

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.05.012

GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估技术

邹云飞¹, 杨军平¹, 王豪琛¹, 刘鹏^{1,2}

(1. 青岛市光电工程技术研究院, 青岛 266109;

2. 青岛科技大学信息科学技术学院, 青岛 266061)

摘要:复杂的电磁环境是电磁辐射源集合与电波传播环境相互作用的总和。针对目前 GNSS 易受复杂电磁环境影响的问题,研究了 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估技术,提出了专用信道化监测方法、比幅与比相联合测向方法、卫星导航信号和电磁干扰信号综合分析方法以及 GNSS 复杂电磁环境影响效应分析评估方法,解决了现有通用设备在弱信号监测测向、电磁干扰信号与导航信号联合监测以及在复杂电磁环境影响效应分析评估方面存在的不足。该技术能够指导 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备的研制,为 GNSS 复杂电磁环境监测保障的工程化提供了技术支持。

关键词:GNSS;综合监测测向与分析评估;综合分析

中图分类号:TN971

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2021)05-0088-08

GNSS Complex Electromagnetic Environment Integrated Monitoring Direction Finding and Analysis Assessment Technology

ZOU Yun-fei¹, YANG Jun-ping¹, WANG Hao-chen¹, LIU Peng^{1,2}

(1. Qingdao Academy for Opto-Electronics Engineering, Qingdao 266109, China;

2. College of Information Science and Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract: The complex electromagnetic environment is the sum of the interaction between the electromagnetic radiation source set and the radio wave propagation environment. In view of the problem that GNSS is easily affected by complex electromagnetic environment, the technology of direction finding, analysis and evaluation for GNSS complex electromagnetic environment is studied. Special channelized monitoring method, joint direction finding method of amplitude comparison and phase comparison, comprehensive analysis method of satellite navigation signal and electromagnetic interference signal and analysis and evaluation method of GNSS complex electromagnetic environment impact effect are proposed. The shortcomings for existing universal equipment in weak signal direction finding, electromagnetic interference signal and navigation signal joint monitoring, and analysis and evaluation of complex electromagnetic environment impact effect are solved. This technology can guide the development of GNSS complex electromagnetic environment comprehensive monitoring, direction finding, analysis and evaluation equipment, and provide tech-

收稿日期:2020-09-28; **修订日期:**2020-11-04

基金项目:中国科学院海洋大科学研究中心重点部署研究项目(COMS2019ZB01);

青岛市光电产业智库联合基金(GDZK-2019-7)

作者简介:邹云飞(1994-),男,工程师,主要从事卫星导航对抗与电磁环境监测方面的研究。

nical support for the engineering of GNSS complex electromagnetic environment monitoring and guarantee.

Key words: GNSS; Integrated monitoring direction finding and analytical assessment; Comprehensive analysis

0 引言

复杂电磁环境是指由频域、时域、空域与能量域分布的多类型、全频谱、高密度、动态交迭的电磁辐射(或信号发射),经耦合、传导或再辐射、波传播等途径所构成的给定场所或环境。简言之,复杂电磁环境为电磁辐射源集合(包括人为电磁辐射和自然电磁辐射)与电波传播环境相互作用的总和。其对全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)安全性的影响主要体现在电磁干扰环境和空间电波环境两方面^[1]。

电磁干扰环境是指引起 GNSS 性能降低的各种电磁干扰信号,由于受 GNSS 自身设计限制,信号到地功率低,易受各种非故意干扰信号与人为故意干扰信号的影响^[2-3];空间电波环境是指影响卫星信号传播环境要素的总称,由于 GNSS 工作于 L 频段,易受电离层异常尤其是电离层闪烁的影响^[4-5]。

在人为故意干扰方面,在海湾战争和阿富汗战争中,曾多次发生干扰使精确制导武器出现偏离预定航线、误炸目标的情况^[6]。据报道,2011—2012 年,伊朗采用欺骗的方式多次捕获美国的无人机;2017 年,俄罗斯驻叙利亚赫梅米姆空军基地通过发射欺骗干扰信号避免了无人机蜂群的袭击^[7-8]。

