

空天地一体 GNSS 干扰监测与溯源机制研究

Research on Space-Air-Ground Integrated GNSS Interference Monitoring and Source Tracing Mechanism

景晨丰¹, 杨晓航², 叶海纳¹, 施 凯³, 杨 杉¹, 杜忠岩¹, 庄 涛¹, 王 题¹ (1. 中国联通智能城市研究院, 北京 100048; 2. 中化创新(北京)科技研究院有限公司, 河北 雄安 071700; 3. 中国联通上海分公司, 上海 200082)
Jing Chenfeng¹, Yang Xiaohang², Ye Haina¹, Shi Kai³, Yang Shan¹, Du Zhongyan¹, Zhuang Tao¹, Wang Ti¹ (1. China Unicom Smart City Research Institute, Beijing 100048, China; 2. Sinochem Innovation (Beijing) Technology Research Institute Co., Ltd., Xiong'an 071700, China; 3. China Unicom Shanghai Branch, Shanghai 200082, China)

摘 要:

针对全球导航卫星系统(GNSS)面临的严峻干扰威胁的问题,构建了空天地协同的GNSS干扰监测与溯源体系。面向压制、欺骗及非人为等干扰类型,部署天基、空基、地基和泛在感知多层节点,设计从感知到溯源的一体化 workflow。通过多尺度数据融合与协同处理、多维特征AI精准识别、机动平台逼近精确溯源三大核心技术,实现从广域普查到街区级精查的多尺度弹性覆盖。该机制弥补了单一监测手段的覆盖度、实时性、精准度的短板,成为韧性PNT体系的关键支撑。

关键词:

GNSS 干扰; 空天地协同; 监测溯源; 欺骗干扰; 韧性 PNT

doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.07.005

文章编号: 1007-3043(2026)07-0024-07

中图分类号: TN927

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

Aiming at the severe interference threats faced by Global Navigation Satellite Systems (GNSS), a space-air-ground cooperative GNSS interference monitoring and source-tracing system is constructed. Targeting jamming, spoofing, and unintentional interference, multi-layer nodes incorporating space-based, airborne, ground-based, and ubiquitous sensing are deployed, and an integrated sensing-to-tracing workflow is designed. Through three core technologies, which are multi-scale data fusion and cooperative processing, AI-based accurate identification of multi-dimensional features, and close-in precise tracing via mobile platforms, resilient multi-scale coverage from wide-area survey to block-level fine inspection is achieved. This mechanism compensates for the shortcomings of single monitoring means in coverage, real-time performance, and accuracy, serving as a key pillar of a resilient PNT system.

Keywords:

GNSS interference; Space-air-ground integration; Monitoring and localization; Spoofing interference; Resilient PNT

引用格式: 景晨丰, 杨晓航, 叶海纳, 等. 空天地一体 GNSS 干扰监测与溯源机制研究[J]. 邮电设计技术, 2026(7): 24-30.

1 概述

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)已成为现代社会不可或缺的时空信息基础设施,其应用已渗透至交通、通信、金融、电力及

国防等国计民生关键领域,并在低空经济、具身智能、智能驾驶等前沿应用中发挥基础性作用^[1]。然而,由于GNSS信号功率极弱、轨道遥远、协议公开等特性,其呈现出固有的脆弱性,极易受到干扰^[2]。

2025年12月17日,南京发生GNSS大范围干扰事件,干扰期间智能手机、共享单车、机动车、无人机等设备出现轨迹漂移,平均偏差超过2 km,干扰范围达500 km²,影响用户数超百万。当前,GNSS干扰以短时

基金项目: 雄安新区科技创新专项(2024XAGG0006)

收稿日期: 2026-05-13

试探、欺骗攻击与伪装隐匿为主要形式^[3],具有隐蔽性强、短时突发的特点,排查难度极大^[4]。对GNSS干扰的监管普遍以受理主动举报为主,缺乏实时监测机制,更难以实现从地区级、城市级大尺度到城区级、街区级小尺度的实时、泛在、精准的干扰监测与溯源。因此,研究一种具备更高GNSS干扰监测与溯源能力的机制体系成为一项紧迫任务。

