系统使用 Ku 频段作为用户链路,Ka 频段作为馈电链路。具体而言,10.7~12.7 GHz 和 14.0~14.5 GHz 频段将分别用于用户下行链路和用户上行链路,而 17.8~19.3 GHz 和 27.5~30.0 GHz 频段将用于馈电下行链路和馈电上行链路。

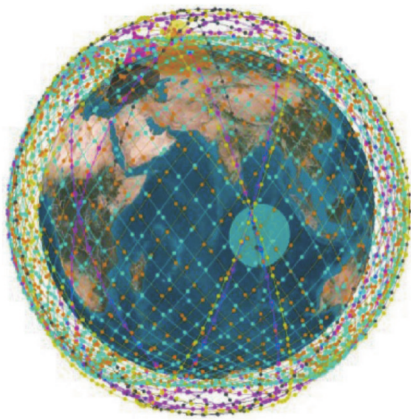


图 3 SpaceX 系统星座模式
Fig. 3 Constellation pattern of SpaceX system

1.1.2 国内发展现状

LEO 卫星通信作为“新基建”的重要组成部分,在国内正处于高速研发阶段^[9]。2021 年 4 月,中国卫星网络集团有限公司(简称中国星网集团)成立,主要承担国家卫星互联网系统建设工作。中国航天科工集团(简称航天科工)和中国航天科技集团(简称航天科技)也分别提出了建设由几百颗卫星组成的“虹云”和“鸿雁”星座计划,并开展了建设步伐。中国电子科技集团有限公司(简称中国电科)牵头实施了天地一体化信息网络项目,构建了我国首个基于 Ka 频段低轨星间链路的双星组网小卫星系统。在民营企业中,银河航天作为先行者发射了两批试验星,自主研发出我国首颗通信能力达到 24 Gb/s 的低轨宽带通信卫星,大大加快了国内低轨移动通信的进程。

“虹云”工程由航天科工主导,在中国首次提出建立基于小卫星的低轨宽带互联网接入系统。工程计划在距地 1 000 km 的近地轨道上部署 156 颗小卫星,具备通信、导航和遥感一体化、全球覆盖的特点。按照规划,整个“虹云”工程被分解为“1+4+156”三步:第一步,发射第一颗技术验证星,实现单星关键技术验证;第二步,发射 4 颗业务试验星,组建一个小星座,让用户开展初步业务体验;第三步,实现全部 156 颗卫星组网运行,完成星载宽带全球移动互联网构建。“虹云”工程首星已于 2018 年 12 月 22 日成功发射。

“鸿雁”星座是航天科技主导建设的低轨卫星互联网项目。系统将由 300 多颗 LEO 卫星和全球数据业务处理中心组成,具有大带宽、低延时、低成本、快速部署和全球随遇接入、无缝覆盖等优点,采用 L 和 Ka 频段双频设计,支持高达近百兆的传输

速率,是我国首个国家级、投资规模最大、具有里程碑意义的商业航天项目。“鸿雁”星座分为两个阶段进行建设:一期工程计划发射 60 余颗距地 1 100 km 左右的 LEO 卫星,完成全球覆盖,但一期工程带宽有限,优先支持全球电话业务,并支持重点地区的移动宽带互联网接入;二期工程计划再发射 300 余颗卫星,大幅扩展网络容量,完成全球移动宽带互联网业务支持。“鸿雁”星座首星已于 2018 年 12 月 29 日成功发射。

天地一体化信息网络项目由科技部牵头,方案论证与实施由中国电科牵头。天地一体化信息网络由天基骨干网、天基接入网、地基节点网组成,并与地面互联网和移动通信网互联互通,建成“全球覆盖、随遇接入、按需服务、安全可信”的天地一体化信息网络体系。天地一体化信息网络项目低轨接入网规划 60 颗综合星和 60 颗宽带星,采用星间链路和星间路由技术,实现极少数地面站支持下的全球无缝窄带和宽带机动服务。项目建成后可具备全球时空连续通信、高可靠安全通信、区域大容量通信、高机动全程信息传输等能力。