在非故意干扰方面,2002 年,美国道格拉斯的一台摄像机由于安装失误引起了 1km 范围内全球定位系统(Global Positioning System,GPS)信号的失效^[9]。2012 年,光平方公司推出的 4G LTE 无线宽带网的地面基站对 GPS 导航接收机和设备造成严重干扰^[10-11]。此外,我国的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System,BDS)也多次监测到受到无意干扰的情况。

在电离层方面^[12],2003 年,因太阳风暴的影响美国广域增强系统的服务曾中断 30h。我国在电离层高发期多次观测到电离层闪烁导致 GNSS 信号失锁。

因此,针对复杂电磁环境的监测分析与评估是 GNSS 应用中需要重点关注的领域之一。目前,国内外相关机构针对 GNSS 复杂电磁环境监测开展了多项研究,完成了多个系统的开发。

国外对复杂电磁环境的监测与测向技术开展了深入研究,美国和欧洲都在研究利用卫星信号信息与电磁干扰信息实现对电磁干扰环境的综合监测,以准确地分析 GNSS 受复杂电磁环境影响的原因,如图 1 所示。美国海军空间与海战系统中心主持开发的机载 GPS 干扰源定位系统,基于短基线干涉仪测向体制,采用高灵敏度、快速扫描接收机实现对干扰源的监测和精确测向。GPS Silicon Valley 和加拿大 NovAtel 公司研制了电离层闪烁监测接收机以辅助复杂电磁环境的监测^[13]。英国 Chrono. Technology 公司研制的手持式 GPS 干扰监测机 CTL3500,能够检测 L1 频段内的 GPS 信号、非 GPS 信号和干扰信号^[14]。

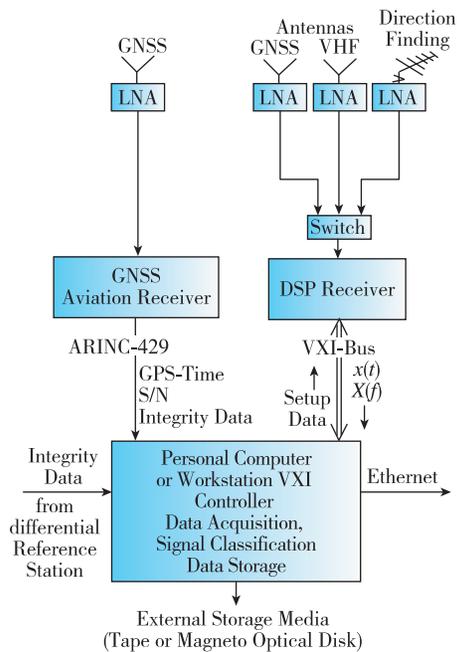


图 1 国外卫星信号和干扰信号联合监测设备
Fig. 1 Joint monitoring equipment for foreign satellite signals and jamming signals

在复杂电磁环境分析与评估方面,美国开发的全球定位系统干扰和导航工具(GPS Interference and Navigation Tool, GIANT)可对 GPS 干扰环境和干扰效果进行评估和仿真。另外,美国的定位、导航和授时(Positioning, Navigation, and Timing,

PNT)计划、Patriot Watch 系统以及欧洲的 JIMS 系统都开展了一系列的复杂电磁环境分析评估与表征的工作^[15]。

由于 Galileo 系统的频段与 GPS 存在重合问题, Galileo 系统在建设过程中非常重视其电磁环境的监测,包括启动 Galileo 电磁环境测量计划、开发 Galileo 干扰管理系统,以及对 Galileo 欧洲区域的电磁环境进行实地测量^[16]。

我国在 GNSS 复杂电磁环境监测研究起步较晚,随着我国北斗全球卫星导航系统的建成和运行,在此期间也开展了 GNSS 复杂电磁环境监测方面的理论研究与工程研究工作,取得了一定的成果。