1.1 GNSS干扰类型综述

根据干扰意图,干扰主要可分为无意干扰和有意干扰两大类。无意干扰通常源于其他无线电设备的带外或杂散发射、同频段合法通信信号等,其影响往往是随机的、非针对性的。而有意干扰则是主动对GNSS实施的破坏行为,根据技术原理和影响方式,可进一步细分为压制式和欺骗式干扰这2种^[5]。

a) 压制式干扰。通过发射与GNSS信号同频或临近频段的强功率噪声或调制信号,直接淹没真实卫星信号,致使接收机无法捕获或跟踪信号,从而造成定位服务中断或失效^[6]。其影响直接、范围广,是目前最为常见的干扰形式。

b) 欺骗式干扰。通过生成与真实GNSS信号高度相似的伪造信号,误导或控制目标接收机,使其解算出错误的位置、速度或时间信息^[7]。与压制式干扰相比,欺骗干扰具有隐蔽性强的特点,接收机在受骗期间可能仍显示正常的定位状态,但其输出的导航结果却是危险的错误值^[8],尤其对民用航空、低空飞行、自动驾驶等应用场景的危害极大。

根据干扰作用距离、到达接收机的干信比等指标,可对干扰源的影响尺度进行划分。以扫频干扰为例,统计干扰功率和影响范围的对应关系,具体如表1所示。

1.2 GNSS干扰监测溯源手段

预防和管理GNSS干扰事件的核心目标可概括为“看得见”“定得准”“管得住”。近年来,国内外已发展形成地基、空基、天基、泛在感知四大类主流监测技术手段,各类手段均有其适配场景与核心优势,但也存在无法突破的固有能力边界,且多为独立建设、单独运营,难以兼顾广域覆盖、定位精度、响应时效与部署成本的综合需求。

1.2.1 CORS组网监测方法

该方法以地面布设的固定高精度连续运行基准站(Continuously Operating Reference Stations, CORS)为核心节点,通过无线电测向(Angle of Arrival, AOA)、到

表1 干扰功率和影响范围的对应关系

干扰影响尺度	干扰作用距离/km	路径损耗/dB	达到接收机的干信比	干扰机发射功率	典型场景
极近距离	0.15	~80	20.078	约0.001 W	点目标/作弊器
近距离	0.6	~92	20.078	约0.016 W	影响单个停车场
中距离	5	~110	19.62	约1 W	街区级/便携式干扰器
中远距离	50	~130	19.62	约100 W	城区级干扰/车载大功率干扰器
远距离	100	~136	19.62	约400 W	城市级干扰
极远距离	160	~140	19.93	约1 100 W	跨区域广域干扰
广域大范围	500	~150	19.62	约10 kW	战略级区域压制

达时间差(Time Difference of Arrival, TDOA)等技术,对区域内的GNSS干扰信号进行探测与源定位^[9],典型系统如瑞典的干扰检测与定位系统(IDLS)。该方法对干扰源的定位精度高,可达数十米至百米级,且可实现秒级连续实时监测,但对组网密度有严格要求。当前国内CORS网核心职能为提供实时动态(Real-Time Kinematic, RTK)定位增强服务,站间距普遍为40~70 km,难以满足城市级精细化监测的密度需求;同时,受地形遮挡、站址固定的限制,无法覆盖山地、远海等区域,也不具备跨境或全球监测能力,部署灵活性较弱。

1.2.2 无人机平台监测方法

该方法以旋翼或固定翼无人机为机动搭载平台,集成测向天线阵、射频接收模块等载荷,通过空中机动测向与多点位方位交汇定位,实现对GNSS干扰源的快速查找^[10]。其核心优势为机动灵活、响应迅速,可有效克服复杂地形障碍,通过抵近测量优化定位任何条件,最高可实现米级定位精度。但受限于平台续航能力、有效载荷重量与尺寸,其单次任务覆盖范围有限,且出动受空域管制和天气条件制约,不适合开展大范围、持续性、实时性的普查监测。

1.2.3 ADS-B数据间接监测方法

该方法通过接收和分析民航飞机自动广播的广播式自动相关监视(Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, ADS-B)报文,提取其中的导航完好性类别(Navigation Integrity Category, NIC)、导航精度类别(Navigation Accuracy Category for Position, NACp)等参数的异常变化,间接推断GNSS信号质量并划定干扰

区域^[11]。该方法依托全球民航机队构建天然的“移动传感器网络”,可实现民航航路空域的近乎实时的广域感知,无需额外建设专用监测网,部署成本极低。但受航班密度分布不均的影响,缺失对非航路区域的监测能力,数据稳定性与定位精度不足,仅能实现数十千米级的粗定位;同时,告警易受飞机接收机故障、多径效应等非干扰因素影响,误报率较高。

