

低轨卫星通导一体化信号设计及处理

刘炳宏, 赵亚飞, 彭木根, 赵祥天, 封慧琪

(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: 通导一体化是现代卫星通信与导航领域的重要发展方向。低轨巨型通信星座的迅速发展提供了丰富的载荷、链路和终端资源, 以及强大的通信覆盖及信息传输能力, 同时利用低轨星座几何构型变化快、落地功率强等特点, 可实现对现有导航系统的补充、备份和增强, 从而提供覆盖更广、精度更高且更为稳健的通信与导航服务。低轨卫星通导一体化系统中, 发送信号设计及接收信号处理是实现高效通信与高精度导航的关键环节。为此, 首先梳理低轨卫星通导融合的演进过程; 其次, 围绕发送信号设计和接收信号处理, 重点阐述帧结构和接收机设计的相关方案; 最后, 探讨未来所面临的挑战及潜在解决方案。

关键词: 低轨卫星; 通导一体化; 发送信号设计; 接收信号处理

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2023029

Design and Processing of Communication and Navigation Integrated Signal Based on LEO Satellite

LIU Binghong, ZHAO Yafei, PENG Mugen, ZHAO Xiangtian, FENG Huiqi

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

Abstract: The integration of communication and navigation is an important direction in modern satellite communication and navigation fields. The advancement of low earth orbit (LEO) mega-constellations provides the abundant load, link and terminal resources, as well as the powerful communication coverage and information transmission capabilities. Moreover, together with the fast-changing geometric configuration and strong power, the LEO satellites can complement, backup, and enhance the existing navigation systems to provide communication and navigation services with broader coverage, higher precision and reliability. In the LEO satellite-enabled communication and navigation-integrated system, the design of the transmitted signals and the processing of the received signals are crucial for achieving efficient communication and high-precision navigation. To this end, the evolution process of the communication and navigation fusion was first outlined. Then, it focused on the design of transmitting signals and the processing of receiving signals, the relevant schemes included the layout of the frame structure and the receiver were emphasized, respectively. Finally, the challenges and potential solutions that lie ahead in the future were explored.

Keywords: LEO satellite, integration of communication and navigation, design of the transmitted signal, processing of the received signal

0 引言

近年来, 低轨卫星通信系统进入高速发展阶段, 国内外相继大幅度增加了卫星部署规模, 计划未来建造包含大量低轨卫星的低轨巨型星座。英国一网 (OneWeb) 公司

宣布构建包含 648 颗卫星的低轨卫星系统^[1]; 美国太空探索技术 (SpaceX) 公司提出“星链”计划, 将在近地轨道分 3 层部署约 1.2 万颗卫星^[2]; 美国亚马逊公司提出“柯伊伯 (Kuiper)”项目, 计划将 3 236 颗卫星送入近地轨道^[3]; 韩国三星公司预备发射 4 600 颗低轨微型卫星实现“太空

收稿日期: 2023-06-01; 修回日期: 2023-09-01

基金项目: 北京市科技计划项目(No.Z221100007722012)

Foundation Item: Beijing Municipal Science and Technology Project (No.Z221100007722012)

互联网”计划^[4]。2020年,中国向国际电信联盟(ITU)提交星座计划申请,拟发射12 992颗卫星组建“星网工程”^[5]。

通信与导航的一体化(简称为通导一体化)是当前卫星通信和导航领域研究的热点之一。传统的卫星通信系统和导航系统相对独立,然而,随着通信和导航需求不断增加,对于更高效、更灵活的通信和导航服务的需求日益迫切。传统全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)通常由中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星和地球同步轨道卫星构成,卫星轨道高度高、运行速度慢,导航信号传输过程中衰减严重,且数据传输速率低^[6]。相较于GNSS,低轨通信卫星轨道高度低,导航信号的空间传播损耗低,信号到达地面终端的功率高、抗干扰能力强;低轨卫星运行速度快,多普勒频移大,有助于基于多普勒效应的定位测量;低轨通信卫星本身用于通信服务,数据传输速率高,可有效减少星历接收时间,提升定位收敛速度和系统灵敏度^[7]。针对上述GNSS的不足和低轨通信卫星的优势,面向低轨卫星通导一体化的研究应运而生,利用低轨卫星所提供的通信信号、时频信息,在低轨卫星上将通信与定位、导航和授时(Position, Navigation and Timing, PNT)功能整合,从而提供更加全面和多样化的服务。铱星的定位与授时(Satellite Time and Location, STL)信号体制是对通导一体化的初步尝试,通过在原通信系统上的窄带寻呼信道传输导航信息,可以显著增强PNT能力。

