



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486,CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

题目：天基电磁环境感知星座关键技术与发展演进
作者：郭兰图，姚孟辰，牟伟清，林云，杨凯，张明高
收稿日期：2025-07-15
网络首发日期：2026-01-15
引用格式：郭兰图，姚孟辰，牟伟清，林云，杨凯，张明高. 天基电磁环境感知星座关键技术与发展演进[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.t.20260115.1016.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25070030

天基电磁环境感知星座关键技术与发展演进

郭兰图^{1,2}, 姚孟辰^{2*}, 牟伟清¹, 林云², 杨凯³, 张明高¹

(1. 中国电波传播研究所, 山东 青岛 266107; 2. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 3. 北京理工大学 信息与电子工程学院, 北京 100081)

摘要: 电磁环境是电波传播的核心媒介, 深刻影响着全球通信、导航、安全等信息基础设施体系运行效能。研究聚焦商业航天电磁环境感知星座, 归纳总结了电磁环境感知星座经历的军事电磁侦察主导时期、全球协作竞争时期、商业与国家主导时期三大发展历程及其代表性星座、功能特点; 按照电波传播环境感知、宽带射频信号感知、典型业务信号感知与多模态综合感知等四大类, 分析了当前在轨星座的功能特点、核心能力、关键技术及应用场景; 指出了商业天基电磁环境感知向天地基融合、多星组网联合、多模态综合以及人工智能实时结合的发展趋势。

关键词: 电磁环境; 商业航天; 电磁环境感知星座; 低轨道地球卫星; 鹰眼 360

中图分类号: V11 **文献标志码:** A

Key technologies and evolutionary development of space-based constellations for electromagnetic environment sensing

GUO Lantu^{1,2}, YAO Mengchen^{2*}, MU Weiqing¹, LIN Yun², YANG Kai³, ZHANG Minggao¹

(1. China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107, China ;

2. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China ;

3. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The electromagnetic environment serves as the fundamental medium for radio wave propagation and profoundly influences the operational efficiency of global information infrastructure systems, including communications, navigation, and security. The research focused on electromagnetic environment sensing constellations developed within the commercial spaceflight sector and summarized the evolutionary development of electromagnetic environment sensing constellations through three major phases: the military electromagnetic reconnaissance-dominated era, the stage of global collaborative competition, and the phase of commercial and national co-leadership. Representative constellations and their functional characteristics were outlined for each phase. Current in-orbit constellations were categorized into four primary types—propagation environment sensing, broadband RF signal sensing, typical operational signal sensing, and multimodal integrated sensing—and their functional characteristics, core capabilities, key technologies, and application scenarios are analyzed. Ongoing development trends are identified in commercial space-based electromagnetic environment sensing toward space-ground system integration, multi-satellite network collaboration, multimodal fusion, and real-time artificial intelligence integration.

Keywords: electromagnetic environment; commercial spaceflight; electromagnetic environment sensing constellations; low earth orbit satellite; HawkEye 360

收稿日期: 2025-07-15

基金项目: 中国电波传播研究所稳定支持科研经费资助项目 (No.A132305210); 国防科技创新特区资助项目 (23-CXZX-QD-01-02)

第一作者: 郭兰图 (1982—), 男, 山东济宁人, 博士, 正高级工程师, 博士生导师, E-mail: guolantu@163.com

***通信作者:** 姚孟辰 (1999—), 男, 山东潍坊人, 博士研究生, E-mail: ymc@hrbeu.edu.cn

引用格式: 郭兰图, 姚孟辰, 牟伟清, 等. 天基电磁环境感知星座关键技术与发展演进[J]. 国防科技大学学报,

Citation: GUO L T, YAO M C, MU W Q, et al. Key technologies and evolutionary development of space-based constellations for electromagnetic environment sensing[J]. Journal of National University of Defense Technology,

电磁环境既是各类电磁辐射结果的集合，又包括影响电波传播的各类介质环境。感知电磁环境不仅可以掌握电波传播介质特性，也可以反推电磁活动情况。因此，天基感知方式凭借广域覆盖的突出优势，成为了科学研究、环境监测、行政监管、干扰定位、情报侦察的重要手段。

电磁环境感知星座按照运营主体与任务需求，可分为军用星座、民用星座，以及近年来迅速崛起的商业星座。传统民用航天项目通常以长期科研和国家战略目标为导向，强调技术稳定性和系统长期运行；商业航天则依靠市场驱动，以快速迭代、小型化、批量生产和低成本组网为核心特

点，显著增强了对市场需求的快速响应能力，可实现电磁环境全球实时观测，是军、民用星座在数量与时空分辨率上的重要补充。

天基电磁环境感知星座可按照感知对象、组网方式、数据处理模式、感知方式等进行区分。如图 1 所示，星座感知对象可分为电波传播环境感知星座、宽带射频信号感知星座、典型业务信号感知星座等；按照星座组网方式可分为单星感知、多星组网感知；按照星座数据处理模式可分为单星独立处理、星间协同处理和星地协同处理；按照感知方式可分为直接测量、反演计算。

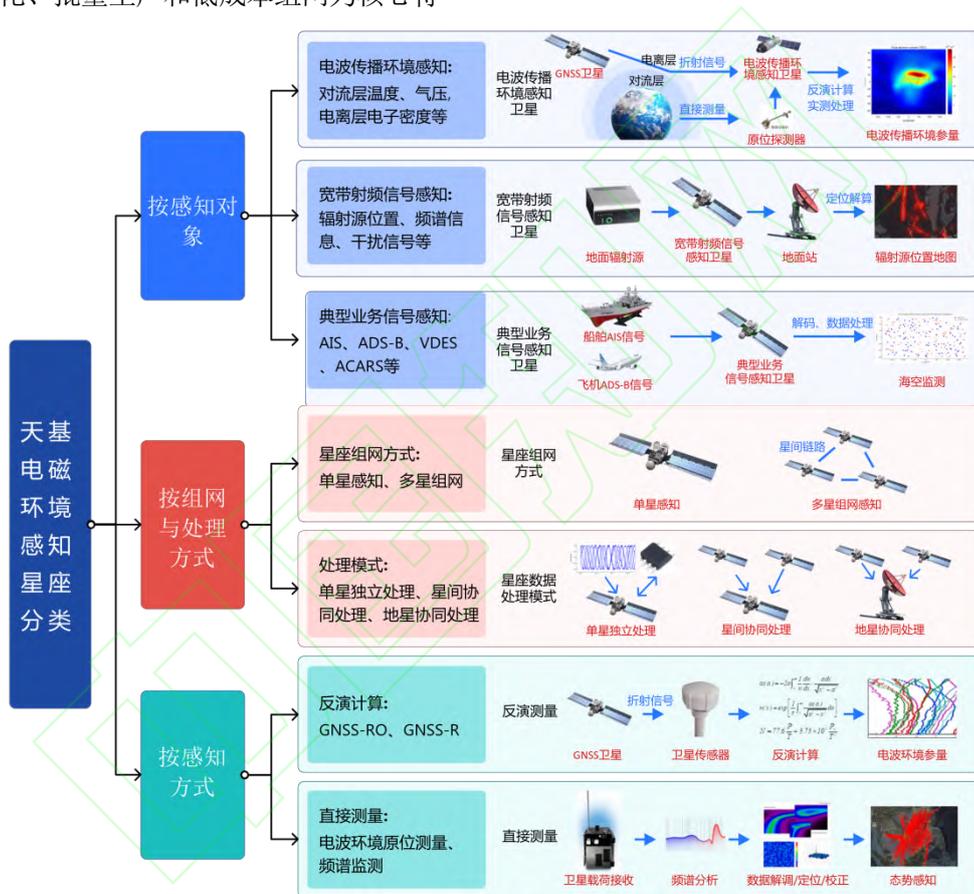


图 1 天基电磁环境感知星座分类

Fig.1 Classification of space-based electromagnetic environment sensing constellations

1 电磁环境感知星座演进回顾

天基电磁环境感知星座的演进历程受国际政治格局、科技发展与市场需求等多重因素影响，呈现出鲜明的阶段性特征。可将电磁环境感知星

座发展历程清晰地划分为三个关键阶段：冷战背景下的军事电磁侦察主导时期、全球化浪潮推动的全球协作竞争时期以及航天技术快速发展下的商业与国家协同主导发展时期，如图 2 所示。

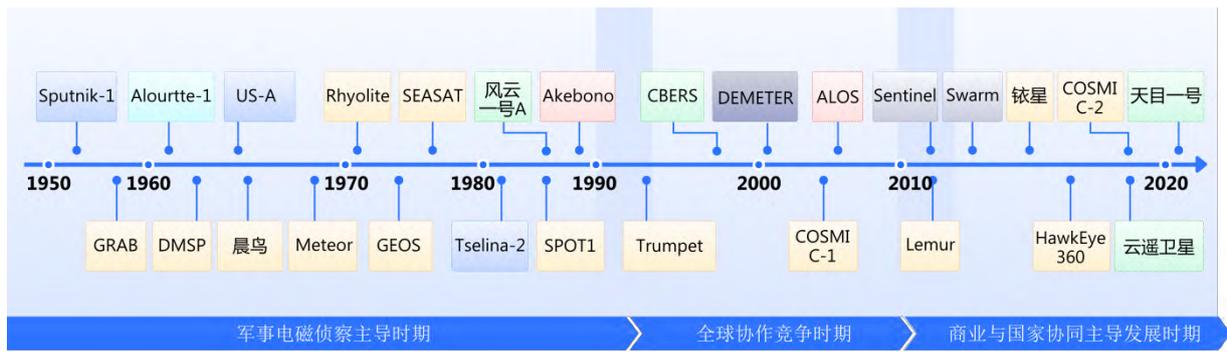


图2 天基电磁环境感知星座演进历程及代表星座

Fig.2 Evolutionary history of space-based electromagnetic environment sensing constellations and representative constellations