国防科技大学、航天五院 503 所、中电科 20 所等科研单位对 GNSS 复杂电磁环境监测技术进行了研究,积累了一些关键技术。另外,中电科 5 所、22 所、54 所以及青岛光电院等单位也在工程化方面做出了一些具体成果。

目前已经建设的通用或专用的无线电监测设备,其工作频率范围虽然可以覆盖 GNSS 的主要工作频段,但通用设备仍存在以下不足:未充分考虑弱信号监测测向的解决方法与流程;在电磁干扰信号与导航信号联合监测方面存在不足;在复杂电磁环境影响效应分析评估方面存在欠缺和不足。

综上,为进一步研究 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估技术可指导设备的研发,本文重点介绍了一种 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估技术和设备,并对设备的基本工作原理和流程进行了介绍,为我国专用型 GNSS 复杂电磁环境监测保障设备工程化起到促进作用。

1 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估技术

基于 GNSS 复杂电磁环境监测保障的需求,本文研制了 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备,设备集成了电磁频谱监测单元、卫星信号监测接收单元和综合数据分析处理终端,具体设备组成如图 2 所示。设备通过专用信道化监测、比幅与比相联合测向、卫星导航信号和电磁干扰信号综合分析以及 GNSS 复杂电磁环境影响效应分析评估,实现对 GNSS 复杂电磁环境的综合监测分析与评估。为促进我国专用型 GNSS 复杂电磁环境监测测向与分析评估设备领域发展起到抛砖引玉的作用。

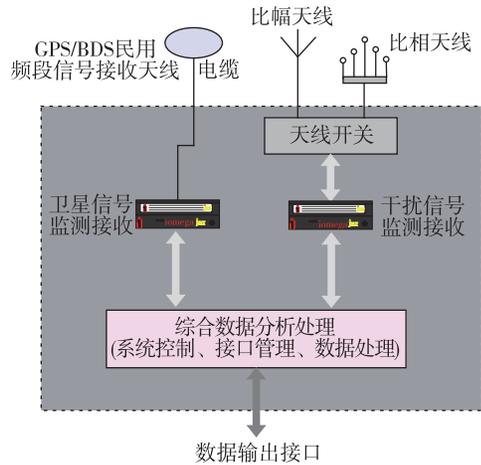


图 2 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备

Fig. 2 GNSS integrated direction finding and analysis assessment equipment for complex electromagnetic environment monitoring

1.1 专用信道化监测分析与比幅比相联合测向技术

GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备为了更好地实现对 GNSS 复杂电磁环境的监测保障,在软件界面设计方面,采用专用信道化监测分析技术,结合硬件设备,可以实现对某一组或多组 GNSS 信号的分段、联合监测,具体软件界面如图 3 所示。



图 3 GNSS 频段信道化监测

Fig. 3 Channel monitoring in GNSS frequency band

为了直观地表示出目标 GNSS 频段内存在的干扰信号特征量,以及分析统计某一目标干扰信号可能影响的 GNSS 频段信息,为 GNSS 复杂电磁环境影响效应评估提供基础数据支撑,软件还采用图形与报表的方式对 GNSS 复杂电磁环境进行展示,具体界面如图 4 所示。

比幅法测向的基本原理是根据测向天线接收的入射信号幅度来确定入射信号的到达角。其优点是测向范围大、无测向模糊、具有一定的同时信号处理能力,测量速度快、技术较为成熟,成本低。



图 4 软件频谱图与报表图

Fig. 4 Software spectrum diagram and report diagram

缺点是对天线的振幅方向图一致性要求较高,测向精度不高^[17]。

比相法测向的基本原理是通过测量空间来波信号在接收天线上形成的相位差来确定来波信号的到达角。其优点是在合理天线阵元布局、基线长度比、相位测量误差等限定条件下,测向范围较大,测向精度高。缺点是对天线阵元和接收信道的相位一致性要求较高^[18]。