(1) 低轨卫星通导一体化系统的演进过程

低轨卫星通导一体化系统的演进过程可以分为以下几个阶段:基于低轨卫星机会信号(Signal of Opportunity, SOP)的导航系统^[8];低轨卫星辅助导航增强系统^[9];低轨卫星通导一体化系统^[10]。通过逐步整合不同阶段的技术和功能,系统能够逐步提升性能和功能。从最初的基于低轨卫星SOP的导航系统到低轨卫星辅助导航增强系统,再到完全融合的通导一体化系统,系统的可用性、可靠性和精度都得到了显著改善。这种演进过程反映了对于更高效、更全面的低轨卫星通导一体化系统的需求,推动着技术和应用的不断发展。

① 基于低轨卫星SOP的导航系统

该阶段主要基于环境中存在的低轨卫星的SOP进行导航定位。来自低轨卫星的SOP具有信号功率高、覆盖广、抗干扰以及无须增减基础设施等优点,因此可以借助低轨卫星的SOP实现定位。对低轨卫星SOP进行处理获得多普勒频率估计,并利用其作为定位观测信息,结合卫星两

行轨道根数(Two-Line Elements, TLE)^[11]及轨道预测模型所得的卫星轨道信息,采用瞬时多普勒定位技术实现定位的解算。基于低轨卫星SOP的导航在室内、城市和恶劣环境下的导航等方面具有广泛的应用前景,然而也面临包括信号多径效应、信号稀疏性、多个无线信号源的互相干扰等挑战。

② 低轨卫星辅助导航增强系统

随着对导航精度和可靠性要求的提高,低轨卫星辅助导航增强系统应运而生。在这一阶段中,引入低轨卫星以弥补传统导航系统在信号可见性及覆盖范围等方面的不足。具体而言,低轨卫星可以提供信号增强和信息增强功能。在信号增强中,低轨卫星作为导航信号的增强源,能够独立产生测距信号,从而与现有的GNSS信号进行联合定位,且低轨卫星到观测站几何结构的快速变化能够有效缩短精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)^[12]的收敛时间,提升卫星导航服务的可靠性、可用性与连续性;而在信息增强中,基于低轨通信卫星的强大通信能力,提供高带宽和低时延的GNSS差分信息增强服务,可以有效解决GNSS接收机在弱信号条件下捕获和跟踪灵敏度低等问题。

③ 低轨卫星通导一体化系统

该阶段通过共享卫星资源、优化频谱利用、融合发送信号设计和接收信号处理等措施,实现通信与导航功能的完全融合。这种一体化的系统可以灵活配置资源,提高资源的利用效率;同时通信与导航协同,通过在通信信号中嵌入导航数据,并利用通信系统的安全机制和干扰抑制等技术,增强系统的抗干扰能力和数据传输的安全性。此外,提供更为全面、高效的卫星服务,从而满足终端用户的多样化业务需求。

(2) 低轨卫星通导一体化信号体制

随着通信与导航应用的日益多样化,用户对于同时获得高质量通信和精准导航服务的需求不断增长。传统的通信和导航系统往往采用不同的信号体制,导致用户需要从不同的卫星系统获取服务以满足差异化的应用需求;传统的卫星通信和导航系统在频谱分配上存在重叠和浪费的情况,导致频谱资源的低效利用。因此,需要开展低轨卫星通导一体化信号体制研究,通过对载波频段选取、通导一体化帧结构设计以及调制编码方式选择等,提供一种统一的信号体制。通过对发送信号的精心设计,可以实现通信数据的高效传输和可靠传达,同时融合导航功能,确保定位和导航的准确性。此外,在接收端需要对接收到的信号进行处理和解析,以提取有用信息,并进行相应的导航