为了进一步对我国低轨卫星互联网产业进行顶层设计和资源整合,中国星网集团通过国家卫星互联网系统的建设加速我国低轨卫星通信产业的快速落地,实现真正的全球互联。

1.2 机载卫星通信发展现状

基于 GEO 卫星的机载卫星通信在军民领域得到了飞速发展,其主要工作于 L、S、Ku、Ka 等频段,提供窄带、宽带和抗干扰业务传输。在民用领域,随着全球各类卫星通信系统的开通运营,机载卫星通信在空中交通管理、客舱宽带服务、灾害防治、应急救援、医疗救护、遥感测绘等领域得到了越来越多的应用。为了解决目前存在的航空信息“孤岛”问题,民航飞机利用低频段机载卫星通信实现了空中交通管理服务,利用高频段机载卫星通信实现了高速率客舱宽带服务。近年来,随着中星-16、亚太-6D 等高通量卫星通信网投入运营,我国已具备了利用自主研制的高通量卫星提供高速率客舱宽带服务的能力。在军用领域,机载卫星通信可为机载平台提供信息传输手段,能为实时获取战场信息、精准打击目标、提高战场生存能力、构建未来战场作战优势提供新质手段,推动作战模式变革。为了支撑远离本土的军事行动,美军较早在作战飞机上实现了卫星通信,其中卫星通信已经成为美军无人机的主要通信手段。

随着 LEO 卫星通信系统的发展,机载低轨卫星通信在军民领域都将具有良好的发展前景^[7-8]。相较于基于 GEO 的民航机载卫星通信解决方案,机载低轨卫星通信能够降低传输时延,提升用户体验速率与覆盖性能,是民航机载卫星通信未来的主要发展方向。同时,为了进一步满足信息化作战需求,军用通信卫星体系也越来越重视军用低轨 LEO 星座的建设,并加速推进商业 LEO 卫星资源在军事领域的融合和应用。在俄乌冲突中,SpaceX 的“星链”低轨卫星通信系统出尽风头,乌军使用的“星链”终端超过 2 万台,使得其作战指令可以直达一线战士,实现“滴滴打车”式作战,这对军事作战领域带来的影响是深远而持久的。

2 机载低轨卫星通信应用分析

2.1 应用需求

低轨卫星星座的快速发展为机载平台提供了一种新的卫星通信手段,可更好地满足机载平台卫星通信应用需求。

1) 低时延、高速率业务传输需求

机载平台不同业务传输需求不同:无人机测控信息、民航飞机空管信息等对通信传输实时性要求较高;无人机载荷数据、民航飞机客舱业务数据等对通信传输速率要求较高。相比于 GEO 卫星,低轨卫星轨道低,单向传播时延在数十毫秒级(GEO 卫星单向传播时延约 270 ms),且低轨卫星依托于星上处理和星间链路能力可实现卫星间直接组网,消除了地面与空中的多跳问题,更易实现低时延互通传输。同时低轨卫星通信传播损耗小,且随着集成电路、通信等技术的发展低轨卫星星上处理能力不断加强,在相同的卫通终端能力下更易实现高速率卫通传输。

2) 设备小型化、低成本需求

低轨卫星通信传播损耗小,星上处理能力不断加强,在提升卫通终端性能的同时有利于机载平台卫通终端的小型化和低成本。

3) 灵活组网应用需求

随着星上处理和星间链路的逐渐成熟,低轨卫星星座依托少量地面信关站即可实现全球组网,机载平台可直接通过低轨卫星星座实现全球范围内灵活组网应用。

2.2 应用特点

与 GEO 卫星相比,LEO 卫星的特性主要表现在

卫星运行速度快、轨道高度低、单星覆盖范围小等。同时,对于机载低轨卫星通信而言,除了要考虑 LEO 卫星通信的信道特性外,还需考虑机载环境对卫星通信设备的安装要求。基于此,机载低轨卫星通信主要包含了以下几个应用特点:

1) 低信噪比

受限于空间、重量和功耗,LEO 通信卫星的功率资源和天线尺寸有限,从而导致卫星发射功率较低。同时受机载平台空间、重量和功耗限制,机载低轨卫星通信设备接收能力也有限。因此,机载低轨卫星通信链路通常需要工作在低信噪比环境下。

2) 强多普勒效应

通信链路的动态特性由链路两端的载体相对运动状态决定,低轨卫星通信星地两端较高的相对运动速度反映到信号层面则表现为强多普勒效应,即接收信号存在较大的载波频率偏移。并且,由于 LEO 卫星与通信目标载体之间的径向速度是时变的,随之产生的载波多普勒频偏也具有时变特性,即载波频偏具有一定的高阶变化率。