1.2.4 专用低轨星座监测方法

该方法以数百公里高度的低地球轨道专用电磁监测星座为平台,对全球 GNSS 干扰射频信号进行广域监测,其核心为依托三星 TDOA、双星到达频率差(Frequency Difference of Arrival, FDOA)联合定位技术^[12],通过信号到达不同卫星的时间差与频率差解算干扰源的地理位置,典型商用系统为美国鹰眼 360 星座。该方法可实现全球范围持续性信号普查,溯源精度可达百米级至公里级,是目前唯一具备全球无盲区监测能力的技术手段^[13]。但受轨道高度影响,星载监测灵敏度较地基系统低 20 dB 左右,对低功率弱信号的监测能力不足;同时存在星载时频同步技术复杂、星座建设运维成本高昂、数据回传延迟及卫星重访周期限制等固有缺陷。

1.2.5 5G 网授时数据监测方法

基于 5G 网授时数据的监测方法以全域密集部署的 5G 商用基站为分布式感知节点,依托基站 GNSS 授时天线、工参坐标,通过采集 GNSS 载噪比(Carrier-to-Noise Ratio, C/N_0)、可见卫星数、伪距残差、授时偏差等特征数据,结合 TDOA/AOA 联合定位、 C/N_0 梯度加权质心、多基站异常空间聚类算法解算干扰位置并识别干扰类型^[14]。该方法的优势是无需新增专用监测硬件,覆盖密度极高。但受基站空间分布不均的影响,中心城区数据密集,实时分析资源消耗较大,大规模数据分析水平较低导致无法实时评估(通常有分钟级延迟),偏远区域监测密度不足,容易漏警。同时,城市峡谷等多径遮挡易引入测量误差,易受 5G 系统互调、带外杂散等自扰信号影响,干扰判别准确率受限。

1.2.6 众包 GNSS 终端数据监测方法

该方法在授权与数据安全合规框架下,匿名采集智能手机、车载导航终端等海量民用 GNSS 设备的搜星数量、位置—速度—时间(Position—Velocity—Time, PVT)输出、伪距残差等数据,基于空间时序数据挖掘技术实现干扰区域的发现与粗定位^[15]。其核心优势为传感器数量巨大、人口密集区覆盖密度高、实施边

际成本极低,尤其适配城市区域压制式干扰的早期预警。但单终端数据质量参差,受多径环境影响显著,对不引起信噪比显著下降的隐蔽欺骗式干扰几乎没有识别能力;同时,大规模监测数据的传输、存储与隐私合规管控存在明确约束。

现有干扰监测溯源技术对比如表 2 所示。

表 2 现有干扰监测溯源技术对比

技术名称	监测范围	监测高度	干扰敏感度	理想溯源精度	数据源成本
CORS 组网监测	区域级,受站网密度约束	地面、近地低空	高	数十至百米级	中高
无人机平台监测	局地级,受续航/空域约束	低空作业域	高	米至十米级	中
ADS-B 间接监测	民航航路空域	民航空域	中低	数十千米级	低
专用低轨星座监测	全球广域	全高度域	中	百米至千米级	极高
5G 网授时数据监测	城区密集,偏远区薄弱	地面、近地低空	较高	米级至数米级	低
众包 GNSS 终端监测	人口密集区广覆盖	地面、近地低空	中	十米至百米级	极低

综上,各类单一监测手段均存在无法突破的能力边界:天基手段可覆盖全球,但灵敏度不足、精度有限;地基手段精度高、实时性强,但覆盖范围受限、灵活性不足;空基手段可抵近精确定位,但无法广域持续监测;泛在感知手段成本低、覆盖广,但精度不足、抗干扰能力弱^[16]。仅靠单一技术体系,无法实现从全球广域普查到城市街区级精准溯源的全链条监测需求。因此,融合各类平台的核心优势,构建空天地一体化协同监测溯源体系,成为突破当前技术瓶颈、实现 GNSS 全场景安全保障的核心路径。

2 空天地协同监测溯源体系

2.1 体系顶层设计

空天地协同 GNSS 干扰监测溯源体系是融合了天基、空基、地基多层异构感知资源及行业泛在监测数据,面向干扰源快速发现、精准测量与可靠溯源构建的一体化综合技术体系,其整体架构如图 1 所示。该体系通过网络化协同与智能化调度设计,弥补单一监测手段在覆盖范围、响应时效与溯源精度上的固有短板,形成全域联动、优势互补的综合监测溯源能力^[17]。