1.1 军事电磁侦察主导时期（1990s 之前）

冷战期间，天基电磁环境感知卫星的发展主要受军事需求推动，美国与苏联在该领域占据主导地位：美国在1960年率先发射世界上首颗用于电子侦察的“银河辐射与背景”（galactic radiation and background, GRAB）卫星，可以从轨道实时截获苏联雷达信号，验证了天基电子侦察可行性；而后为扩大侦察范围，美国构建了“雪貂”（Ferret）系列卫星^[1]和位于地球同步轨道的“流纹岩”（Rhyolite）卫星^[2]，通过大口径天线实现对苏联远程通信的持续监听，侦察范围较以往得到显著提升。在20世纪90年代，美国推出的“小号”（Trumpet）系列卫星^[3]带有宽带相控阵窃听天线，可同时监听上千个地面信号源。与此同时，苏联也加速推进天基侦察技术，先后部署了“处女地”（Tselina）系列卫星，用于截获和分析雷达等电磁辐射信号。此后，苏联在60年代发射全球首批专门用于海上军事监视的雷达侦察卫星“传奇”（radar ocean reconnaissance satellite, RORSAT）卫星，该星由核反应堆供能，为天基监视提供了可靠的全天候侦察能力，该系列累计发射超过30颗卫星。20世纪90年代，俄罗斯开始研制新型“藤蔓”（Liana）海洋监视卫星系统以替代“传奇”系列，包括面向地面的“莲花”（Lotos）卫星和面向海洋的“芍药”（Pion）卫星，具备全天候监视能力，服务于核威慑与战略预警。俄罗斯还发展了电子型海洋监视卫星（electronic ocean reconnaissance satellite, EORSAT）系列，通过被动监测舰载雷达信号侦察大型舰船及编队活动，为海上目标指示与反舰打击提供情报支持。

尽管早期天基卫星平台主要以电子侦察与战略预警为主要任务，但随着作战与侦察系统对电磁环境与空间天气依赖度的提升，美苏双方逐渐

认识到大气状态对信号传播与系统可靠性的关键影响，相继加快了气象与环境监测卫星的研制与部署。1960年，美国成功发射全球首颗气象卫星“泰罗斯”（Television infrared observation satellite, TIROS）号后，美国国防气象卫星计划（defense meteorological satellite program, DMSP）开始陆续发射卫星并投入应用^{[4][5]}，通过星上附加的电离层传感器，监测热离子和电子不规则性、极光电子通量、伽马和X射线源的位置及能量谱，测量地球辐射和磁场方向。1975年，美国成功发射首颗地球静止轨道气象卫星（geostationary operational environmental satellite, GOES），构建起地球同步气象监测体系^[6]。此后，GOES系列不断迭代，从GOES-A到GOES-S的多代卫星在探测精度和环境监测能力上得到持续提升。在这一时期，苏联也开展了相应的气象卫星项目，“流星”（Meteor）系列卫星开展云、冰雪、海面与辐射等气象与环境要素观测^[7]，星上装备了多光谱和热红外探测设备，可进行较大范围资源环境探测。此外，苏联构建了RESURS地球资源监测卫星体系^[8]，主要服务于环境监测与资源勘探。

1.2 全球协作竞争时期（1990s-2010s）

冷战结束后，随着全球化趋势的加速，天基电磁环境感知星座也呈现出能力全球化、参与国家/地区多样化、技术合作多元化的特点。

首先，星座观测实时化与持续覆盖能力显著提升。例如，美军天基广域监视系统（space-based wide area surveillance system, SB-WASS）作为其第四代低轨电子侦察卫星系统，用于满足空军战略防空和海军海洋监视需求，显著增强了对战区电磁活动的持续覆盖能力。由欧盟委员会和欧洲航天局发起的“哥白尼计划”（copernicus programme）^[9]，前身为“全球环境与安全监测”

(global monitoring for environment and security, GMES), 是一项多国参与的地球观测计划, 通过“哨兵”(Sentinel)系列卫星构建全球化业务观测体系。其中, Sentinel-1 具备全天候昼夜成像能力, Sentinel-2/3 等提供光学、红外及微波观测, 为电磁环境和气象环境监测提供高时空分辨率的数据。

其次, 多个国家加速推进自主天基电磁环境感知星座建设。由美苏主导的垄断格局逐步演进为全球多极协同建设的新阶段。由法国研制并发射的 DEMETER 探测卫星^{[10][11]}通过探测极低频到高频的电磁波信号, 以及电离层中的电子密度、离子成分等参数, 研究电离层与地震、火山活动等地球内部活动相关的电磁现象。1988年9月7日, 中国自行研制的第一颗极轨气象卫星风云一号 A 星 (Feng Yun 1A, FY-1A)^[12]发射成功, 卫星能够提供包括云图、大气温湿度、地表和海面状态等关键气象参数, 有效提高了气象灾害监测预警能力, 随后, 中国相继发展形成“风云”系列业务化气象卫星 (如 FY-2、FY-3、FY-4 等), 持续支撑数值天气预报、灾害监测与气候研究。2006 年日本发射先进陆地观测卫星 (advanced land observing satellite, ALOS)^[13], 用于地面区域覆盖观测、灾难监测和资源勘查。同年, 德国启动“放大镜”计划 (SAR-Lupe), 成功发射首颗合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 卫星, 至 2008 年完成全部 5 颗卫星部署。

再次, 各国和地区在相关技术领域的合作持续深化。美国与中国台湾地区协作完成 COSMIC(constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate)星座, 该星座利用全球定位系统 (Global Positioning System, GPS), 依托 GPS 掩星手段反演大气特性, 极大提高了气象观测精度。欧洲空间局 (European space agency, ESA) 部署的 Swarm 卫星^{[14][15]}借由三星编队联合观测, 系统绘制地球磁场分布, 推动了极区导航与空间物理研究。1999 年 10 月 14 日, 中国与巴西联合研制的中巴地球资源卫星成功发射, 成为中国首颗传输型遥感卫星。

1.3 商业与国家主导协同发展时期 (2010s 至今)

随着应用场景不断拓展, 以及信息技术和航天技术的持续进步, 商业天基电磁环境感知星座开始出现并迅速发展, 推动了服务模式革新与技术创新。

在美国, HawkEye 360 基于时频差定位技术

实现全球射频 (radio frequency, RF) 信号测绘, 精准打击非法海事活动; Spire 公司以百颗微纳卫星融合气象、航运与航空数据, 构建实时服务网络。在欧洲, 法国 Unseenlabs 公司部署的 BRO 系列卫星通过单星无协同射频测向技术, 实现在船舶自动识别系统 (automatic identification system, AIS) 信号盲区对海上目标进行精确定位, 广泛应用于非法捕捞与走私监控。卢森堡 Kleos Space 构建四星编队星座, 提供低轨多点同步采样能力, 测量目标的经纬度、频率等数据, 服务于全球海事情报与电子侦察。

与此同时, 中国的商业航天力量也在同步快速崛起, 天目一号星座和云遥气象星座以天基 GNSS 掩星与 GNSS-R 测量反演技术为核心, 服务于气象遥感与大气、电离层等电磁环境探测领域, 证明了商业航天电磁环境感知星座的市场价值, 极大地拓展了感知数据的应用场景。

由于星座技术逐步普及, 卫星智能化已成为星座发展的核心趋势。欧洲航天局的 OPS-SAT 卫星搭载了 Mission Control 公司开发的 Spacefarer AI 人工智能平台, 成功将神经网络模型部署至现场可编程门阵列 (field-programmable gate array, FPGA), 在卫星轨道上实现 AI 模型的在轨加载与运行, 首次验证了在卫星端 FPGA 部署深度学习算法的可行性, 可用于图像分类, 尤其是识别云层, 展示了卫星在轨智能操作的广泛应用前景; NASA 喷气推进实验室在英国 Open Cosmos 公司运营的小型卫星上部署了机器学习处理器, 首次在卫星上利用 AI 技术实现“动态目标捕捉” (Dynamic Targeting), 可自主决定何时何地拍摄对地遥感图像; 欧空局的 Φ -sat-2 卫星通过搭载多个基于 AI 的星上实时处理算法软件, 实现云层检测、船舰识别、目标分类、图像压缩等多种操作, 直接将原始影像转化为可用产品, 显著节省下行带宽, 同时提升了地面变化检测与异常事件预警的实时性。

在这一时期, 国家主导的科学探测项目则持续聚焦于长期科研目标和公共安全需求。中国于 2018 年发射张衡一号卫星, 是中国首颗专注于电磁监测的科学实验卫星^[16]; 俄罗斯通过“北极-M”卫星^[17]强化极区气候与电离层扰动追踪, 服务北极航道安全, 并于 2024 年发射 Ionosfera-M 系列电离层探测卫星, 借助电离探针等装置获取高精度电子密度剖面和环境扰动数据, 支持空间天气预报与导航通信保障; 日本的 Arase 卫星测量了电场分量和等离子体波动^[18], 研究了地球辐射带

中的能量变化；中国的风云四号卫星则集成空间天气监测载荷^[19]，实时对地球大气监测，保障航天器的在轨安全。上述项目与商业航天共同推动了天基电磁环境感知领域的多元化与高动态发展。

2. 典型星座与关键技术

商业航天的深度参与加速了天基电磁环境感知技术的发展，催生出多样化的感知体系。如图3所示，当前商业电磁环境感知星座可分为四大类：电波传播环境感知星座、宽带射频信号感知星座、典型业务信号感知星座和综合感知星座。每类星座针对特定感知对象：电波传播环境感知星座主要面向对流层和电离层等电波传播介质，用于刻画空间天气和传播条件；宽带射频信号感