定位和通信解码。通过接收端信号处理,系统可以有效应对信号干扰和噪声,提高通信质量和导航精度。

1 低轨卫星通导一体化发射信号设计

低轨卫星通导一体化的基本框架由空间段、地面段和用户段构成。下面主要关注空间段的发射信号设计,包括信号帧结构设计、带宽及中心频率选择、信号调制和信道编码方式等。

1.1 帧结构

(1) 基于低轨卫星 SOP 的系统

该系统对已存在于周围环境中的泛在无线信号加以利用,通过对无线信号进行随机接入和融合处理,实现定位与导航。因此,不涉及对信号帧结构的设计。由于缺乏导航信息,需要进一步借助其他来源以获取测距方程中的未知数。由北美防空司令部(North American Aerospace Defense Command, NORAD)所制定的 TLE 可以用于弥补 SOP 导航信息的空缺。TLE 提供了卫星轨道状态的相关数据,包含卫星的轨道倾角、平均运动速度以及近地点角距等参数^[13],可用于计算卫星的位置和轨道变化情况,进行卫星通信和导航。

(2) 低轨卫星辅助导航增强系统

该系统中,除播发自身业务信号之外,低轨卫星还可以独立播发导航增强信号,用以辅助 GNSS 定位信号。为了实现高精度的定位,需要将时钟差值信息、GNSS 信息以及低轨卫星自身精密轨道信息播发给用户终端。以“天象一号”中导航增强信号的设计为例^[14],采用高压缩比、高更新率的信息帧设计和播发策略,基本帧周期为 1 s,帧长 1 000 bit,符号速率为 1 kbit/s。低轨卫星辅助导航增强系统的基本帧结构如图 1 所示。每个电文数据帧的长度为 486 bit,其中最高位的 6 bit 用于表征消息类型,中间 456 bit 为电文数据,最低位的 24 bit 用于循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)。该电文数据帧经过低密度奇偶校验(Low-Density Parity Check, LDPC)编码之后得到 972 bit 的电文符号。此外,卫星编号为伪随机噪声

码(Pseudo-Random Noise Code, PRN)编号,与卫星唯一对应,因此可以依据 PRN 对不同卫星进行区分;预留标识位用于指示 PPP 的服务状态,当其高位为 0 时表明卫星的 PPP 服务可用,否则 PPP 服务不可用。

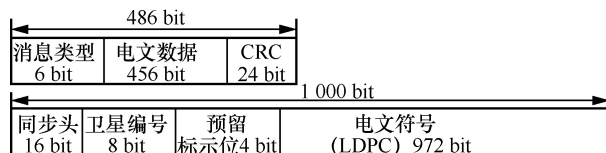


图 1 低轨卫星辅助导航增强系统的基本帧结构

(3) 低轨卫星通导一体化系统

首先给出低轨卫星通导一体化系统中单支路传输信号帧结构如图 2 所示。

铱星的 STL^[15]信号体制即采用该种帧结构,同一支路上既有导航定位信息又有通信信息,借助时分复用(Time Division Multiplexing, TDM)技术将导航电文与通信数据交替传输,在不影响地面用户正常通信的同时为其提供导航定位。上述导航与通信交替的组合电文经同一 PRN 扩频后调制到载波上。此时扩频码分为两段:前段采用短码调制包含用户 ID、通信电文时间信息以及导航定位信息在内的电文,利于快速捕获;后段采用长码调制通信电文,提升测距精度和抗干扰能力。此时传输信号表示为

$$x(t) = Ap(t)s(t)\sin(2\pi ft + \varphi) \quad (1)$$

其中, A 为扩频码的振幅, $p(t)$ 为扩频码, $s(t)$ 为导航定位信息或通信信息, f 和 φ 为载波频率和相位。考虑通信链路的双向性,上述体制容易导致地面终端信息暴露,且导航电文间断发送,难以满足地面终端的持续定位需求。

进一步地,提出了双支路的通导融合模式,其信号帧结构如图 3 所示。在帧结构中,每个帧包含两条正交的支路: I 支路和 Q 支路。其中 I 支路为导航信号传输支路,传输通过扩频调制的 PRN 和简单的导航电文; Q 支路为通信信号传输支路,传输通过扩频调制的语音、指令等通信数据。具体而言,在进行扩频调制时, Q 支路采用长码作为 PRN 以提升测距精度、保密性及抗干扰性能; I 支路