该体系综合考虑多种技术在监测范围、干扰敏感度、溯源精度等方面的差异,顶层设计遵循两大核心

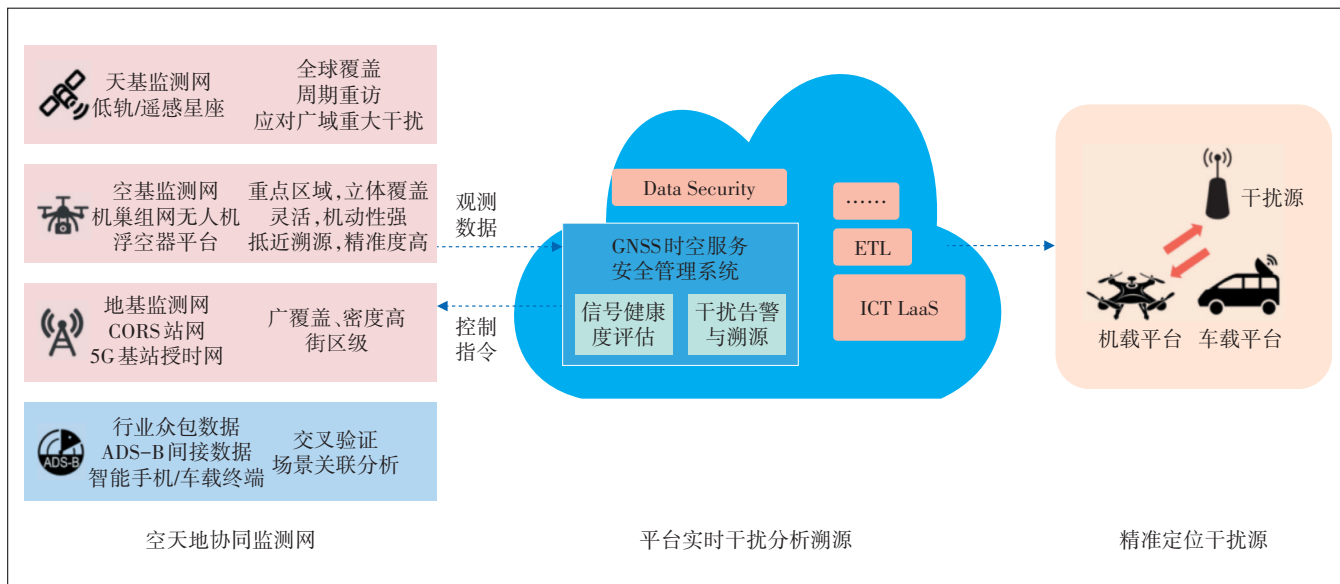


图1 空天地协同GNSS监测溯源系统整体架构

思路:一是多维度异构资源互补融合,统筹天、空、地多源数据的技术特性,实现全球至街区级弹性尺度覆盖、宏观态势感知与微观精准溯源的能力互补;二是根据需求灵活配置主辅链条,使用协同处理算法库,根据各监测场景下技术成熟度,动态调整各层级监测资源权重,形成柔性化任务执行链路。

2.2 多层次感知节点

构建“天基—空基—地基—泛在感知”四层异构感知节点架构,使各节点不再孤立运行,而是基于能力互补形成层级联动的有机整体。各层级在协同体系中承担差异化核心职责,通过能力互补弥补单一手段的固有短板,共同支撑从广域预警到精准溯源的全流程任务,各层级定位与协同职责如下。

2.2.1 天基层

天基层是体系的广域侦察哨与全局预警核心,以专用低轨电磁监测星座、搭载信号监测载荷的低轨通信和遥感卫星为核心载体^[18]。在协同体系中,天基层的核心职责为执行固定周期全球广域普查任务,重点针对GNSS星座故障、大功率干扰开展初步发现与粗定位,为整个体系提供初始预警与嫌疑区域指引,解决地基、空基手段无法覆盖全球、跨境区域的核心痛点。该层输出的嫌疑区域坐标将直接触发空基、地基节点的二级联动响应。