知星座聚焦宽频射频信号的时频特性和辐射源定位；典型业务信号感知星座以船舶自动识别系统、自动相关监视广播（automatic dependent surveillance-broadcast, ADS-B）和甚高频数据交换系统（VHF data exchange system, VDES）等具有标准协议的通信导航信号为目标，通过信号解调提取目标身份、位置、速度等语义信息，用于海空目标识别与动态监视；综合感知星座则集成多模传感器，对电波传播环境、宽带射频信号和典型业务信号进行综合感知，实现多维度、多类型的电磁环境综合监测。在对流层与电离层GNSS掩星反演、多星时频差定位、星载多模态综合感知和信号解碰撞处理等关键技术相继取得突破的带动下，天基电磁环境感知技术呈现出路线多元化、应用场景广覆盖的发展态势。



图3 商业电磁环境感知星座发展研究

Fig.3 Research on the development of commercial electromagnetic environment sensing constellations

2.1 典型电磁环境感知星座

目前，得益于低轨卫星在全球覆盖、重访周期、信号衰减与发射成本控制方面的综合优势，

电磁环境感知星座主要部署在低地球轨道（low earth orbit, LEO）。表1列举了当前国际上具有代表性的电磁环境感知星座。

表1 主要电磁环境感知星座

Tab.1 The main electromagnetic space environment sensing constellations

星座	所属国家/地区	首发时间	卫星数量	轨道类型	关键技术/载荷	应用场景
COSMIC-1/2	美国、中国台湾	2006年	12颗	LEO	天基对流层掩星反演技术、天基电离层掩	数值天气预报改进、气候变化监测、空间天气

地区			星反演技术		预报
云遥气象星座	中国	2019年	46颗	LEO	天基对流层掩星反演技术、天基电离层掩星反演技术、全球导航卫星系统反射测量技术 台风和极端天气监测、气候研究
天目一号	中国	2022年	23颗	LEO	天基对流层掩星反演技术、天基电离层掩星反演技术、全球导航卫星系统反射测量技术 台风监测、海冰监控、土壤湿度分析、气象灾害预警
张衡一号	中国	2018年	2颗	LEO	天基电离层掩星反演技术、高精度磁强计 地震前兆监测与预警、空间环境监测
HawkEye 360	美国	2018年	35颗（截至2024年）	LEO	多星时频差定位技术、天基盲相干累计定位技术 海上非法活动监测、频谱管理、海事域态势感知
Unseenlabs	法国	2019年	15颗（截至2024年）	LEO	单星测向定位技术 海事安全、国防监视和电磁环境评估
Kleos Space	卢森堡	2020年	16颗（截至2023年）	LEO	时差定位技术、频差定位技术 军事情报、海事安保和非法行为识别
ORBCOMM	美国	1991年	61颗（截至2025年）	LEO	天基 AIS 信号感知技术、星载信号解碰撞处理技术 船舶 AIS 监测，海事管理、非法捕捞监测以及海上应急响应
Iridium NEXT	美国	2017年	81颗	LEO	天基 AIS 信号感知技术、天基 ADS-B 信号感知技术 飞机追踪、航班管理以及搜救支持
和德卫星	中国	2017年	13颗（截至2023年）	LEO	VDES 业务组网技术 海事通信、物联网信息采集
天拓卫星	中国	2012年	5颗	LEO	天基 AIS 信号感知技术、天基 ADS-B 信号感知技术 船舶/飞机识别
北航空事卫星一号	中国	2020年	1颗	LEO	多通道高灵敏度接收技术、解交织技术 飞行安全保障、辅助空管系统
Lemur	美国	2015年	超过 170 颗	LEO	星间链路技术、星载多模态综合感知技术、AIS/ADS-B/GNSS 信号接收载荷 海事域态势感知、航空流量监测、天气预报改进

2.1.1 电波传播环境感知星座

电波传播环境感知星座的核心目的是测量电波传播介质环境特性，主要关注对流层（温度、湿度、气压、水汽）和电离层（电子密度、总电子含量、闪烁指数）等环境参量。

(1) COSMIC

COSMIC^[20]是基于 GPS 掩星技术的全球气象和电离层监测星座，也是全球首个投入业务化运行的掩星星座项目^{[21][22]}，COSMIC 通过高精度对流层和电离层探测，反演温度、湿度、气压、电子密度等关键参数，实现对大气的高精度、全天候观测^[23]。其中，COSMIC-2 星座采用高增益多模 GNSS 导航信号接收与增强技术，接收 GPS、

Galileo 等多导航系统信号,采用高增益波束赋形天线与 TGRS(Tri-GNSS Radio-occultation System) 载荷架构^[24],并部署于低倾角轨道^[25]。该星座依赖 GNSS 掩星技术,通过导航信号在大气传播时的折射、衰减等特性反演环境参数,同时采用多颗卫星组网提高覆盖率和数据精度。应用场景包含全球气象预报、台风路径预测、极端天气监测、气候变化研究以及电离层扰动分析等。其中, COSMIC-1 每天提供超过 1 500 次掩星事件, COSMIC-2 星座每天可提供超过 4000 次掩星事件,显著提高了全球天气预报的准确性,并助力航天通信、导航定位等领域发展。

(2) 云遥气象星座

云遥气象星座由天津云遥宇航科技有限公司研制并运营,星座对全球大气和空间环境进行监测,提供大气层的温度、湿度、水汽含量、电子密度等关键参数。其技术体系基于搭载具备海量信息采集能力的掩星探测载荷,依托多波束相控阵天线技术,能够同时接收 GNSS 临边信号和多 GNSS 信号的前向散射回波。星座的 GNSS 掩星数据产品可用于数值天气预报、降雨监测和对流层探测; GNSS-R 反射数据可反演海面风速、土壤湿度等环境参数,助力海洋监测和农业气象预报领域。目前,云遥一号系列卫星每日能够向中国气象局提供约 1.5 万条掩星廓线产品。

(3) 天目一号星座

天目一号星座是我国首个以商业化模式建设的低轨气象卫星系统^[26],由航天天目(重庆)卫星科技有限公司运营。其功能体系以“GNSS-R、大气掩星、电离层掩星”一体化探测为核心,实时获取全球大气温湿度、电离层电子密度等高精度参数。依托多星组网、GNSS 反演技术及北斗/GPS 等多导航系统兼容设计,每日向中国气象局提供约 3 万条掩星廓线产品,使我国数值预报系统同化数据量提升 2.48 倍。应用场景包括:气象监测与灾害预警、智慧农业精准灌溉以及风电光伏场选址等。

(4) 张衡一号

张衡一号卫星(China Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES)是我国首颗专注于电磁监测的科学实验卫星,也是首个在同一平台上实现电场、磁场、等离子体及高能粒子等多种探测载荷集成的卫星。张衡一号 01 星(CSES-01)卫星轨道高

度约 500 km,在轨道倾角 97°的圆极化轨道运行,观测范围包括南北纬 65°以内。其载荷系统搭载了高精度磁强计、感应式磁力仪、电场探测仪、等离子体分析仪和朗缪尔探针等多种先进探测设备。张衡一号 02 星(CSES-02)于 2025 年 6 月 14 日发射升空,搭载了包括高能粒子探测器(HEPD-02)和电场探测仪(EFD-02)在内的 11 种科学仪器,进一步增强了对电磁场、等离子体参数和高能粒子的监测能力。张衡一号主要应用于地震监测、空间环境监测和地球物理研究等领域^[27],可提供地震前兆信息,支持地震预报^[28],助力空间天气预警,为空间天气监测与自然灾害预警提供高精度数据支持。

2.1.2 宽带射频信号感知星座

宽带射频信号感知星座核心目的是利用宽频谱测量载荷对电磁频谱进行频谱扫描、信号检测、特征提取等操作,主要获取信号的时空分布、时频特性、功率特性等信息。

(1) HawkEye 360

HawkEye 360 星座由美国 HawkEye 360 公司运营,是全球首个商业化无线电信号测绘星座,星座每日最高过境次数为 24 次,重访时间最快可达 60 分钟。星座搭载多频段天线侦收海上船只发射的不同体制无线电信号,对地面射频信号源进行精确定位。同时更新扩充全球电子目标信息数据库,构建全球无线频谱地图,用于分析关注船只航迹以及重点区域的舰船活动情况^[29]。采用三星编队组网架构,基于到达时差(time difference of arrival, TDOA)和到达频差(frequency difference of arrival, FDOA),结合盲相干累积的方式,实现对射频辐射源的高精度定位。卫星可覆盖从 70 MHz 至 18 GHz 的射频频段,配备强大的板载计算能力^[30],支持高精度的射频数据分析能力。在应用方面,推出了三款核心产品:RFGeo 提供全球目标射频信号定位数据,满足特定时空射频辐射源的精确定位需求;RFIQ 侧重于天基频谱数据深度分析和可视化;SEAKer 结合船舶 AIS 数据与射频信号数据,实现全球海上态势精确感知。HawkEye 360 系统可广泛应用于海事监管、通信保障与应急响应等领域^[31],形成覆盖全球的射频信号监测体系,为安全防务、通信监管和应急救援等提供重要支撑。