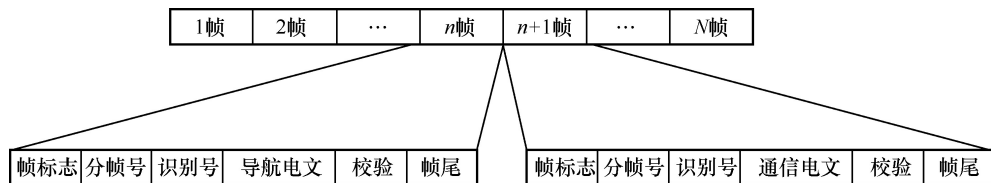


图 2 低轨卫星通导一体化系统中单支路传输信号帧结构

采用短码作为 PRN，且以较低的速率进行传输，以便于定位信息的快速捕获，同时引导通信段长码的跟踪。

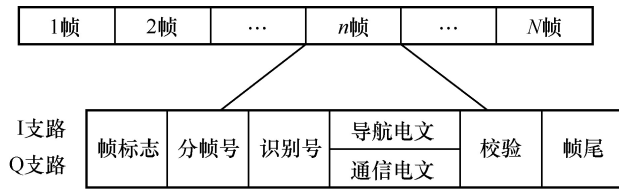


图3 低轨卫星通导一体化系统中双支路传输信号帧结构

此时传输信号表示为

$$x(t) = A_n p_n(t) s_n(t) \sin(2\pi f_n t + \varphi_n) + A_c p_c(t) s_c(t) \cos(2\pi f_c t + \varphi_c) \quad (2)$$

其中， $p_n(t)$ 和 $p_c(t)$ 分别为导航扩频码和通信扩频码， A_n 和 A_c 代表其对应的振幅。 $s_n(t)$ 和 $s_c(t)$ 分别为导航定位信息和通信信息， f_n 和 φ_n 代表导航定位信息的载波频率和相位， f_c 和 φ_c 代表通信信息的载波频率和相位。接收端可以分两条支路对导航信号及通信信号进行分别接收。由于上述帧结构能够稳定连续地实现测距并提供导航定位信号，因此相较于单支路信号体制中的导航定位信号不连续现象，能够提供连续且实时的导航定位服务。此外，仍保留了强大的通信传输能力，在信号层面上实现了导航与通信的一体化。

1.2 频带、调制方式选择及信道编码

在频带选择方面，图4展示了路径损耗、大气衰减、天线尺寸、可用带宽资源、吞吐量以及定位精度等通信和导航指数与频带资源的权衡关系。由此可知，在带宽选择方面需要综合考量包含系统需求（例如定位精度和吞吐量）、干扰衰落、连续频谱可用性以及接收机复杂度等在内的多种因素，进行详细的分析和规划。



图4 通信和导航指数与频带资源的权衡关系

在调制方式选择方面，宽带通信业务的目标在于实现高吞吐量，需要高阶调制方案；定位任务的目标在于实现高可靠传输，对高数据速率需求不大，采用低阶调制方案即可。因此，通导一体化的信号调制方式的选择需要综合

考量通信传输和导航定位的要求。低轨卫星主要采用数字调制，调制方式又可以进一步细分为线性调制和非线性调制^[16-17]，其中线性调制通常可以实现较高的传输速率和频谱效率。相较于线性调制，非线性调制的传输速率和频谱效率低，但是针对多普勒误差可以实现稍好的鲁棒性，因而更适用于基于多普勒的定位。此外，针对特定的卫星系统，存在多种调制方式共存的情况。

在信道编码方面，通过在发送端对信号进行编码，增加其冗余性，可有效提升信道的传输性能，增加传输信道的可靠性和容错性，降低误码率。信道编码的种类包括线性分组码、卷积码、LDPC码、Turbo码以及Polar码，其中应用于低轨卫星的编码主要包括线性分组码、卷积码和LDPC码^[19-20]等。

2 接收信号处理

本文主要关注用户段的接收信号处理，包括：接收机接收卫星信号并解码；根据多个接收信号计算距离并确定接收机位置；纠正由于大气层导致的延迟、多径效应、电离层效应、对流层效应以及相位缠绕效应等造成的误差；输出包括位置、速度和方向等信息在内的定位结果。用户段的核心是接收机的设计及信号处理，接收机根据给定的系统信号进行信号截获、纠错和PNT计算。因此，下面将聚焦接收机的设计环节，分别面向基于低轨卫星SOP的系统、低轨卫星辅助导航增强系统以及低轨卫星通导一体化系统展开分析。

2.1 基于低轨卫星SOP的系统

在基于SOP的系统中，其接收器由软件定义无线电（Software Defined Radio, SDR）和测高仪组成。由于SDR的灵活性，导航信息的处理可以通过扩展卡尔曼滤波器（Extended Kalman Filter, EKF）或加权非线性最小二乘估计器来执行。图5给出了基于低轨卫星SOP的接收机架构，包含跟踪环路和导航处理器等。