3) 频繁接入与切换

由于低轨卫星运行速度快,单星覆盖范围小,其对地面任何一处目标的可视时间都是有限的。单颗卫星与目标用户的可视时长通常仅有短短几分钟的时间,处于连接态的用户将频繁发生星间接入与切换。这就需要通信终端能够准确、稳定、可靠地控制天线波束,使天线快速对准目标卫星,及时完成星间接入与切换,确保通信不中断;另一方面,较短的可视时长也要求地面通信终端在较短的时间内与发射端完成同步,从而建立稳定的通信链路。

4) 终端轻量化、小型化

在机载卫通终端设计和研制过程中,受制于平台限制,应加强各要素的有效协调与平衡。模块化设计能有效控制终端体积和重量;低剖面天线设计及合理的安装位置可以减少飞机机体对天线的遮挡,提高信号接收范围和效率;天线罩共形设计可提高飞机操稳特性,降低飞行油耗,提高隐身性能等。

2.3 应用架构

机载低轨卫星通信系统由空间段、地面段、用户段组成,应用架构如图 4 所示。空间段主要由低轨卫星星座组成;地面段主要由运控中心、信关站及其连接的地面网络组成;用户段主要由各类机载平台卫通终端组成。

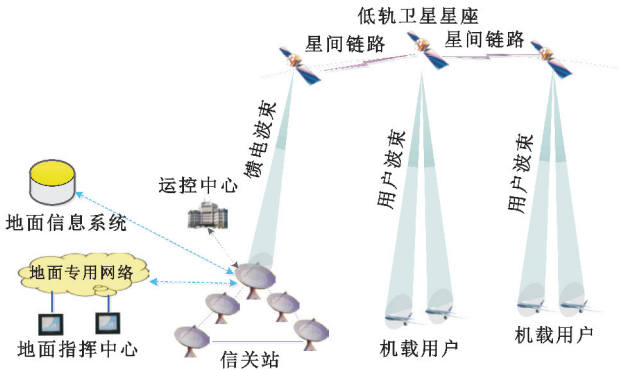


图 4 机载低轨卫星通信应用架构
Fig. 4 Application architecture of airborne LEO satellite communication

2.4 应用方式

结合机载平台应用特点,机载低轨卫星通信系统应用方式主要包括点对点应用和组网应用两种方式。

2.4.1 点对点应用

机载低轨卫星通信系统点对点应用方式可进一步分为信关站落地应用方式和机载平台间点对点应用方式。如图 5 所示,在信关站落地应用方式中,单个机载平台通过低轨卫星星座和地面信关站接入地面指挥中心,卫星通信前向链路为地面指挥中心→信关站→卫星→机载平台,卫星通信返向链路为机载平台→卫星→信关站→地面指挥中心;在机载平台间点对点应用方式中,不同机载平台间通过低轨卫星星座实现端到端直接通信,卫星通信链路为机载平台↔卫星↔机载平台。

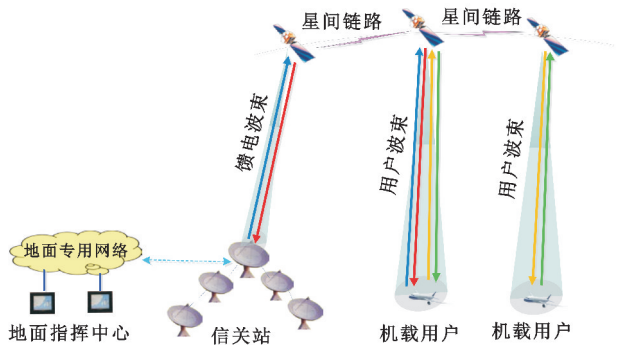


图 5 机载低轨卫星通信应用方式(点对点应用)
Fig. 5 Application mode of airborne LEO satellite communication system(point to point application)

2.4.2 组网应用

机载低轨卫星通信系统组网应用方式可进一步分为星状组网应用方式和网状组网应用方式。如图 6 所示,在网状组网应用方式中,机载骨干节点间通过低轨卫星星座实现全连通网状互连,卫星通信链