2.2.2 空基层

空基层是体系的快速机动突击队与精准溯源核

心,以高灵活性与抵近探测能力为核心优势。该层分为2类核心平台以适配差异化协同需求,具体如下。

a) 无人机平台。作为空基层的核心载体,无人机平台的核心职责为响应天基、地基节点的任务调度,针对锁定的嫌疑区域,规划最优测向航迹并开展中精度观测,通过抵近飞行获取干扰信号时频特性、调制方式等关键参数^[19],最终实现干扰源米级精确定位与射频指纹采集,解决固定监测站受地形遮挡、定位任何条件差的痛点。该平台是实现执法取证级溯源的核心支撑。

b) 通航飞机与浮空器平台。该平台包括预警机、高空长航时无人机、系留气球等,核心职责为对重点区域开展长时间持续监视,或作为空中通信与数据处理的中继节点,实现偏远无地面网络区域的监测数据回传,是重点区域常态化监测与复杂场景协同的重要补充。

2.2.3 地基层

地基层是体系的精密测量锚点与时空基准核心。该层以高精度测量能力为核心,为整个体系提供统一时空基准与精准数据支撑,分3类平台承担差异化协同职责。

a) 基准监测网。基准监测网基于CORS基准站网络构建,核心职责是为全体体系所有节点提供纳秒级时间同步与统一空间基准,校准天基、空基节点的时频同步误差与定位偏差;开展不间断连续实时监测,重

点识别低功率微小信号异常,对天基初筛的嫌疑区域开展高采样率信号特征确认,完成干扰类型初判与影响范围划定,为无人机抵近监测提供目标指引。

b) 加密监测网。加密监测网依托全域密集部署的 4G/5G 商用基站构建,以基站已知精确工参坐标、GNSS 授时天线为核心,核心职责为弥补 CORS 站网间距过大的密度短板,实现城市区域百米级网格的高密度监测覆盖^[14],重点解决城市峡谷、密集城区 CORS 站覆盖盲区的弱信号识别问题,与基准站网联动实现区域级干扰事件的快速粗定位。

c) 移动/便携式监测站。移动/便携式监测站装载于专用车辆或单兵携带,核心职责为覆盖固定监测站的监测盲区,针对机场、核心基础设施等干扰高发区域开展针对性部署,配合无人机完成干扰源落地核查与取证,显著提升体系的复杂场景适应性。

2.2.4 泛在感知层

泛在感知层是体系向行业化、社会化延伸的广域补充网,其核心为通过挖掘现有基础设施与终端数据资源,构建低成本、广覆盖的间接监测能力。该层分为 2 类核心感知方式来适配协同需求,具体如下。

a) 基于行业系统位置数据。该方式依托 ADS-B 系统、船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)等数据,核心职责为针对民航航路、内河及近海航道开展广域监测,通过分析航空器、船舶的导航状态异常,为大范围干扰事件提供交叉验证与初始定位线索,弥补偏远航路、海域的地面监测盲区。

b) 基于众包 GNSS 终端数据。该方式依托海量的、非受控、质量参差的民用智能手机、车载导航终端数据,核心职责是针对城市人口密集区开展准实时监测,重点识别城市低功率压制式干扰的早期异常,为体系提供高密度的城区信号质量数据,为干扰情况提供趋势性信息。

2.3 空天地协同 workflow

空天地协同体系包含了“感知—判别—识别—处置”的空天地一体化协同工作流(见图 2)。该工作流以全域统一时空基准为基础,打通天基、空基、地基、泛在感知节点的数据流与控制链路,将各节点的能力优势嵌入全流程,解决传统单一监测手段响应脱节、协同无序、能力错配的痛点,实现从干扰发现到溯源处置的全链路闭环管控。