(2) Unseenlabs 系列

Unseenlabs 系列卫星由法国 Unseenlabs 公司运营, 专注于海上电磁环境感知, 为海上交通监视提供频谱监测和电磁情报服务, 构建了全球领先的单星无协同射频测向星座。卫星搭载的星载射频载荷可在 X 频段与 S 频段范围内探测无线电信号, 具备全天候、全球覆盖能力, 可在无 AIS 信号或船舶关闭 AIS/VMS 装置的情况下, 精准捕获“暗船”无线电辐射信号, 并与 AIS 数据进行匹配分析, 实测结果表明, 其射频数据与 AIS 数据在重叠海域的船舶识别匹配率可达 80.2%~98.7%, 平均为 89.3%。在技术体系上, Unseenlabs 系列卫星面向非合作射频辐射源, 频谱覆盖包含甚高频 (very high frequency, VHF) 等多类海事射频辐射, 采用无须多星协同的单星测向技术, 不同于依赖多颗卫星的 TDOA/FDOA 方法, 其卫星可单独测定无线电信号发射源方位, 可在 AIS 盲区跟踪船舶。有效降低了星座规模与部署成本, 定位精度在千米级别, 广泛服务于海事安全、国防监视和电磁环境评估领域, 能够在无 AIS 信号的海域精准跟踪船只, 辅助打击非法捕鱼、海盗活动和海上走私。

(3) Kleos Space

Kleos Space 星座由卢森堡的 Kleos 公司运营, 专注于全球无线电信号情报和信号定位数据服务, 重点监测海事通信频率和 X 频段。Kleos 的定位数据可为地球观测及情报、监视与侦察系统提供“提示与线索”, 同时首次将全球地理位置信息开放给商业用户^[32], 使用户可生成多维度的集成观测信息, 为政府、商业等用户提供决策建议。星座采用四星编队定位技术对地面射频辐射源开展定位, 并提供三项数据服务: Guardian RF 针对 155~165 MHz 频段, 可在 50 kHz~10 MHz 的带宽范围内高速采集原始同相与正交 (in-phase and quadrature, I/Q) 数据 (最高 10 MSps), 同时记录时间戳; Guardian LOCAT 与 Guardian UDT 则侧重事件解析, 可直接输出辐射源的经纬度、发生时刻、持续时长及工作频率等信息, 对位置的估计误差从 320 m 到 32 km 不等。这些服务显著增强了全球电磁环境监测能力, 为军事情报、海事安保和非法行为识别提供关键数据支撑。

2.1.3 典型业务信号感知星座

典型业务信号感知星座的核心目的是接收、解调、译码目标信号实现目标身份信息的识别。星座的目标对象是具有明确协议和格式的业务信

号, 如 AIS、ADS-B、VDES 信号等。区别于宽带射频信号感知方式, 此类信号感知通常采用合作广播的方式, 基于信号的公开协议进行解码, 提取包含目标身份、位置、状态等语义信息。

(1) ORBCOMM

ORBCOMM 星座由美国 ORBCOMM 公司运营, 能够实现对全球 AIS 信号的全天候收集和定位, 是美国三大低轨移动星座卫星系统之一, 同时也是全球第一个双向短数据低轨小卫星通信系统^[33]。公司推出的“三模” Class B 船舶跟踪方案 (Hali), 包含一款具防篡改能力的 AIS 终端, 能够可靠地回传船舶的实时坐标、航行速度及航向等动态数据, 并集成了 SOS 遇险报警功能。技术体系上, 星座搭载高灵敏度的软件定义无线电用来提升信号接收能力、抗干扰性; 同时, 构建了地基与星载 AIS 数据的协同解析平台, 实现多源数据融合, 从而有效增强定位精度与航迹重构能力。ORBCOMM 为海事管理、非法捕捞监测以及海上应急响应提供关键支持。

(2) Iridium NEXT

Iridium NEXT 是由美国铱星公司运营的第二代低轨卫星星座, 主要用于提供全球移动通信与实时监测服务。该星座共部署 81 颗卫星, 其中 75 颗在轨运行, 单颗卫星重量约 850 kg。星座搭载 Aireon 公司的 ADS-B 载荷和 ExactEarth Ltd 公司的 AIS 载荷, 用于接收全球航空和海事业务信号; 同时 Iridium NEXT 卫星搭载可再生处理式通信载荷, 采用时分双工体制, 其用户链路采用 L 波段, 单星覆盖区域直径约 4500 km; 通过两副 Ka 频段馈电链路天线, 形成两个 20/30 GHz 可移动波束连接至地面信关站。每星可以配置 4 条 Ka 波段星间链路, 实现低时延、高可靠的全球覆盖。典型应用包括全球航空监视、海事监测与航运管理、应急通信保障以及物联网与远程资产监控。

(3) 和德系列

和德系列卫星由北京和德宇航技术有限公司主导开发, 其中“和德一号”是中国首颗 AIS 商用海事卫星, 实现了日均解码来自 6 万艘船舶的 200 万条信息。和德系列是全球首个开展 VDES 业务组网试验的星座, 可向交通运输部等用户提供包括 VDES 数据在内的低轨窄带卫星数据通信服务。VDES 系统在 AIS 原有功能的基础上加入了两个子系统: 甚高频数据交换 (VHF data exchange,

VDE) 和特殊应用报文 (Application Specific Messages, ASM), 子系统共同配合提高了海事通信的数据传输能力和信息广播能力, 增扩了气象导航等专用信息通道。通过上述功能, 星座不仅能够显著提升海事通信的数据传输与信息广播能力, 还可为气象导航、窄带物联网通信以及全球船舶位置监控等提供持续、稳定的服务。

(4) 天拓系列

国防科技大学自主设计并研制的天拓系列微纳卫星, 已在不同代次平台上搭载 AIS、ADS-B 及 VDES 等多种业务信号接收载荷, 并完成在轨试验与验证^[34]。其中, 天拓一号是世界首颗单板纳星, 同时也是国内首次成功完成星载 AIS 系统侦收试验的卫星; 天拓三号首次构建“纳-皮-飞”三级六星体系结构, 采用“母鸡带小鸡”的形式实现 6 颗集群卫星的智能自组网, 能通过 6 颗卫星中的任意一颗接收地面指令, 指挥其他卫星协同工作, 从而实现星座的高效响应与任务协同; 天拓五号卫星集成了船舶自动识别系统 (AIS)、广播式自动相关监视系统 (ADS-B) 和数据搜集系统 (data collection system, DCS) 三种天基物联网 (space-based internet of things, SIoT) 试验载荷^[35]。其中, 天拓三号完成了国内首例 ADS-B 信号在轨接收试验^[36], 接收灵敏度约 -93 dBm, 日均接收 ADS-B 报文约 40 万条, 覆盖半径超过 2 000 km, 验证了多层板式微纳卫星平台在全球海空动态目标测量、多维信息融合处理等关键技术上的可行性与可靠性。天拓卫星能够实现全球海空目标的准实时监测与轨迹重构, 支持船舶/航空态势感知、海上应急救援指挥、港口与航班管理、物联网终端互联以及气象与环境监测等应用。

(5) 北航空事卫星一号

“北航空事卫星一号”试验卫星由北京航空航天大学联合国家空管实验室研制, 通过星载 ADS-B 载荷实现空中交通目标的实时动态监视, 具备在全球范围内对运输与通用航空器进行监视与跟踪的能力。其技术体系基于多波束相控阵天线, 可在不同方向实现大范围的快速扫描; 采用多通道高灵敏度接收技术对多路射频信号进行并行采样和自适应滤波, 显著提高了弱信号检测能力; 该系统采用解交织技术在高密度空中交通环境下进行信号处理, 实现对互相交叠信号的有效分离与精确重构, 为星基动态监视提供了可靠支

撑, 同时具有国内首个面向空管运行需求的星载 ADS-B 载荷, 检测覆盖半径达 1710 km, 检测概率大于 35%, 识别概率大于 68%^[37]。在轨运行期间, 在半径 800 km 的覆盖范围内, 95% 的位置消息更新间隔低于 8 秒。此外, 卫星的最远探测距离可达 2000 km。在空域测试中, 其载荷平均每小时接收 ADS-B 消息超 100 万条, 报文更新率满足空管运行需求。为填补海洋、高纬及偏远地区监视盲区、提高空管运行效率、提升飞行安全及应急搜救提供关键支持。

2.1.4 电磁环境综合感知星座

电磁环境综合感知星座的核心特点是在同一平台或紧密协同的平台上, 集成多种不同类型的传感器, 实现对电磁环境多维度、多角度的联合感知。其感知对象既可能包括电波传播环境、特定信号, 也可能包括宽带射频信号。

(1) Lemur

Spire 公司的 Lemur (low earth multi-use receiver) 星座是全球最大的多功能微纳卫星星座, 每颗卫星体积约 10 cm×10 cm×34.5 cm, 质量不足 6 kg, 部署于 400~650 km 的低地球轨道。该星座通过多源传感载荷实现高精度的全球态势感知: 星座搭载 AIS 载荷、ADS-B 载荷和 GNSS 无线电掩星探测载荷^[38]。其中双频 GNSS 掩星载荷用于接收 GPS、Galileo、GLONASS、北斗和 QZSS 系统的掩星信号, 实现温度、气压与湿度廓线剖面及空间天气监测; 星座上的 SENSE AIS 载荷可接收并处理包括 Class A 和 Class B 在内的 AIS 信号数据。具体场景应用包括全球航运监管、空域管理、极端天气预警、气候研究和环境监测, 每天能够生成超过 1 万条掩星大气剖面数据, 并提供全球范围内的 AIS 和 ADS-B 数据服务。

2.2 电磁环境感知星座关键技术

2.2.1 天基对流层掩星反演技术

无线电掩星探测大气的理论于 20 世纪 60 年代提出^[39], 是商业电磁环境感知星座 (如 COSMIC、云遥气象星座、天目一号) 获取全球大气参数的核心手段, 利用低轨掩星接收机记录 GNSS 信号穿越大气时产生的相位延迟和多普勒附加频移, 通过几何光学和积分反演方法, 获取大气折射率剖面, 并结合物理方程反演出温度、压强和水汽等关键气象参数。掩星探测中的几何