路为机载骨干节点间↔卫星↔机载骨干节点间;在星状组网应用方式中,机载骨干节点与机群间通过低轨卫星星座实现星状网互连,卫星通信链路为机载骨干节点↔卫星↔机群。

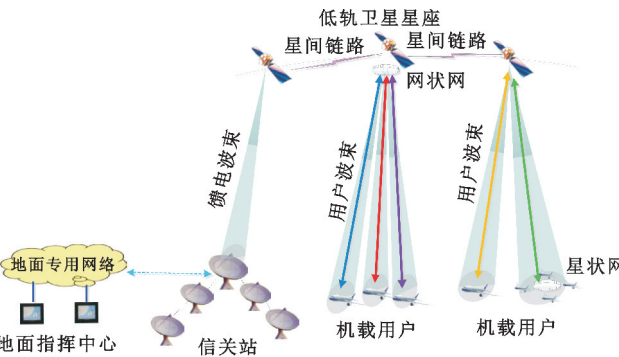


图 6 机载低轨卫星通信应用方式(组网应用)
Fig.6 Application mode of airborne LEO satellite communication system(networking application)

3 机载低轨卫星通信关键技术

3.1 多波束相控阵天线技术

常见的机载卫星通信天线有传统反射面天线^[10]、介质透镜阵列天线、平面阵列天线和相控阵天线^[11],各种形式天线对比情况如表 1 所示。

表 1 各类机载卫星通信天线对比

Tab. 1 Comparison among various airborne satellite communication antennas

天线	特点	优点	弱点
反射面天线	反射面天线做动中通天线时,需根据平台需求降低轮廓,采用机械调整天线面的方式跟踪卫星	增益高、带宽高	普通反射面体积和重量大,安装不方便
介质透镜天线	透镜天线采用馈源机械扫描的方式跟踪卫星,可较好地实现多波束、多频段共用	易实现多频段、宽频带、多波束	插损大,阵列控制实现较难
平面阵列天线	平面阵列天线按频段需求确定天线片数,天线剖面较低,采用机械扫描方式跟踪卫星	安装相对简单,搜索、锁星时间短	天线口径效率低,增益和带宽较低
相控阵天线	相控阵天线可使用一维或二维有源体制,采用电扫描方式跟踪卫星	体积小,重量轻,波束切换快,安装简单	天线有效口径低,成本高

在机载卫星通信天线选择时,应综合衡量卫星

资源情况、平台性能需求和安装限制条件后确定。在 GEO 卫星通信系统中,对重量、空间要求不敏感的大型机载平台,可采用高增益、高性能的天线形式;对安装空间有限、有共形需求的平台,宜采用低剖面、相控阵体制天线。在 LEO 卫星通信系统中,由于 LEO 卫星运行速度快、机载平台机动性强,机载低轨卫星通信天线每小时多达几十次的星间波束切换,这就要求天线拥有快速、精确的波束调度和跟踪能力,传统的机械扫描式天线显然难以满足要求。同时,为了能够在低轨卫星之间实现无缝切换,机载低轨卫星通信天线需具备同时与多颗卫星连接的能力。

多波束相控阵天线采用电扫的方式控制波束指向,可以同时跟踪不同位置的多颗卫星,能够在低轨卫星之间实现无缝切换,而不会在所谓的“先通后断”的切换过程中失去链接^[12]。多波束相控阵天线可采用模拟波束赋形、数字波束赋形和混合波束赋形三种方式。其中,模拟波束赋形网络是固定的,可实现波束少,无法实时改变波束数量与天线极化方式;数字波束赋形网络灵活,可实现波束多,但存在设备复杂、功耗大、成本高、散热难等问题;混合波束赋形结合模拟波束赋形和数字波束赋形的优势,能灵活改变波束数量,实现性能、成本、复杂度和功耗等因素的综合优化,可广泛应用于机载低轨卫星通信系统。

3.2 高动态低信噪比突发信号同步技术

机载平台天线安装空间受限,小口径天线导致卫星通信系统工作于低信噪比环境。同时,由于 LEO 卫星运动速度极快,结合机载平台的高速运动,造成两者之间的相对速度、加速度甚至二阶加速度很大,导致卫星通信信号遭受严重的多普勒效应,给工作于低信噪比条件下的信号接收带来极大挑战。并且,为了进一步提高卫星通信信号的抗干扰能力和抗截获能力,增强系统保密性,机载平台往往采用突发通信方式。高动态低信噪比突发信号同步技术应重点解决低复杂度突发信号检测、高精度载波频率捕获、快速载波相位跟踪等问题。