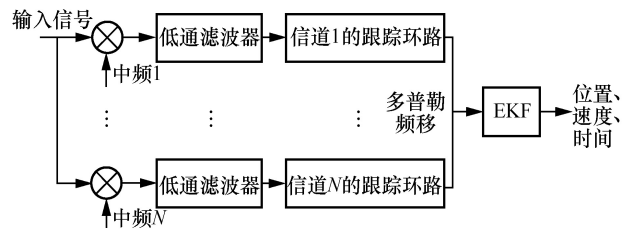


图5 基于低轨卫星SOP的接收机架构

具体而言，首先，将天线所接收到的所有可见的低轨卫星信号与相应的中频信号进行混合，将其划分到不同信

道上进行传输；其次，各路信号分别经过低通滤波器获得指定的带宽，其中低通滤波器带宽被设置为大于二分之一符号周期且能够容纳多普勒频移信号。在滤波之后，获取的信号被传递到跟踪环路，所产生的多普勒频移被进一步传递到 EKF 进行处理从而计算精确的位置或状态向量（包括位置、速度和时间）。

2.2 低轨卫星辅助导航增强系统

在低轨卫星辅助导航增强系统中，低轨卫星对 GNSS 导航信号的增强可以通过辅助提升其捕获灵敏度来实现。假设低轨卫星通过其通信信道传输 GNSS 导航星历，图 6 给出了低轨卫星辅助导航增强系统的接收机架构。

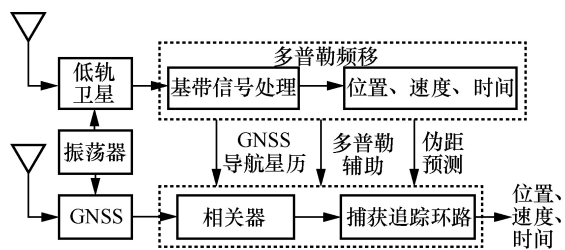


图 6 低轨卫星辅助导航增强系统的接收机架构

接收机包含低轨卫星模块和 GNSS 模块，两模块皆用于定位服务且共用一个振荡器作为频率源。GNSS 模块可与低轨卫星模块共享从低轨卫星信号所获取的信息。首先，通过对低轨卫星信号进行基带处理，从中提取多普勒辅助信息和 GNSS 导航星历信息。接收机的初始位置可由多普勒信息估计获得。接收机利用位置信息和 GNSS 导航星历来计算接收机与 GNSS 卫星之间的视距链路。在估计的伪距和多普勒辅助信息的帮助下，频率和码搜索间隔显著减少，从而实现捕获效率的提升。接收机可以借助多普勒定位算法估计初始时钟频率，并将轨道、时间、多普勒频移、GNSS 导航星历信息等作为辅助信息，以扩展相干积分时间，从而提高信噪比、有效压缩带宽并提升捕获跟踪的灵敏度。综上所述，通过缩小频率搜索空间以及借助

LEO 模块传递星历，可以有效改善微弱信号环境下 GNSS 信号的接收。

2.3 低轨卫星通导一体化系统

针对单支路传输的通导融合信号，由于采用分时方式交替传输导航定位信息或通信信息，本质上属于 TDM，因此接收端只需要采用严格同步的时隙分割方式以及与发送端完全相同的接收顺序，就可以将分时传递的导航信号和通信信号进行分离和还原，以获得对应的导航定位信息和通信数据。单支路低轨卫星通导融合系统接收机架构如图 7 所示。具体而言，通过天线接收卫星信号，高频卫星信号经滤波放大处理后与本地振荡器混频，将信号下变频至中频模拟信号，再经过脉冲编码调制（Pulse Code Modulation, PCM）解码获得数字中频信号。之后，通过 TDM 解复用器将通信信号和导航信号进行还原，还原后的信号由分路开关依次接通各分路，在各分路中经基带信号处理后获得对应的通信数据和导航定位信息。

类似的，针对双支路传输的通导融合信号，接收端可以分两条支路对导航信号及通信信号采用导航接收机和通信接收机进行分别接收。双支路低轨卫星通导融合系统接收机架构如图 8 所示。具体而言，针对混频所得的模拟中频信号，经过带通滤波器分别获得 Q 支路通信信号和 I 支路导航信号。此后，经基带信号处理后获得对应的通信数据和导航定位信息。