关系如图 4 所示, α 表示弯曲角, r 表示弯曲路径最低点到地心的距离, a 表示碰撞参数, 是射线延长线与地球球心之间的最短距离:

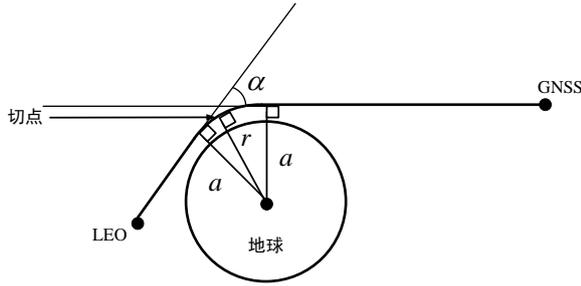


图 4 掩星观测的几何关系

Fig.4 The geometric relationship of occultation observation

在中性大气掩星信号反演过程中, 首先从 GNSS 卫星接收的相位延迟观测量中提取大气引起的附加多普勒频移, 根据 Snell 定律在球对称介质中有:

$$a = n(r)r \sin \theta \quad (1)$$

其中, θ 为射线的大气入射角, n 为折射指数。通过已知卫星与接收机的速度、位置及多普勒频移, 可以迭代求解每个时刻对应的碰撞参数 a , 进而构造该碰撞参数对应的弯曲角 $\alpha(a)$, 在球对称假设下, 弯曲角与折射率梯度之间满足 Abel 型正变换关系^[40]:

$$\alpha(a) = -2a \int_a^{\infty} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} \cdot \frac{adx}{\sqrt{x^2 - a^2}} \quad (2)$$

其中, x 为路径变量。利用 Abel 积分变换将上述弯角序列反演为折射指数剖面 $n(x)$, 公式如下:

$$n(x) = \exp \left[\frac{1}{\pi} \int_x^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \right] \quad (3)$$

基于局部球对称假设, 将不同高度上的弯角信息转换为折射指数分布。随后, 通过 $N = (n-1) \times 10^6$ 得到实际应用中的大气折射率 N , 其中 n 为折射指数。同时, 在中性大气中, 大气折射率是一个关于温度、气压、水汽含量的方程:

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{P_w}{T^2} \quad (4)$$

其中 P 表示干空气的气压, T 表示绝对温度, P_w 表示空气中水汽分压。最终, 借助大气静力平衡方程和理想气体状态方程, 可进一步反演出温度、压强等关键气象参数。

为优化观测与模型的统计融合, COSMIC 提出了一种变分大气反演方案, 基于一维变分框架 (1D-Var) 将 GPS 无线电掩星观测数据与数值天

气预报背景场进行最优融合。该方法通过最小化代价函数在统计意义上获得最可能的大气状态 (温度、湿度、压强), 公式如下:

$$J(x) = \frac{1}{2} (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + \frac{1}{2} (H(x) - y_o)^T R^{-1} (H(x) - y_o) \quad (5)$$

其中 x 为大气状态向量, x_b 为背景场, y_o 为掩星观测, H 为正演算子, B 和 R 分别为背景与观测误差协方差矩阵, 通过迭代最小化代价函数, 1D-Var 可在统计意义上平衡观测数据与物理模型的权重。作为当前较为成熟的全球大气参数反演手段之一, 天基对电离层掩星反演技术突破了地基观测覆盖不足的限制, 未来将逐步与地基高精度观测网络融合, 进一步提高环境反演的精细化程度与全球适用性。

2.2.2 天基电离层掩星反演技术

天基电离层掩星反演技术是利用低轨道卫星接收 GNSS 双频信号所产生的载波相位延迟, 用于获取全球电离层电子密度垂直分布、总电子含量 (Total Electron Content, TEC) 及闪烁指数等参量。其核心原理是: 利用 GNSS 信号穿越电离层时载波相位延迟差异, 计算出沿信号传播路径的总电子含量积分, 再结合 Abel 积分变换反演电子密度剖面; 同时, 通过分析信号幅度波动提取闪烁指数, 定量评估电离层扰动强度。

电离层掩星示意图如图 5 所示^[41], 其中

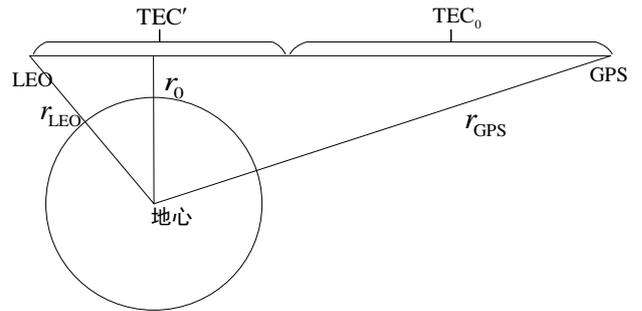


图 5 电离层掩星示意图

Fig.5 Schematic diagram of ionospheric occultation 掩星信号在穿越电离层时, 其 L_1 、 L_2 载波相位观测的斜向 TEC 可表达为:

$$TEC = \frac{1}{40.3} \frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \times (L_1 - L_2) + N\lambda + \varepsilon \quad (6)$$

f_1 、 f_2 为 GNSS 信号 L_1 、 L_2 的载波频率, L_1 、 L_2 为载波相位测量值, $N\lambda$ 为相位模糊项, ε 为测

量误差；根据 $TEC'(r_0) = TEC - TEC_0$ ，结合辅助观测数据消除 LEO 轨道以上的高层 TEC_0 后，经过校正得到 TEC' ，再通过 Abel 积分逆变换计算电子密度：

$$n_e(r_0) = -\frac{1}{\pi} \int_{r_0}^{r_{LEO}} \frac{dTEC'(r)/dr}{\sqrt{x^2 - r_0^2}} dr \quad (7)$$

除了电子密度和总电子含量外，闪烁指数也是电离层反演中的一个重要参量，用于表征电离层不规则性引起的信号强度或相位的快速起伏特性。常用的闪烁指数提取方法主要包括时域统计分析法、基于快速傅里叶变换（fast Fourier transform, FFT）的频域分析法等多种技术。

基于 FFT 的电离层闪烁指数提取方法通过将 GNSS 接收信号转换至频域，提取其功率谱的动态变化规律，进而推导信号强度变化的统计特征，从而评估电离层对信号造成的闪烁效应。假设接收机收到的信号包含了各 GNSS 卫星发出的信号以及热噪声：

$$y(kT_s) = \sum_{i \in \Omega} x_i(kT_s) + n(kT_s) \quad (8)$$

其中， $x_i(kT_s)$ 表示第 i 颗 GNSS 卫星信号在时刻 kT_s 的采样值， $n(kT_s)$ 为噪声。首先根据 $y(kT_s)$ 生成一段本地复制信号，与原始信号进行相干处理，并将其分成若干等长小段，对每段相关输出序列应用 FFT 以获得对应的功率谱值 $P(l)$ 。在一个较长时间窗内，与整个带宽内的平均功率比较，可计算幅度闪烁指数：

$$S_{4i} = \frac{\sqrt{\langle P_i^2 \rangle_T - \langle P_i \rangle_T^2}}{\langle P_i \rangle_T} \quad (9)$$

其中， $\langle \cdot \rangle_T$ 表示对时长 T 的平均值。相较于 COSMIC 所采用的基于固定时间窗的时域统计方法，基于 FFT 的闪烁指数提取方法能更灵敏地识别不同频率的闪烁成分并有效抑制噪声。风云系列卫星搭载的全球导航卫星掩星探测仪 (global navigation occultation sounder, GNOS) 采用了 FFT 频域分析方法来提取电离层闪烁指数，实现了对电离层扰动的高精度监测。

2.2.3 多星时频差定位技术

多星时频差定位技术是一种基于 TDOA 与 FDOA 联合测量的天基无源定位方法，用于确定辐射源的位置。该技术通过接收目标信号在不同卫星上的到达时间差以及频率差来建立非线性定位方程组。TDOA 能提供目标与多个观测点之间

的距离差约束，FDOA 提供与相对速度相关的补充约束^{[42][43]}，两者结合形成多维观测方程，既可有效发挥频差定位的广域动态特性优势，又可利用时差的高精度特性，适用于定位精度要求高、运动状态复杂以及信号特征模糊的场景。该方法已被 HawkEye 360、Kleos Space 等多星定位系统用于电子侦察与海事监控等场景。多星时频差定位原理如图 6 所示。

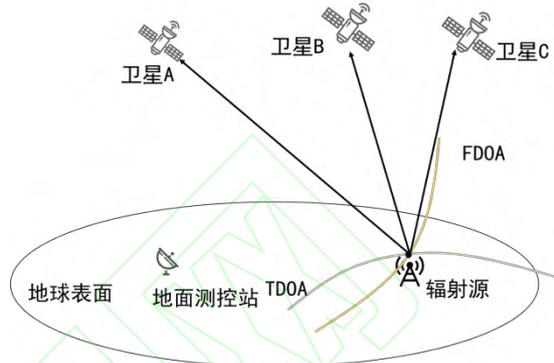


图 6 时频差联合定位示意图

Fig.6 TDOA and FDOA joint localization diagram

以三颗卫星为例，卫星 A、B、C 的位置坐标分别用向量 s_1, s_2, s_3 表示，速度向量分别为 v_1, v_2, v_3 ，目标辐射源位置向量用 p 表示，信号到达 A、B、C 的传播时间和频率分别为 $t_i = |s_i - p|/c, f_i = f_0(1 + v_i/c), i=1,2,3$ ，其中 c 为信号传播速度，TDOA 和 FDOA 即为 $t_{ij} = t_i - t_j, f_{ij} = f_i - f_j (i, j=1,2,3)$ 。该技术可通过至少两颗卫星进行时频差测量，结合辐射源位于地球表面的先验信息即可完成定位，为辐射源定位提供精准坐标，公式如下：

$$\begin{cases} \|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_e\| - \|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_e\| = c\Delta\tau_{k1} \\ \frac{(\mathbf{v}_k - \mathbf{v}_e) \cdot (\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_e)}{\|\mathbf{r}_k - \mathbf{r}_e\|} \\ - \frac{(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_e) \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_e)}{\|\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_e\|} = \lambda\Delta f_{k1} \end{cases} \quad (10)$$