针对高精度载波频率捕获问题,目前的研究集中在基于训练序列的估计算法^[13-14]、基于轨道参数预估的算法^[15]以及基于 M 次方调制的算法^[16]上。基于训练序列的算法利用数据帧中插入的已知导频序列进行频偏估计,前提是定时信息已恢复,仅适用于相对频偏较小的场景。基于轨道参数预估的算法根据卫星星历以及地面接收机的位置对卫星可视时间段内的多普勒频偏进行预测,需要卫星星历、接收

机位置等先验信息,要求已完成时间同步,且卫星位置的精确计算运算量大。基于 M 次方调制的算法针对 M 进制相移键控和 M 进制正交幅度调制信号,对数据进行 M 次方运算去除数据信息的影响,再对频偏进行估计。由于经 M 次方运算后,原位于频率 f_d 处的多普勒分量搬移至 $M \cdot f_d$ 处,在多普勒频偏较大时,采样率要求高,运算量大。

为提高传统锁相环载波跟踪技术在高动态通信链路中的性能特性,业界提出了锁频锁相环^[17]和可变带宽锁相环技术,但总体而言,其跟踪精度和稳定性仍不能满足高动态卫星通信链路的应用需求。在这一背景下,为在非线性条件下获得更优的参数估计,各国学者以标准卡尔曼滤波算法为原型,相继推出了扩展卡尔曼滤波^[18]、无迹卡尔曼滤波^[19]、容积卡尔曼滤波^[20]和求积分卡尔曼滤波^[21]以及基于序贯蒙特卡罗估计理论的粒子滤波^[22]等多种改进算法,其应用范畴突破了传统卡尔曼滤波的线性、高斯假设限制,对于任意形式的系统状态方程和观测方程,无论信号变量与噪声的统计特性服从何种概率分布,均能够得出最小均方 (Minimum Mean Square Error, MMSE) 准则下的最优贝叶斯估计量。

3.3 先进编码调制技术

机载低轨卫星通信系统存在信噪比低及多普勒效应严重等特征,对微弱高动态信号的高可靠接收提出了巨大挑战。为了确保机载低轨卫星通信信号接收的可靠性,就需借助先进的信道编码和数字调制技术来共同构建一个高性能接收系统。

卫星通信信道编码大体经历了卷积码、级联码、Turbo 码、LDPC 码的发展演进过程,并朝着高效率、高增益、低计算复杂度、低延迟的方向发展。近年来, Turbo 码和 LDPC 码已在机载低轨卫星通信系统中得到了广泛的应用。Turbo 码在极低信噪比下可获得很高编码增益,性能接近香农极限,特别适合中等误码率需求的卫星系统。LDPC 码也是一种性能接近香农极限的码,而且 LDPC 码字容易构造,编码不需要深度交织就可获得很好的性能,译码不基于网格,复杂度大大降低。随着 5G 技术的发展, Polar 码得到了应用。Polar 码在理论上被证明可以达到香农容量极限,其优良性能使其可以作为机载低轨卫星通信信道编码的方案。常用的 Polar 码构造方法包括了巴氏参数法^[23]、密度进化法^[24]、高斯近似法^[25]和极化重量构造 (Polarization Weight, PW) 法^[26]等。然而,在机载低轨卫星通信系统中,码长有限, Polar 码串行抵消译码算法纠错性能不理想,有限码长下低复杂度的译码技术成为研究的重点。

同时,随着低轨卫星应用的高速发展,传统传输体制难以满足低轨卫星通信系统对传输速率、频谱效率以及新型业务的更高要求,具有高频谱利用率的多载波调制技术逐渐得到应用。正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 技术^[27]因其在频谱效率和可靠性等方面的众多优势,已成为 LEO 卫星通信系统的基础传输技术的研究热点^[28-29]。然而, OFDM 技术存在旁瓣功率辐射大且旁瓣衰减缓慢、频偏敏感、高峰均比等问题,制约了其在 LEO 卫星通信系统中的应用。随着 5G 移动通信的高速发展,为了应对更高速的通信要求,以 OFDM 技术为基础的具有更高频谱效率、更低峰均比、更低带外辐射的滤波器组多载波 (Filter Bank Multi-carrier, FBMC)^[30]、通用滤波多载波 (Universal Filtered Multi-carrier, UFMC)^[31]、广义频分复用 (Generalized Frequency Division Multiplexing, GFDM)^[32]等非正交多载波调制技术得到了广泛研究。如何将非正交多载波调制技术应用于机载低轨卫星通信系统成为了一个重要的研究方向。