在接收机接收信号之外，还需要进行位置的解算。用于位置解算的卫星无线电业务主要包括卫星无线电定位服务（Radio Determination Service of Satellite, RDSS）和卫星无线电导航服务（Radio Navigation Service of Satellite, RNSS）^[21]。RDSS 中，位置解算由终端用户外的控制系统完成，并将结果发送给用户，该服务仅需要 2 颗卫星参与，但需要信关站的配合，因此适用于低轨星座建设初期，覆盖重数不足 4 重时的情况。而在 RNSS 中则是由用户接收卫星无线电导航信号，自主完成至少到 4 颗

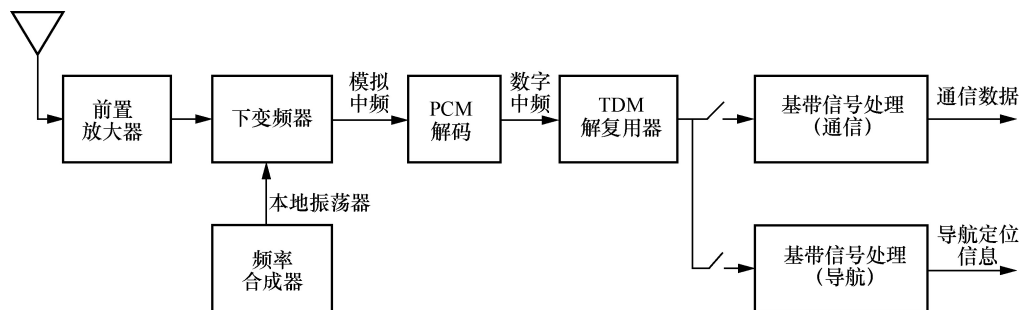


图 7 单支路低轨卫星通导融合系统接收机架构

卫星的距离测量和位置解算。在 RNSS 中, 根据卫星定位观测信息的性质可以将定位方法分为伪距定位、多普勒定位以及载波相位定位^[22]; 根据接收机是否有参考基准又可以将定位方法分为单点定位^[12]和多点定位^[23], 其中前者包括单点定位 (Single Point Positioning, SPP) 和 PPP, 后者包括相对定位和差分定位等。

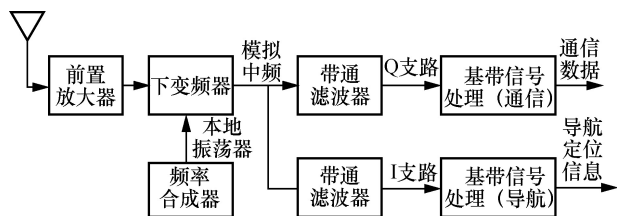


图8 双支路低轨卫星通导融合系统接收机架构

3 下一步研究方向

未来, 低轨卫星通导一体化信号设计及处理还需要在以下几方面开展进一步的研究。

(1) 大规模 MIMO 辅助通导一体化

低轨卫星通导一体化系统可能面临覆盖范围受限问题, 难以满足大范围区域的通信及导航需求, 且抗干扰能力有限, 易受外界干扰噪声影响。为了克服上述问题, 引入大规模 MIMO 技术, 不仅可以利用低轨卫星进行常规的卫星-地球通信, 还可以增强基于低轨卫星的定位服务^[24]。具体而言, 通过天线阵列实现空分复用, 从而增加信道链路容量、服务质量以及传输速率, 且波束赋形可以通过使用空时分组编码来扩展每颗低轨卫星在地球上的覆盖区域, 从而增加用户终端的数量。在定位层面, 通过多个天线阵列接收导航信号, 可以减少多径效应和信号衰减, 提高导航信号的稳定性和定位精度。此外, 通过设计特定时间仅在地球特定点可见的特定的波束模式, 并且将机器学习算法与波束模式相结合^[25], 可以实现基于波束成形的定位。同时, 在波束成形中使用大量天线有助于集中能量, 从而提高效率, 降低对拥塞和干扰的敏感性。

(2) 通导一体化信号波形及协议设计

通信波形和导航波形设计所关注的关键性能指标存在显著差异: 通信波形主要关注误码率、功耗以及多径抑制性能; 导航波形则主要关注定时精度、定位精度以及抗多径干扰性能等。因此通导一体化信号波形设计首先需要明确关键性能指标, 既要满足可靠通信的需求, 又要实现更高的测距和定位精度。可以在通信信号的基础上对通导一体化信号波形进行设计^[26], 其中, 波形包含多个数据通道及导频通道, 各通道采用速率不同但周期相同的 PRN