, (k = 2, 3)

其中， \mathbf{r}_e 和 \mathbf{r}_k 分别表示辐射源和卫星的位置向量， \mathbf{v} 表示卫星的速度向量， c 是信号传播速度， $\Delta\tau_{k1}$ 和 Δf_{k1} 分别表示卫星接收信号的时间差和频率差。根据时差方程、频差方程和辐射源位于地球表面的信息建立定位方程，求解非线性方程即可得出辐射源的准确位置。

HawkEye 360 系统是该技术的典型应用实例。星座采用三颗卫星编队飞行^[44]，每颗卫星配备高

性能宽带软件定义无线电 (software-defined radio, SDR) 接收系统, 支持从 70 MHz 到 18 GHz 的宽频段监测。系统通过星间链路 (如 2.41 GHz) 共享 TDOA 与 FDOA 数据, 并在指定卫星上完成联合定位解算。早期卫星之间缺乏星间链路时, 无法实时交换测量数据, 需各自将信息回传地面处理中心, 限制了系统的时效性, 随着星间链路的发展, 卫星可通过微波或激光通道直接传输数据, 实现全天候、高速率、低时延的信息共享。未来, 该技术结合星间高速链路与智能化星上处理能力, 将实现更高精度、更低延时的全球辐射源实时监测与定位服务。

2.2.4 天基盲相干累积定位技术

天基盲相干累积定位技术是一种适用于天基

辐射源定位场景、针对弱信号条件提出的辐射源定位方法, 其核心采用盲相干累积 (Blind Coherent Integration, BCI) 技术, 通过多颗在轨卫星接收到的信号进行相干计算, 信号相干叠加产生能量峰值, 以提升微弱信号下的定位性能。该技术可有效弥补传统 TDOA/FDOA 在微弱信号条件下的失效问题, 适用于非合作射频辐射源的高精度定位。盲相干累积定位流程如图 7 所示, 算法首先对接收到的弱信号进行预处理, 然后在多个候选位置的地理坐标网格上计算区域能量密度, 对不同的能量密度进行叠加计算, 选择峰值对应的地理位置作为辐射源估计点。图中 Z 轴表示相对能量密度, 用于描述不同地理位置处信号的相对强弱关系, 衡量目标信号在不同位置的的能量差异, 不具有具体物理单位:

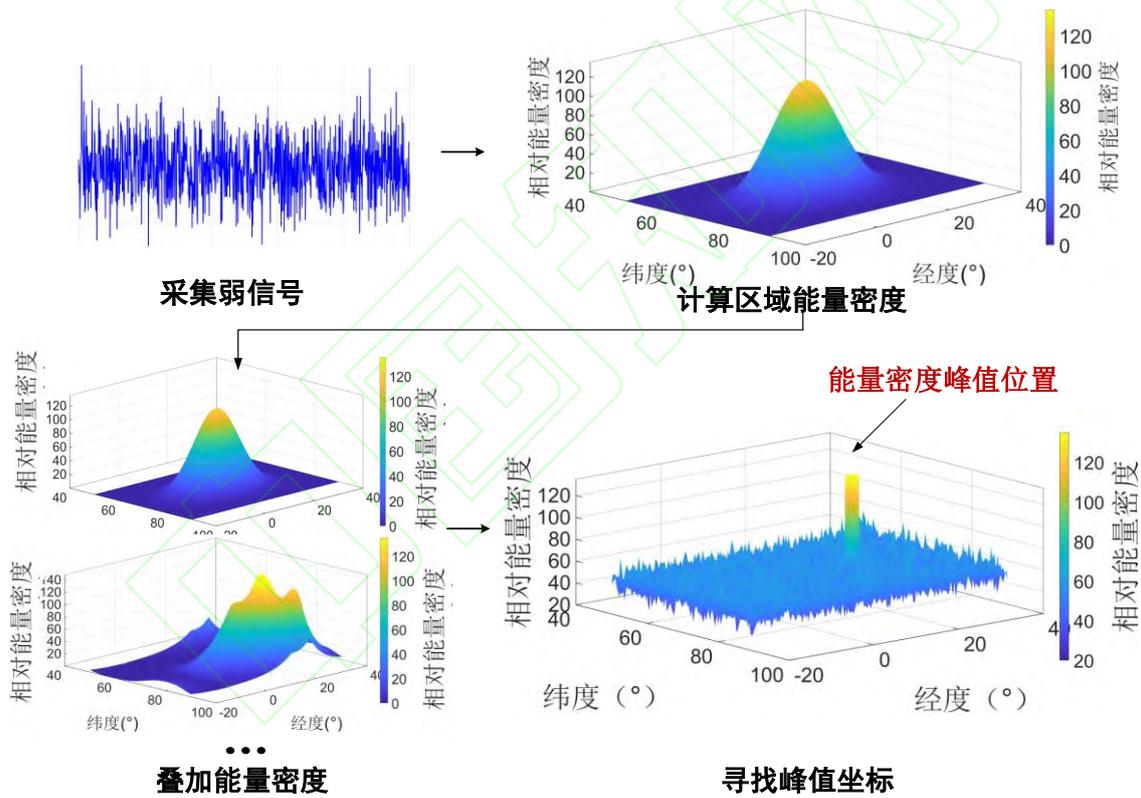


图 7 盲相干累积定位示意图

Fig.7 Schematic diagram of blind coherent integration localization

$$C(\mathbf{p}) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left\| \mathbf{r}_{l,k} - b_{l,k} \mathbf{A}_{l,k} F_{l,k} s_k \right\|^2 \quad (11)$$

其中, L 表示卫星数量, 每颗卫星接收 K 段信号, \mathbf{p} 表示辐射源位置向量, 即代价函数中需要估计的目标坐标, $\mathbf{r}_{l,k}$ 表示卫星接收信号, $b_{l,k}$ 表示信道

衰减, $F_{l,k}$ 表示时延因子, $\mathbf{A}_{l,k}$ 表示频移因子, 建立代价函数后, 对 $C(\mathbf{p})$ 的极值求解即可估计辐射源的位置。在信号信噪比低, 传统 TDOA 和 FDOA 技术难以处理的情况下, BCI 算法能够产生显著的处理增益, 有效提高定位精度, 拓展了可定位信号的范围, 增强了系统在复杂电磁环境下的抗干扰能力。表 2 对比了单星测向定位、多

星时频差定位与盲相干累积定位三种方法的性能特点。

表 2 不同定位方法性能特点

Tab.2 Performance characteristics of different positioning methods

定位方法	卫星数量	优点	缺点
单星测向定位	1 颗	响应快、系统简单、无需星间协同,可用于初步指向	定位精度有限,需多次交叉测向或搭配其他手段
多星时频差定位	至少 2 颗	定位精度高,适合广域定位场景	系统复杂度高,对时间频率同步和卫星组网要求严格
盲相干累积定位	1 颗以上	无需参数估计和关联,定位误差小,低信噪比环境下精度更高	系统复杂度高,计算量较大,对卫星载荷要求高

2.2.5 星载信号解碰撞处理技术

星载信号解碰撞处理技术指在卫星平台上,针对接收到的典型业务信号(如 AIS、ADS-B 等),采用实时处理算法分离因时域重叠、频域混叠或协议冲突导致的碰撞信号,从而提取有效目标信息的关键技术。针对 ADS-B 信号,北航空事卫星一号突破解交织技术,可以实现繁忙空域内平均每小时接收 ADS-B 消息数超过 100 万条;针对 AIS 信号,密集海域下,低轨卫星接收的 AIS 信号因多船同时发射与多普勒效应在时、频域易发生混叠,SDPOB(Spectrum Decollision Processing On Board)即星载频谱解碰撞处理,是消除信号碰撞的关键技术之一,ORBCOMM 卫星系统凭借 SDPOB 在星载平台直接处理 AIS 信号,提高了整体检测效率,本文所述方法是由 Jayasimha 等人^[45]提出的一种典型实现路径,属于 SDPOB 技术的一种具体实现方案。

利用 Laurent 分解将 GMSK 调制信号建模为多个正交脉冲分量的叠加,从中提取主导能量分量进行匹配滤波和解调。公式如下:

$$S(t) = \sum_{N=-\infty}^{\infty} \sum_{k=0}^{M-1} C_k(t - NT) J^{A_{k,N}} \quad (12)$$

其中 M 表示调制方式的符号数 $C_k(t)$ 为由 GMSK 调制特性决定的基本脉冲函数, $J^{A_{k,N}}$ 表示第 K 个脉冲第 N 个符号的调制复指数, T 表示符号周期,

反映符号信息如何影响信号。为有效处理频偏和时偏导致的解码困难,系统在卫星端设计了多组解调器,对每个假设的频偏 Δf 和符号定时偏移 τ 分别进行匹配滤波与译码,每个解调器基于非相干分支度量计算符号匹配度,公式如下:

$$\lambda_n^f(\tilde{\alpha}) = \left| \sum_{i=0}^{N-1} z_{n-i} \tilde{y}_{n-i}^* \right| - \left| \sum_{i=1}^{N-1} z_{n-i} \tilde{y}_{n-i}^* \right| \quad (13)$$