3.4 跨星跨波束快速接入与切换技术

在机载低轨卫星通信系统中,由于 LEO 卫星运行速度高,机载平台机动性强,机载平台必将面临频繁的跨星跨波束接入与切换。同时,高动态机载用户将遭受严重的多普勒效应,必将给跨星跨波束接入与切换过程中的信令交互带来挑战。

由于接入灵活、信令交互少、传播时延等特点,基于竞争的随机接入算法被广泛应用于各类卫星通信网络,其主要可分为传统随机接入算法、基于时隙的增强随机接入算法和基于扩频的增强随机接入算法^[33-37]。传统随机接入算法主要包括纯 ALOHA、具有捕获效应的 ALOHA 和选择拒绝 ALOHA,在业务量较小时具有较好的时延性能。基于时隙的增强随机接入算法主要包括时隙 ALOHA、分集时隙 ALOHA、竞争解决分集时隙 ALOHA (Contention Resolution Diversity Slotted Aloha, CRDSA),虽然可明显提升接入容量,但终端需要进行全网同步。基于扩频的增强随机接入算法主要包括扩频 ALOHA 和增强扩频 ALOHA,无需全网同步,信令开销较小。目前,基于竞争的随机接入算法应用于机载低轨卫星通信系统中还需进一步解决如下两个问题^[38]:一是提升首次接入成功率,以保证高动态机载终端接入成功率;二是减少接入时延,减少数据重复发送次数,以提升机载低轨卫星通信系统信道资源利用率。

跨星跨波束切换可保证机载用户通信的连续性,切换策略的好坏将直接影响机载用户对卫星通

信质量的感知,对机载低轨卫星通信系统性能具有重要影响^[39]。在机载低轨卫星通信系统中,高动态机载用户通信链路具有更大的不确定性,跨星跨波束切换算法必然依据多个因素进行判决。多因素切换算法可通过引入与机载低轨卫星通信系统相关的信号强度、信噪比、覆盖时长、通信仰角、通信负载等多个影响因素,并对这些影响因素进行融合来获得更优的切换性能。多因素切换算法主要分为基于代价函数的切换算法和基于智能信号处理技术的切换算法^[40-41]。相比于基于代价函数的切换算法,基于智能信号处理技术的切换算法融合效果往往更好,但其算法复杂度相对较高。针对机载低轨卫星通信系统,应根据系统特点选择合适的影响因素,并通过权衡复杂度和性能来选择融合算法,从而实现跨星跨波束快速切换。

4 机载低轨卫星通信发展趋势

4.1 通信系统朝着星地融合方向发展

随着空天地信息网络一体化的发展,卫星通信与地面无线通信的融合将成为机载平台无线通信未来的重要发展方向。现阶段该种融合主要集中在业务层面,并未深入地更深层次的通信体制融合和系统全面融合方向发展。星地融合的终极目标是通过空口体制、网络架构、资源管理、业务等方面的深入系统融合,实现机载平台用户无感知一致服务。然而,由于星地面临的信道环境、传输特性等存在差异,星地融合的机载低轨卫星通信系统需要重点突破融合架构、星地融合无线传输等核心关键技术。

4.2 通信体制朝着低时延、高速率、高可靠、抗干扰方向发展

为了保证飞行安全,机载平台需通过低轨卫星通信系统传输机载平台的飞行控制信息和平台状态信息。当上述传输信息因卫星通信链路时延过大造成非实时接收或受到干扰造成无法正常接收时,机载平台的飞行安全将大大降低。同时,随着载荷技术的不断发展,机载平台对载荷数据传输的实时性和高速率也提出了越来越高的要求。因此,为了实现飞行控制信息、平台状态信息和载荷数据信息的实时可靠高速传输,以及应对日趋复杂的电磁环境,机载低轨卫星通信体制势必朝着低时延、高可靠、抗干扰方向发展。