a) 扰动触发与协同初判。以地基 CORS 站网、5G 授时监测网为核心实时感知节点,同步接入泛在感知

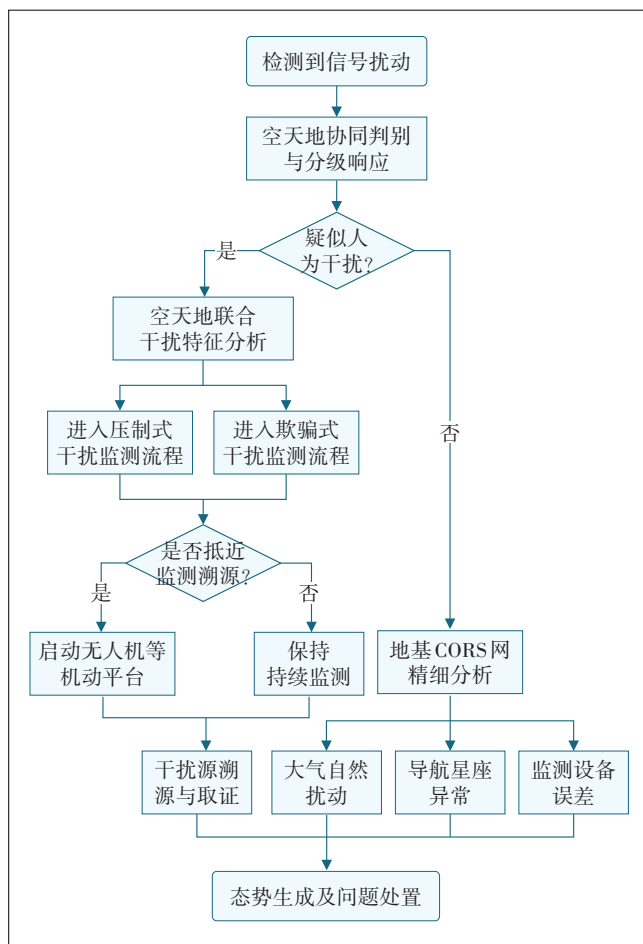


图2 空天地协同工作流示意

层 ADS-B 航迹异常、众包终端定位偏差数据,捕捉 GNSS 信号载噪比、伪距残差、频谱特征的异常扰动^[15];天基低轨星座同步开展广域信号校验,完成对扰动事件的时间、频段、影响范围的初步锁定,为后续协同判别提供标准化输入。

b) 协同判别与分级响应。中心管控平台汇聚多源初筛数据,通过多源证据融合完成扰动协同判别,区分人为恶意干扰与非人为扰动(含大气自然扰动、导航星座异常、监测设备误差等)^[20]。对于非人为扰动,直接进入结果归档与态势更新环节;对判定为疑似人为干扰的事件,立即触发分级告警,锁定嫌疑核心区域,启动多源联合特征识别流程。

c) 干扰类型精准识别。针对干扰类型,适配差异化的协同识别策略。对于压制式干扰,以地基固定监测网为核心,完成对干扰功率、带宽、调制类型的特征提取^[6],天基星座同步完成全局影响范围评估;对于欺骗式干扰,以地基 CORS 站载波相位、相关峰观测数据

为基础,联合泛在感知层多源定位一致性校验数据完成初筛^[21],调度空基无人机平台采集高保真信号数据完成精细化特征提取,最终明确干扰类型与影响等级。

d) 分级处置与精准溯源。基于干扰影响等级与定位精度需求实施分级处置,对于大范围大功率干扰、无需执法取证级高精度定位的事件,采用天基—地基联合定位模式,依托地基监测网 TDOA/AOA 混合算法完成百米级粗定位^[22],由地基固定站持续跟踪监测;对于隐蔽式小功率干扰、需执法取证级米级定位的事件,启动“地基引导—空基抵近—多源验证”协同溯源模式,调度无人机集群完成干扰源精确定位与射频指纹、影像取证^[10],形成完整司法取证链条。

e) 态势生成与问题处置。对事件结果进行分类归档,生成干扰事件综合报告与全域干扰态势更新图。干扰事件数据同步录入特征数据库,为后续智能识别与协同优化提供支撑。

3 空天地协同监测溯源关键技术方向

空地协同监测溯源体系的有效运作依赖一系列关键技术的突破与集成,这些技术共同支撑着从感知、数据传输、融合处理到最终溯源定位的全流程。空地协同的干扰源溯源模式如图3所示。

3.1 多尺度数据融合与协同处理技术

GNSS 干扰监测与溯源体系以全域数据底座与任务调度为基础,多尺度数据融合与协同处理技术旨在

构建标准化智能数据中台,实现数据的统一接入、时空关联与按需融合,支撑从全球广域普查、区域重点响应到城市精细化排查的多尺度差异化监测任务。该技术首先通过光纤共视、卫星双向时间比对技术构建 UTC 全域时间同步网,基于 CGCS2000/WGS-84 坐标系完成空间基准统一,筑牢数据融合基础。融合环节采用特征—决策两级融合方法,在特征级层面,通过 DBSCAN 时空密度聚类与瞬时频谱指纹匹配算法,将天基 TDOA/FDOA 粗定位数据、空基 DOA 测向序列、地基 C/N_0 与频谱数据映射至统一时空格网,完成干扰事件级关联^[15];在决策级层面,通过 DS 证据理论修正异源数据置信度、消除数据冲突,形成标准化全域干扰态势数据集。在此基础上,根据监测尺度设置触发式协同调度机制。