进行扩频, 可以通过增加导频通道数量、提升 PRN 速率等手段提升定时精度。此时, 通信与导航信号能够共存于一个波形, 在有效控制二者相互干扰的同时, 还需满足通信低误码率以及导航高定时精度的需求。

此外, 由于融合了通信和导航功能, 涉及多种信号处理和协议设计方面的复杂性, 通导一体化的信号协议设计面临一系列难题。例如, 差异化应用对于导航电文和通信数据的传输具有不同的优先级需求, 协议设计需要考虑如何根据不同应用类型及终端业务需求设置优先级, 以保障系统的性能和效率。

(3) 空天地联合通导一体化

当前所讨论的通导一体化网络大多基于卫星系统所构建, 然而在复杂环境下面临信号衰减严重的问题, 难以实现精准定位, 且易受到干扰、窃听和欺骗攻击, 安全性难以保障。而由于蜂窝通信信号的普遍存在, 利用 5G 信号进行定位已成为 GNSS 系统故障地区的一种有效的替代方案^[27]。首先进行时域的粗估计, 信号通过相关积分可在时域获得大致测距范围; 然后进行频域的精估计, 得到载波间相位信息, 并根据相位差实现高精度的测距。因此, 未来可将空间卫星通导一体化系统与地面通导一体化系统联合, 构建更加完善和高效的综合通信与导航服务体系, 进一步拓展通导一体化技术的应用场景和发展空间, 提供更全面、高效、稳定和安全的通信与导航服务。

4 结束语

低轨卫星通导一体化作为现代通信与导航领域的重要发展方向, 融合了导航和通信的多重优势, 具有巨大的应用潜力和优势。本文针对低轨卫星通导一体化系统, 探索了发送端和接收端信号处理的基础理论和关键技术, 同时展望了未来发展需求, 期望为低轨卫星通导一体化网络实现高效可靠发展提供参考。

参考文献

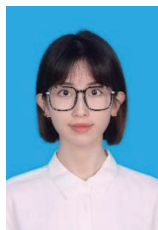
- [1] SEITZER P. Large constellations of satellites and optical astronomy[Z]. 2020.
- [2] FOUST J. SpaceX's space-internet woes: despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12, 000 satellites in 2019[J]. IEEE Spectrum, 2019, 56(1): 50-51.
- [3] OSORO O B, OUGHTON E J. A techno-economic framework for satellite networks applied to low earth orbit constellations: assessing starlink, OneWeb and Kuiper[J]. IEEE Access, 2021, 9: 141611-141625.
- [4] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.