4.3 通信终端朝着多模化、小型化、轻量化方向发展

受平台空间、重量和功耗限制,机载平台所能容

纳的载荷能力有限。同时,随着对机载平台提出了越来越多新的性能要求,导致平台电子系统越来越庞大,电子设备种类和数量急剧增加。在平台有限空间和承重条件下,单类电子设备的体积、重量将受到越来越严格的限制。为了适应上述发展趋势,机载平台卫通终端设备必然朝着小型化、轻重量方向发展。另一方面,现有卫星通信终端设备一般只具有一种工作模式,功能单一,无法满足机载平台多样化需求,将严重影响使用。为了实现多模化卫通应用,传统上只能依靠不同种类设备的叠加,可扩展性差,无法从根本上做到终端设备的小型化和轻重量。为了解决上述问题,急需推动机载低轨卫通终端设备的通用化、标准化和模块化,通过在同一终端设备上重构波形来支持多种卫通应用模式,从而在实现多模应用的前提下减少设备体积和重量。

5 结束语

低轨卫星通信已成为卫星通信技术发展的重点领域。机载低轨卫星通信作为其重要组成部分,在军用和民用领域均被认为是最新最有前途的卫星通信系统,通过关键技术的创新应用,可为军民领域发展带来新的优势。本文根据低轨卫星通信系统相关技术情况,概述了机载低轨卫星通信系统的国内外发展现状,分析了机载低轨卫星通信的应用特点、系统架构和应用方式,并提出了机载低轨卫星通信的关键技术和现有问题,给出了机载低轨卫星通信技术的研究攻关方向,可为该领域科研人员提供借鉴和参考。

参考文献:

[1] 易克初,李怡,孙晨华,等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报,2015,36(6):157-172.

[2] 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.

[3] 赵鹏. 我国低轨卫星通信产业发展现状及趋势分析[J]. 卫星应用,2021(8):20-23.

[4] PORTILLO I D, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low Earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica,2019,159(4):123-135.

[5] 张晟宇. 本质、技术与竞争:漫谈 Starlink 星座[J]. 卫星与网络,2018(3):18-20.

[6] MCDOWELL J. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation[J]. Astrophysical Journal Letters,2020,892(2):1-10.

[7] 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.

[8] 刘秀,彭振忠,刘达. 商业低轨通信卫星星座的发展态势及军事应用分析[J]. 军事文摘,2020(15):29-33.

[9] 徐小涛,庞江成,李超. 星座卫星移动通信系统最新发展及启示[J]. 国防科技,2021,42(1):100-105.

[10] 刘健泉,周昊天,何翠瑜,等. 低轨卫星测控系统三轴 12 m 反射面天线系统的结构设计[J]. 电讯技术,2022,62(5):655-662.

[11] 姚亚利,温剑,侯禄平,等. 一种低轨卫星通信天线多工作模式波束实现技术[J]. 电讯技术,2021,61(4):403-408.

[12] 胡荣,李秀梅,邓娟,等. 基于混合波束赋形的低轨通信卫星相控阵天线架构研究[J]. 天地一体化信息网络,2021,2(2):90-97.

[13] AMIRI S, MEHDIPOUR M. Accurate doppler frequency shift estimation for any satellite orbit[C]//Proceedings of 2007 3rd International Conference on Recent Advances in Space Technologies. Istanbul;IEEE,2007:602-607.

[14] 李耀晨,赵渊,裴文端. 5G 低轨卫星移动通信系统多普勒频偏估计算法[J]. 计算机测量与控制,2018,26(10):226-229,234.

[15] 武瞰,赵宗印,詹天南. 低轨卫星多普勒频移特性的快速计算[J]. 飞行器测控学报,2012,31(5):79-83.

[16] 彭耿,黄知涛,姜文利,等. 卫星通信信号的多普勒频率参数盲估计[J]. 系统工程与电子技术,2010,32(4):674-677.

[17] 朱国富. 扩频体制低轨卫星通信信号捕获与跟踪系统设计[J]. 电讯技术,2022,62(5):576-584.

[18] DEOSSA P, PATINO J, ESPINOSA J, et al. A comparison of extended Kalman filter and levenberg-marquardt methods for neural network training [C]//Proceedings of 2011 IEEE IX Latin American Robotics Symposium and IEEE Colombian Conference on Automatic Control. Latin;IEEE,2011:1-5.