其中, z_{n-i} 是接收信号经过 Laurent 滤波器后的样本, \tilde{y}_{n-i}^* 是假设符号对应的滤波样本,上标表示复共轭。通过对所有组合输出进行 Viterbi 译码,结合后续的循环冗余校验(Cyclic Redundancy Check, CRC)、错误纠正、轨迹验证及干扰抵消,即可提取有效 AIS 消息,提升卫星 AIS 信号的解码率。

在星载 AIS 信号处理领域,常见的方法主要包括频谱解碰撞处理(Spectrum Decollision Processing, SDP)、星载处理(Onboard Processing, OBP)和 SDPOB。其中,SDP 通常在地面站对 AIS 信号进行滤波与分离,消除碰撞干扰,提取出各船舶的独立信号;OBP 则将 AIS 数据的初步处理工作从地面移至卫星平台,减少数据下传量并提高响应速度;SDPOB 则结合了频谱分离与卫星端实时解码,实现了低延迟、大容量的船舶检测能力。根据 ORBCOMM 公司公布的关于 AIS 信号解码与处理技术文件(<https://library.sprep.org/content/white-paper-understanding-satellite-ais-and-sdpob-advantage>),在相同时间下,三种 AIS 数据处理方法在同一区域内的船只检测数量对比如表 3 所示。

表 3 不同 AIS 数据处理方法下的船舶检测能力对比
Tab.3 Comparison of vessel detection capabilities using different AIS data processing methods

处理方法	探测船只数量	处理平台	适用场景
SDPOB	>3000	卫星端	船只密集区域实时监测
SDP	1969	地面站	一般密度区域或近岸海域船舶监控
OBP	227	卫星端	资源受限下的低密度船舶跟踪

2.2.6 星载多模态综合感知技术

随着遥感技术的发展,单一传感器往往难以满足复杂环境下对目标高精度、全天候、全时段的感知需求。星载多模态综合感知技术通过协同

方式处理不同传感器（如射频信号、SAR 图像、AIS 信号、光学及红外图像）数据，充分发挥各类传感器间的互补优势，有效提升了目标识别精度。该技术流程如图 8 所示，首先对不同传感器数据进行时空对齐，经过特征提取及加权融合进行联合分析，进而形成最优方法，提升目标检测、识别和跟踪的综合能力。



图 8 星载多模态综合感知技术流程图

Fig.8 Flowchart of spaceborne multimodal integrated perception technology

HawkEye 360 采用了射频信号与光学图像、SAR 图像等多源数据的多模态综合感知技术。例如，当卫星通过射频信号检测到可疑干扰或通信活动时，可调用同步获取的高分辨率光学图像辅助确认目标属性，或与 SAR 图像结合进行夜间或复杂天气下的成像增强。对于 AIS 信号与 SAR 图像的综合感知，以加拿大 Polar Epsilon 系统的船舶感知为例，系统利用目标检测算法，结合基于 K 分布的海面杂波模型和船舶雷达散射截面统计模型从 SAR 图像中提取候选船舶目标，利用 AIS 数据中提取船舶的时间、位置、航速和航向信息，预测船舶在 SAR 成像时的位置；随后将空间位置与时间接近的 SAR 检测结果与 AIS 预测位置自动关联，匹配成功的目标被识别为合作船舶，未能匹配的目标则被标记为非合作船舶，快速生成船舶检测报告。

星载多模态综合感知技术已在多个领域得到应用：在海洋安全领域，2024 年，ICEYE 推出 Ocean Vision 海事安全产品，通过高重访 SAR 结合 AIS 或者 RF 等多源数据解决各种海事问题；在射频信号定位方面，2025 年，HawkEye 360 与 GA-ASI 发布多情报数据融合方案，将射频信号轨迹与其他情报源在同一环境中进行关联分析，

用于识别可疑行为；同时，HawkEye 360 与多家合作伙伴共建数据生态，整合卫星影像和地理空间信息等多模态信息，并通过 Kafka、Storm 和 MongoDB 构建数据处理通道，反映了跨平台、多源信号融合的发展趋势；在数据采集方面，Spire 卫星在同一卫星平台上集成了 AIS、ADS-B、GNSS-RO 与 GNSS-R 等多种传感器，能够同步采集各类数据。

3. 趋势与启示

(1) 感知体系向天地基融合发展

当前，单一的天基或地基感知体系已难以满足复杂电磁环境在广域、大尺度及精细化反演刻画方面的需求。通过构建天地基融合感知系统，结合感知星座的广域测量能力与地面站点的高精度测量能力，可实现电磁环境的全域感知与立体反演。例如，HawkEye360 与地面情报平台联合，将其射频感知数据与地理空间、成像等地基/辅助数据融合用于电磁环境态势重建，体现了跨域天地基数据融合在电磁环境监测与响应中的优势与效果。未来，星地感知数据实时交互、天地基多源数据融合反演将成为关键方向。为实现天地基电磁环境数据的高效协同，本团队计划联合多家商业卫星公司和科研机构，共同成立电磁环境大数据联盟，推动电磁环境多源观测数据的共享与标准化，突破“信息孤岛”壁垒，充分挖掘不同观测手段的互补优势，进一步提升电磁环境监测的综合效能和服务能力。

(2) 感知平台向星间组网联合发展

传统的单星独立工作模式难以适应电磁环境的高动态性和广域覆盖需求，同时，星间链路建设仍面临高速、大容量、低延迟通信技术的瓶颈。未来，基于星间组网与编队飞行技术，星座系统可实现多节点联合测量与数据共享，从而显著提升时空分辨率并缩短数据更新周期。例如，低轨星座可利用星间链路构建自主感知网络，对同一区域电磁环境开展多角度交叉测量与验证，有助于降低异常检测中的虚警率。此外，卫星集群还能通过感知任务的分布式测量与协同感知，提高响应的实时性并增强系统鲁棒性。

(3) 感知载荷向多模态综合发展

现有感知载荷普遍面临多模态传感器集成度

不足的局限，为应对电磁目标多样化感知、综合化识别需求，感知载荷正从单一功能向集成化、综合化、一体化演进，通过融合光学成像、微波探测、射频侦测等多类型传感器，基于软件定义无线电平台，实现多模态、宽频段、多参数联合感知。同时，多模态载荷射频前端与天线综合一体化设计（如智能超表面天线、可重构阵列），降低载荷体积与重量，提升在轨重构能力，满足商业卫星低成本、快迭代的需求。例如，BAE Systems 的 Azalea 多卫星集群融合了 SAR、光学与射频（RF）数据采集能力，并部署机器学习与边缘处理，实现多模态遥感与智能处理的协同应用。未来应加强跨学科融合创新，推动新型材料、智能天线、边缘 AI 等核心技术突破，为多模态载荷的一体化应用提供坚实基础。

(4) 感知处理向星上实时智能处理发展

传统“星上感知-地面处理”模式存在事件响应时效性差、数据回传带宽受限、卫星过顶时间短等瓶颈。基于星载边缘计算（AI 处理）、模型轻量化技术，星上可直接完成信号分析、数据分析及电磁环境反演等，并通过星间链路构建的实时传输网络实现产品快速分发，提升服务的时效性与自主性。例如，欧洲航天局的 OPS-SAT 卫星通过在轨重编程 FPGA 部署和更新神经网络；欧空局的 Φ -sat-2 搭载 AI 程序执行包括云检测、图像分类、压缩编码等操作，直接在卫星上将原始光学影像转化为可用产品，显著节省下行带宽。随着在轨算力和边缘智能水平的提升，未来应重点推动高效能、高可靠的在轨 AI 芯片和自适应安全模型研发，完善星上处理的快速响应与决策支持机制，为应对突发性空间环境事件和动态管控需求提供更有力的技术支撑。

参考文献 (References)

- [1] JASANI B. Outer space-a new dimension of the arms race[M]. New York: Routledge, 2021.
- [2] RICHELSON J T. The future of space reconnaissance[J]. Scientific American, 1991, 264(1): 38-45.
- [3] JOHNSON L. Spy satellites and military communications[M]//Sky Alert!.when satellites fail, New York: Springer, 2013: 77-84.
- [4] JUUSOLA L, VIRTANEN I, HATCH S M, et al. An empirical model of high-latitude ionospheric conductances based on EISCAT observations[EB/OL]. (2025-06-03)[2025-07-01]. <https://egusphere.copernicus.org/preprints/2025/egusphere-2025-2394/>.
- [5] SWIFT C T, GOODBERLET M A, WILKERSON J C. Development of a validation model for the defense meteorological satellite program's special sensor microwave imager[R]. Washington: National Aeronautics and Space Administration, 1990.
- [6] HASLER A F. Stereographic observations from geosynchronous satellites: an important new tool for the atmospheric sciences[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1981, 62(2): 194-212.
- [7] ZHANG P, HU X Q, LU Q F, et al. FY-3E: the first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2022, 39: 1-8.
- [8] 郭华东, 陈方, 邱玉宝. 全球空间对地观测五十年及中国的发展[J]. 中国科学院院刊, 2013, 28(增刊 1): 7-16.
GUO H D, CHEN F, QIU Y B. Development of earth observation over the past half century and future direction[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, 28(Suppl 1): 7-16. (in Chinese)
- [9] 陆燕, 葛逸伦. 欧洲人为二氧化碳排放监测 CO2M 卫星计划[J]. 红外, 2022, 43(10): 43-56.
LU Y, GE Y L. European satellite CO2M mission for monitoring anthropogenic carbon dioxide emissions from space[J]. Infrared, 2022, 43(10): 43-56. (in Chinese)
- [10] ZHANG Y, LI M, HUANG Q H, et al. Statistical correlation between DEMETER satellite electronic perturbations and global earthquakes with $M \geq 4.8$ [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2023, 61: 2001118.
- [11] BERTELLO I, PIERSANTI M, CANDIDI M, et al. Electromagnetic field observations by the DEMETER satellite in connection with the 2009 L' Aquila earthquake[J]. Annales Geophysicae, 2018, 36(5): 1483-1493.
- [12] 许健民, 杨军, 张志清, 等. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 2010, 36(7): 94-100.
XU J M, YANG J, ZHANG Z Q, et al. Chinese meteorological satellites, achievements and applications[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 94-100. (in Chinese)
- [13] 张荣慧, 刘顺喜, 周连芳, 等. ALOS 卫星图像分析与预处理实证研究[J]. 国土资源遥感, 2008, 20(3): 84-89.
ZHANG R H, LIU S X, ZHOU L F, et al. An empirical research on analysis and pre-processing of alos satellite images[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2008, 20(3): 84-89. (in Chinese)
- [14] FRIIS-CHRISTENSEN E, LÜHR H, HULOT G. Swarm: a constellation to study the Earth's magnetic field[J]. Earth, Planets and Space, 2006, 58(4): 351-358.