- [5] 赛迪顾问物联网产业研究中心, 新浪 5G. 中国卫星互联网产业发展研究白皮书[Z]. 2020.
CCID Consulting Internet of Things Industry Research Center, Sina 5G. China satellite internet industry development research white paper[Z]. 2020.
- [6] HEGARTY C J. GNSS signals—an overview[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Frequency Control Symposium Proceedings. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-7.
- [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.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [8] 秦红磊, 谭滋中, 丛丽, 等. 基于 ORBCOMM 卫星机会信号的定位技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(11): 1999-2006.
QIN H L, TAN Z Z, CONG L, et al. Positioning technology based on ORBCOMM signals of opportunity[J]. Journal of Beihang University, 2020, 46(11): 1999-2006.
- [9] 王磊, 李德仁, 陈锐志, 等. 低轨卫星导航增强技术: 机遇与挑战[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 144-152.
WANG L, LI D R, CHEN R Z, et al. Low earth orbiter (LEO) navigation augmentation: opportunities and challenges[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 144-152.
- [10] 赵亚飞, 闫冰, 孙耀华, 等. 低轨星座通导一体化: 现状、机遇和挑战[J]. 电信科学, 2023, 39(5): 90-100.
ZHAO Y F, YAN B, SUN Y H, et al. Communication and navigation integration for LEO constellations: status, opportunities, and challenges[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(5): 90-100.
- [11] 杨旭, 刘静, 吴相彬, 等. 利用 TLE 数据分析 LEO 卫星轨道异常的新方法: 综合判据法[J]. 空间科学学报, 2011, 31(2): 223-228.
YANG X, LIU J, WU X B, et al. New method to analyse the orbital abnormal of LEO satellite using TLE data—compositive criterion[J]. Chinese Journal of Space Science, 2011, 31(2): 223-228.
- [12] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1399-1407.
ZHANG X H, LI X X, LI P. Review of GNSS PPP and its application[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1399-1407.
- [13] VALLADO D A, CEFOLA P J. Two-line element sets—practice and use[C]//63rd International Astronautical Congress. [S.l.:s.n.], 2012: 1-14.
- [14] 伍蔡伦, 树玉泉, 王刚, 等. 天象一号导航增强信号设计与性能评估[J]. 无线电工程, 2020, 50(9): 748-753.
WU C L, SHU Y Q, WANG G, et al. Design and performance evaluation of Tianxiang-1 navigation enhancement signal[J]. Radio Engineering, 2020, 50(9): 748-753.
- [15] 谢卓成. 铱星 STL 信号体制及性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- XIE Z C. Research on Iridium STL signal system and performance[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [16] CHAUDHARI S, CABRIC D. Kuiper test based modulation level classification under unknown frequency selective channels[C]//Proceedings of 2017 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (Global SIP). Piscataway: IEEE Press, 2018: 313-317.
- [17] XIE H R, ZHAN Y F, ZENG G M, et al. LEO mega-constellations for 6G global coverage: challenges and opportunities[J]. IEEE Access, 2021, 9: 164223-164244.
- [18] FERRE R M, LOHAN E S. Comparison of MEO, LEO, and terrestrial IoT configurations in terms of GDOP and achievable positioning accuracies[J]. IEEE Journal of Radio Frequency Identification, 2021, 5(3): 287-299.
- [19] 崔汉明. 低轨卫星通信系统中信道编码的研究[D]. 上海: 上海微系统与信息技术研究所, 2005.
CUI H M. Research on channel coding in LEO satellite communication system[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, 2005.
- [20] KARIM K, MOSBAH K, MALEK B, et al. Performance of discrete wavelet transform with convolutional code in chaotic DS-CDMA system for microsatellite communication[C]//Proceedings of 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Piscataway: IEEE Press, 2004.
- [21] DOU C J, ZHANG B Q, TAN S S, et al. A new three-satellite high-precision RDSS/RNSS combination positioning method[C]//Proceedings of 2010 Second International Workshop on Education Technology and Computer Science. Piscataway: IEEE Press, 2010: 288-290.
- [22] 陈静茹, 胡雨昕, 刘玥, 等. 面向低轨通信星座的导航定位方法比对研究[J]. 信号处理, 2023, 39(3): 428-438.
CHEN J R, HU Y X, LIU Y, et al. A comparison research of navigation and positioning methods for low earth orbit communication constellations[J]. Journal of Signal Processing, 2023, 39(3): 428-438.
- [23] 刘洋洋, 廉保旺, 赵宏伟, 等. Kalman 滤波辅助的室内伪卫星相对定位算法[J]. 物理学报, 2014, 63(22): 415-421.
LIU Y Y, LIAN B W, ZHAO H W, et al. Indo or pseudolite relative localization algorithm with Kalman filter[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(22): 415-421.
- [24] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(8): 1851-1865.
- [25] ZHANG Y Y, LIU A J, LI P H, et al. Deep learning (DL)-based channel prediction and hybrid beamforming for LEO satellite massive MIMO system[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(23): 23705-23715.
- [26] 许笑笑. 通导一体化波形设计与接收方法优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.

XU X X. Waveform design and receiving method optimization of communication and navigation integration[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.

- [27] LI W X, LIU Y P, LI X X, et al. Three-dimensional cooperative localization via space-air-ground integrated networks[J]. China Communications, 2022, 19(1): 253-263.

作者简介



刘炳宏（1995—），女，博士，北京邮电大学博士后，主要研究方向为低轨卫星通导一体化、无人机通信、无线资源分配。



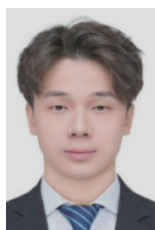
赵亚飞（1987—），男，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室副研究员，主要研究方向为低轨卫星通导一体化。



彭木根（1978—），男，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室教授，主要研究方向为空间信息通信、通感算一体化、无线接入网络等。



赵祥天（1992—），男，博士，北京邮电大学网络与交换技术国家重点实验室博士后，主要研究方向为空间非合作目标协同感知、低轨卫星通导一体化等。



封慧琪（2001—），男，北京邮电大学信息与通信工程学院本科生。