3.2 多维特征干扰的 AI 精准识别技术

在 GNSS 干扰监测体系的核心判别环节中,针对压制式与欺骗式干扰的物理层、信号层与信息层特征差异,需构建差异化精准识别体系,解决传统单一特征识别泛化性差、隐蔽欺骗干扰识别率低的痛点。针对压制式干扰,以功率与增益层多特征联合判别为核心,可采用自适应双门限检测算法区分连续波与脉冲干扰类型,结合动态阈值的载噪比 C/N_0 序列、AGC 增益调整记录联合判定干扰存在性与强度,通过卷积神经网络实现干扰调制样式的端到端自动分类。针对高隐蔽性欺骗式干扰,联合信号结构与导航信息层开展多维度校验,通过载波相位双差一致性检验、多相关器相关峰波形异常检测识别信号层异常^[21],可采用孤立森林算法对 PVT 解算结果、星历数据开展多源一致性校验,实现2类干扰的精准识别与分类^[3]。对于弱干扰、多干扰源,未来将更多使用深度学习目标检测算法(如 Faster-RCNN),结合干扰特征库,将干扰源定位问题转化为图像目标检测问题,提升复杂干扰信号识别准确率与发现效率。

3.3 机动平台抵近精确定位与特征溯源技术

机动平台抵近精确定位与特征溯源技术可解决广域监测仅能实现粗定位、无法满足执法取证精度与溯源需求的痛点。无人机等机动平台搭载轻量化多阵元天线阵、软件定义无线电载荷与高精度 POS 系统,抵近采集信号电平特征数据,实时运行 MUSIC/ESPRIT 高分辨率 DOA 估计算法完成干扰信号来波方向解算^[19];平台沿预设航迹采集多观测点载波相位单差数据,通过基于加权最小二乘迭代的直接定位算法

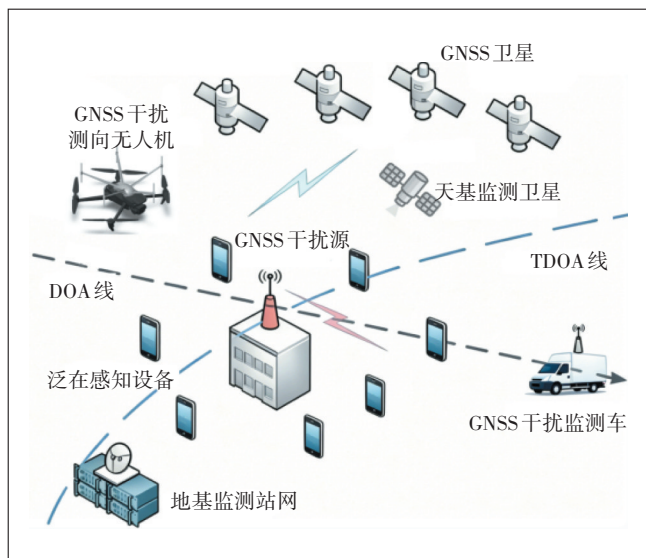


图3 空地协同的干扰源溯源模式^[19]

解算干扰源三维坐标,实现米级精确定位,算法对载波相位测量误差与平台自身定位误差具备强鲁棒性^[23]。抵近后采集干扰信号全带宽功率谱、精细调制特征等射频指纹,通过孪生神经网络提取深度特征并与云端特征库完成相似度检索,实现干扰源型号推断与历史事件关联,为执法处置提供精准情报与司法取证支撑。

4 总结

针对传统 GNSS 干扰监测单一手段无法兼顾广域覆盖、高精度溯源、快速响应与低成本部署的核心痛点,本文构建了空天地一体化 GNSS 干扰监测与溯源机制,搭建了天基、空基、地基、泛在感知4层异构感知节点架构,设计了全流程闭环协同 workflow,总结了多尺度数据融合、多维度干扰精准识别、机动平台抵近溯源三大核心技术。该机制可实现从全球普查到街区级精细化管理的多尺度覆盖,有效破解监控实时性差、覆盖盲区多、隐蔽干扰识别难、虚警率高等痛点,可根据监管需求灵活组合数据源、监测溯源技术,实现实时、精准、智能的 GNSS 干扰源监管。

当前体系仍面临跨平台数据融合、多干扰源组合识别、规模化运营成本控制等层面的挑战。未来将重点推进人工智能全流程赋能、低轨星座监测能力升级、空天地海一体化拓展三大方向的研究落地,助力国家韧性 PNT 体系建设,为国家时空信息安全提供坚实保障。