[19] DASH P K, HASAN S, PANIGRAHI B K. Adaptive complex unscented Kalman filter for frequency estimation of time-varying signals [J]. IET Science, Measurement and Technology,2010,4(2):93-103.

[20] ARASARATNAM I, HAYKIN S, Hurd T R. Cubature Kalman filtering for continuous-discrete systems: theory and simulations [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2010,58(10):4977-4993.

[21] ARASARATNAM I, HAYKIN S. Square-root quadrature Kalman filtering [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2008,56(6):2589-2593.

[22] ARULAMPALAM M S, MASKELL S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian bayesian tracking [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2002,50(2):174-188.

[23] ARIKAN E. Channel polarization;a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels[J]. IEEE Transactions on Information Theory,2009,55(7):3051-3073.

[24] MORI R, TANAKA T. Performance of polar codes with the construction using density evolution [J]. IEEE Communications Letters,2009,13(7):519-521.

[25] TRIFONOV P. Efficient design and decoding of polar codes[J]. IEEE Transactions on Communications,2012,60(11):3221-3227.

[26] HE G N, BELFIORE J C, LIU X, et al. β -expansion: a theoretical framework for fast and recursive construction of polar codes [C]//Proceedings of 2017 IEEE Global Communications Conference. Singapore;IEEE,2017:1-6.

[27] HWANG T, YANG C, WU G, et al. OFDM and its wireless applications;a survey[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2008,58(4):1673-1694.

[28] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, ROPER M, et al. LEO small-satellite constellations for 5G and beyond-5G communications[J]. IEEE Access,2020,8:184955-184964.

[29] 张毅. 低轨卫星宽带 OFDM 通信相位噪声群时延的联合估计[J]. 电讯技术,2021,61(6):716-721.

[30] NISSEL R, SCHWARZ S, RUPP M. Filter bank multicarrier modulation schemes for future mobile communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications,2017,35(8):1768-1782.

[31] VAKILIAN V, WILD T, SCHAICH F, et al. Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond LTE [C]//Proceedings of 2013 Global Communications Conference. Atlanta;IEEE,2013:223-228.

[32] WUNDER G, JUNG P, KASPARICK M, et al. 5G NOW: non-orthogonal asynchronous waveforms for future mobile applications[J]. IEEE Communications Magazine,2014,52(2):97-105.

[33] 高倩,张更新. 低轨卫星物联网多址接入协议研究 [J]. 通信技术,2018,51(3):588-592.

[34] MENGALI A, GAUDENZI R D, ARAPOGLOU P D. Enhancing the physical layer of contention resolution diversity slotted ALOHA [J]. IEEE Transactions on Communications,2017,65(10):4295-4308.

[35] HERRERO O D R, GAUDENZI R D. Generalized analytical framework for the performance assessment of slotted random access protocols [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2014,13(2):809-821.

[36] MELONI A, MURRONI M. Random access in DVB-RCS2: design and dynamic control for congestion avoidance [J]. IEEE Transactions on Broadcasting,2014,60(1):16-28.

[37] LI P, HE Y, CUI G, HE J, et al. Asynchronous cooperative aloha for multi-receiver satellite communication networks [J]. IEEE Communications Letters,2017,21(6):1321-1324.

[38] 秦兴,冉静,刘芳. 低轨卫星星座系统的快速随机接入算法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2021,42(5):103-110.

[39] 贺达健,游鹏,雍少为. LEO 卫星通信网络的移动性管理[J]. 中国空间科学技术,2016,36(3):1-14.

[40] 沈俊,陈曦,赵新胜. 低轨卫星通信系统中的一种波束小区切换算法[J]. 电讯技术,2020,60(4):439-447.

[41] 底晓强,于力伟,刘旭,等. 一种基于演化博弈的低轨卫星切换算法研究[J]. 南京大学学报(自然科学版),2018,54(4):855-862.

作者简介:

陈书恒 男,1984 年生于湖南岳阳,2011 年获硕士学位,现为高级工程师,主要研究方向为航空电子系统技术。

莫嘉倩 女,1991 年生于广西梧州,2019 年获硕士学位,现为助理工程师,主要研究方向为航空电子技术。

莫小欣 女,1996 年生于广西梧州,硕士研究生。