- [15] OLSEN N, FRIIS-CHRISTENSEN E, FLOBERGHAGEN R, et al. The swarm satellite constellation application and research facility (SCARF) and swarm data products[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, 65(11): 1189-1200.
- [16] 王婕, 申旭辉, 杨艳艳, 等. 基于张衡一号卫星数据的中国区域岩石圈磁场球冠谱分析[J]. *地球物理学报*, 2023, 66(7): 2973-2982.
WANG J, SHEN X H, YANG Y Y, et al. The spherical cap harmonic model of lithospheric magnetic anomaly in Chinese region derived from CSES satellite data[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(7): 2973-2982. (in Chinese)
- [17] OSEDLO V, ABANIN O, VLASOVA N, et al. Monitoring of ionosphere and magnetosphere plasma and high energy charge particle fluxes in multi-satellite measurements in wide range of altitudes[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2021, 254: 02009.
- [18] KOLPAK V, MOGILEVSKY M, CHUGUNIN D, et al. Statistical properties of auroral kilometer radiation: based on ERG (ARASE) satellite data[J]. *Solar-Terrestrial Physics*, 2021, 7(1): 11-16.
- [19] 王宝震, 任华忠, 穆晓东, 等. 风云四号 A 星和 B 星热红外数据辐射一致性研究[J]. *遥感学报*, 2025, 29(1): 232-246.
WANG B Z, REN H Z, MU X D, et al. Radiometric consistency analysis of thermal infrared data between Chinese FY-4 A and B satellites[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2025, 29(1): 232-246. (in Chinese)
- [20] 韩超, 庞岗, 靳睿敏, 等. 基于 COSMIC 掩星观测的顶部电离层标高特征分析[J]. *电波科学学报*, 2024, 39(2): 253-261.
HAN C, PANG G, JIN R M, et al. Characterization of topside ionospheric scale height based on COSMIC occultation observations[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2024, 39(2): 253-261. (in Chinese)
- [21] ANTHES R A, BERNHARDT P A, CHEN Y, et al. The COSMIC/FORMOSAT-3 mission: early results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(3): 313-334.
- [22] FONG C J, YANG S K, CHU C H, et al. FORMOSAT-3/COSMIC constellation spacecraft system performance: after one year in orbit[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3380-3394.
- [23] LIU J Y, CHEN S P, YEH W H, et al. Worst-case GPS scintillations on the ground estimated from radio occultation observations of FORMOSAT-3/COSMIC during 2007 - 2014[J]. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(4): 791-809.
- [24] COOK K, FONG C J, WENKEL M J, et al. FORMOSAT-7/COSMIC-2 GNSS radio occultation constellation mission for global weather monitoring[C]//Proceedings of the IEEE Aerospace Conference, 2013.
- [25] WEISS J P, SCHREINER W S, BRAUN J J, et al. COSMIC-2 mission summary at three years in orbit[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(9): 1409.
- [26] 汪秋兰, 布金伟, 杨慧, 等. 中国天目一号星座多 GNSS 反射测量土壤湿度产品性能验证[J]. *全球定位系统*, 2025, 50(2): 89-108.
WANG Q L, BU J W, YANG H, et al. Performance validation of soil moisture products from the Chinese Tianmu-1 constellation multi-GNSS reflectometry[J]. *GNSS World of China*, 2025, 50(2): 89-108. (in Chinese)
- [27] 王兰炜, 胡哲, 申旭辉, 等. 电磁监测试验卫星(张衡一号)数据处理方法和流程[J]. *遥感学报*, 2018, 22(增刊 1): 39-55.
WANG L W, HU Z, SHEN X H, et al. Data processing methods and procedures of CSES satellite[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(Suppl 1): 39-55. (in Chinese)
- [28] 何宏玮, 王秀英, 赵国存, 等. 张衡一号卫星探测的赤道附近电场分布及其与电离层分布的关系[J]. *空间科学学报*, 2023, 43(5): 821-832.
HE H W, WANG X Y, ZHAO G C, et al. Distribution of equatorial electric field and its relation with ionosphere distribution detected by the ZH-1 satellite [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, 43(5): 821-832. (in Chinese)
- [29] 王畅, 郑泽星, 刘航, 等. 美国 HawkEye 360 低轨电子监测星座设计特点与能力分析[J]. *航天器工程*, 2025, 34(2): 120-128.
WANG C, ZHENG Z X, LIU H, et al. Review of design features and primary abilities on HawkEye 360 low orbit electronic monitoring constellation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2025, 34(2): 120-128. (in Chinese)
- [30] PARRA P I, MONTEJO-SÁNCHEZ S, FRAIRE J A, et al. Network size estimation for direct-to-satellite IoT[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2023, 10(7): 6111-6125.
- [31] 蒋罗婷. 美国商用低轨卫星的军事借鉴[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2020, 15(9): 840-848.
JIANG L T. The references from commercial LEO satellites for the US military[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2020, 15(9): 840-848. (in Chinese)
- [32] DINHAM P. Kleos satellite launch re-scheduled for later this year[J]. *Commwire magazine: Incisive, informed, independent, objective*, 2019(22): 7.
- [33] 陶孝锋, 李雄飞, 翟继强, 等. Orbcomm 星座卫星系统发展历程及其最新动态研究[J]. *空间电子技术*, 2015, 12(2): 29-36.
TAO X F, LI X F, ZHAI J Q, et al. The research of orbcomm constellations about its development and new

- dynamic[J]. *Space Electronic Technology*, 2015, 12(2): 29-36. (in Chinese)
- [34] 赵勇, 吴宗谕, 梁昊鹏, 等. 天拓五号卫星推进系统在轨故障诊断与定位方法[J]. *国防科技大学学报*, 2024, 46(5): 141-149.
ZHAO Y, WU Z Y, LIANG H P, et al. On-orbit fault diagnosis and location method for the propulsion system of the TianTuo-5 satellite[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2024, 46(5): 141-149. (in Chinese)
- [35] 李松亭, 陈利虎, 余孙全, 等. 天拓五号卫星天基物联网系统关键技术与在轨验证[J]. *国防科技大学学报*, 2025, 47(1): 168-180.
LI S T, CHEN L H, YU S Q, et al. Key techniques and on-orbit verification for SIoT system in TT-5 satellite[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2025, 47(1): 168-180. (in Chinese)
- [36] CHEN L H, YU S Q, CHEN Q, et al. Data reception analysis of ADS-B on board the TianTuo-3 satellite[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1438(1): 012030.
- [37] 刘海涛, 杨宁, 李冬霞, 等. “北航空事卫星一号”监视载荷的统计性能[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(11): 2883-2889.
LIU H T, YANG N, LI D X, et al. Statistical performance of surveillance payload of Beihang aeronautical satellite-1[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(11): 2883-2889. (in Chinese)
- [38] BOUZOUKIS K P, MORAITIS G, KOSTOPOULOS V, et al. An overview of CubeSat missions and applications[J]. *Aerospace*, 2025, 12(6): 550.
- [39] RASCH J, CARLSTRÖM A, CHRISTENSEN J, et al. The GRAS-2 radio occultation mission[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2024, 17: 6213-6222.
- [40] 宫晓艳. 大气无线电 GNSS 掩星探测技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2009.
GONG X Y. Research on GNSS atmospheric radio occultation technique[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Science(Center for Space Science and Applied Research), 2009. (in Chinese)
- [41] 徐贤胜, 洪振杰, 郭鹏, 等. COSMIC 掩星电离层资料反演以及结果验证[J]. *物理学报*, 2010, 59(3): 2163-2168.
XU X S, HONG Z J, GUO P, et al. Retrieval and validation of ionospheric measurements from COSMIC radio occultation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 2163-2168. (in Chinese)
- [42] SHEN D, CHEN G S, PHAM K. Passive single satellite geolocation of ground-based EMI sources[C]//Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2023: 2384-2394.
- [43] LIU Z M, MA C, ZHOU C. A study of passive positioning performance of commercial spectrum monitoring satellites based on frequency measurements[C]//Proceedings of the IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI), 2023: 468-472.
- [44] 郝才勇. 鹰眼 360 天基无线电监测系统综述[J]. *中国无线电*, 2023(1): 52-54, 62.
HAO C Y. A survey of Hawkeye 360 satellite-based radio monitoring system[J]. *China Radio*, 2023(1): 52-54, 62. (in Chinese)
- [45] JAYASIMHA S, PALADUGULA J, GADIRAJU A V, et al. Satellite-based AIS receiver for dense maritime zones[C]//Proceedings of the 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS), 2017: 15-22.