参考文献:

- [1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010,39(1):1-6.
- [2] 吴忠望,胡彦逢,徐龙威. 导航战中 GNSS 信号干扰技术特征研究[J]. 无线电工程, 2021,51(10):1031-1036.
- [3] 张鑫. 卫星导航欺骗干扰信号检测技术综述[J]. 全球定位系统, 2018,43(6):1-7.
- [4] 耿正霖. GNSS 欺骗干扰检测和抑制技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2019.
- [5] 谭显裕. GPS 在导航战中的作用及其干扰对抗研究[J]. 现代防御技术, 2001,29(3):42-47.
- [6] 黄宇达,王俊敏,赵红专,等. 一种基于宽带噪声干扰的 GPS 信号检测干扰方案设计[J]. 科学技术与工程, 2012,12(18):4409-4412,4417.
- [7] Psiaki M L, Humphreys T E. GNSS spoofing and detection[J]. Proceedings of the IEEE, 2016,104(6):1258-1270.
- [8] 闫占杰,吴德伟,刘海波,等. GPS 转发欺骗式干扰时延分析[J].

空军工程大学学报(自然科学版), 2013,14(4):67-70.

- [9] 刘睿,陈奇东,甄卫民. 一种网格化的 GNSS 干扰源定位方法研究[J]. 全球定位系统, 2015(6):16-20.
- [10] 赵高峰,陈若迅,李莹莹,等. 基于分布式无人机监测的干扰源直接定位[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(4):628-634, 641.
- [11] 熊涛. 基于 ADS-B 数据的 GNSS 干扰监测研究[D]. 天津:中国民航大学, 2024.
- [12] 郝才勇,刘恒,刘宏立. 基于 TDOA 的卫星干扰源定位方法的研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2012,24(4):442-446.
- [13] Sard K, Roth N, Zee R E, et al. Making the invisible visible: precision rf-emitter geolocation from space by the hawkeye 360 pathfinder mission [C]//32nd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites. Logan:AIAA, 2018:1-11.
- [14] 方东旭,王丽秋,薛晓宇,等. 5G 上行干扰识别和处理研究[J]. 邮电设计技术, 2022(4):55-58.
- [15] 刘畅,丁凡,田森清. GNSS 安全——网络空间安全的新战场[J]. 全球定位系统, 2019,44(1):48-53.
- [16] 唐斌,郑冲,章林峰,等. 美国导航战新进展与启示[J]. 导航定位与授时, 2020,7(4):110-116.
- [17] 王巍,赵彦雷. 卫星导航终端对抗技术综述[J]. 数字技术与应用, 2020,38(11):37-40.
- [18] 宗文鹏,贾小林,王龙,等. 基于俄乌冲突导航对抗的 GNSS 干扰源天基监测研究[J]. 舰船电子对抗, 2025,48(1):12-17.
- [19] 刘睿. GNSS 压制式和欺骗式干扰定位方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2024.
- [20] Phelts R E. Multicorrelator techniques for robust mitigation of threats to GPS signal quality[D]. Stanford:Stanford University, 2001.
- [21] Manfredini E G, Dovis F, Motella B. Validation of a signal quality monitoring technique over a set of spoofed scenarios [C]//2014 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). Noordwijk:IEEE, 2014:1-7.
- [22] Chan Y T, Ho K C. A simple and efficient estimator for hyperbolic location [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994,42(8):1905-1915.
- [23] Knapp C, Carter G. The generalized correlation method for estimation of time delay [J]. IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing, 1976,24(4):320-327.

作者简介:

景晨丰,毕业于清华大学,工程师,硕士,主要从事通信导航融合应用技术研究工作;杨晓航,毕业于香港科技大学,高级工程师,硕士,主要研究方向为无人机、机器人导航控制;叶海纳,高级工程师,博士,主要从事“5G+北斗”时空服务等研究工作;施凯,工程师,学士,主要从事智慧城市网络应用研究工作;杨杉,正高级工程师,博士,主要从事空天地一体化时空服务研究工作;杜忠岩,正高级工程师,硕士,主要从事网络设计规划和创新产品研发工作;庄涛,工程师,硕士,主要从事“5G+北斗”定位导航及应用相关工作;王颢,教授级高级工程师,双学士学位,主要从事“5G+北斗”时空服务等研究工作。