因此,为了提升弱信号的测向能力,采用比幅与比相联合测向技术,比幅法采用最大信号法测向技术。最大信号法由于采用高增益天线,因此系统灵敏度高,可满足弱小信号的监测测向需求,但测向精度低;比相法采用相关干涉仪测向技术,相关干涉仪测向由于采用全向天线单元,因此系统灵敏度低,但测向精度高,测向速度快。

比幅与比相联合测向技术的实现流程如下:

1)首先采用最大信号法获得干扰信号的粗角度;

2)采用逐步逼近的方式,利用相关干涉仪测向获得干扰信号的准确到达角。

通过合理的软硬件设计与算法设计,既满足高灵敏度监测的要求,又满足高精度测向的要求,具体界面如图 5 所示。

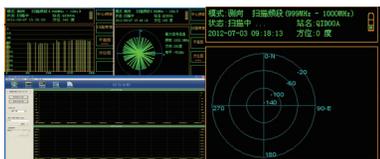


图 5 比幅与比相联合测向图

Fig. 5 Joint direction finding diagram of amplitude-ratio phase

在青岛某区域进行了演示验证,通过搭建试验环境,获取大量测试试验数据,并对数据进行统计分析,以验证比幅比相联合测向技术的有效性。

在该试验中,干扰源相对监测测向设备实际方

位为 30°,两者之间间隔 2km,利用最大信号法获取该干扰源信号的粗角度,数据如表 1 所示;朝向信号的粗角度逼近,在 1km 处利用相关干涉仪法对干扰源信号进行精准测向,数据如表 2 所示。

表 1 比幅测向数据

Tab. 1 Specific amplitude direction finding data

试验次数	1	2	3	4	5	6
测试次数	10	10	10	10	10	10
最优次数	6	7	6	4	5	7
示向度/(°)	33	29	32	30	26	28

表 2 比相测向数据

Tab. 2 Phase direction finding data

试验次数	1	2	3	4	5	6
测试次数	50	50	50	50	50	50
最优次数	36	30	32	36	29	31
示向度/(°)	29	30.5	31	28.5	31	29

大量试验数据分析证明,采用比幅比相联合测向技术可以有效地提升弱信号的测向能力,实现测向精度 $\leq 2^\circ$ (RMS))的指标要求。

1.2 卫星导航信号和电磁干扰信号综合分析技术

卫星导航信号和电磁干扰信号综合分析技术通过综合分析卫星导航信号和电磁干扰信号,实现对卫星信号及其闪烁信息、电磁干扰信息的共同监测,对电磁干扰数据、卫星导航数据和电离层闪烁数据进行多元信息融合分析,显著提升了弱信号监测能力,为 GNSS 复杂电磁环境分析与评估提供了更准确的数据与分析结果。

1)电磁干扰信号的监测、分析与识别。通过对电磁干扰信号的时域、频域、空域、调制特征和调制参数等进行监测、分析、识别,分析电磁干扰信号特征量,与基础信号数据库信号特征量进行对比,快速识别干扰信号的特征与可能辐射源,并做出快速灵活准确的反应;若是未知信号,对其信号特征进行分析建模,建立干扰信号频谱模板,进行特征入库,形成干扰数据库。

2)卫星信号状态信息监测、分析与判断。通过分析卫星信号信息,包括载噪比信息、信号幅度信息、信号相位信息、卫星星历信息、伪距信息、时间信息和位置信息等,判断卫星是否受到压制干扰和欺骗干扰的影响,以辅助对电磁干扰信号进行监测。

3)闪烁对不同 GNSS 的影响分析。卫星信号闪烁是指穿越电离层的无线电信号由于电离层不

均匀体引起的幅度衰落、信道信噪比下降以及误码率上升。通过分析卫星信号信息得到电离层影响的幅度闪烁指数与相位闪烁指数,从而进一步分析电离层闪烁对 GNSS 信号信道的影响。

4)多元信息的融合分析,基于上述结果采用多

元信息融合算法,实现数据信息融合,得到准确有效的融合分析结果。找出影响原因,并指导采取相对应的对策措施。

卫星导航信号和电磁干扰信号综合分析技术结构图如图 6 所示。

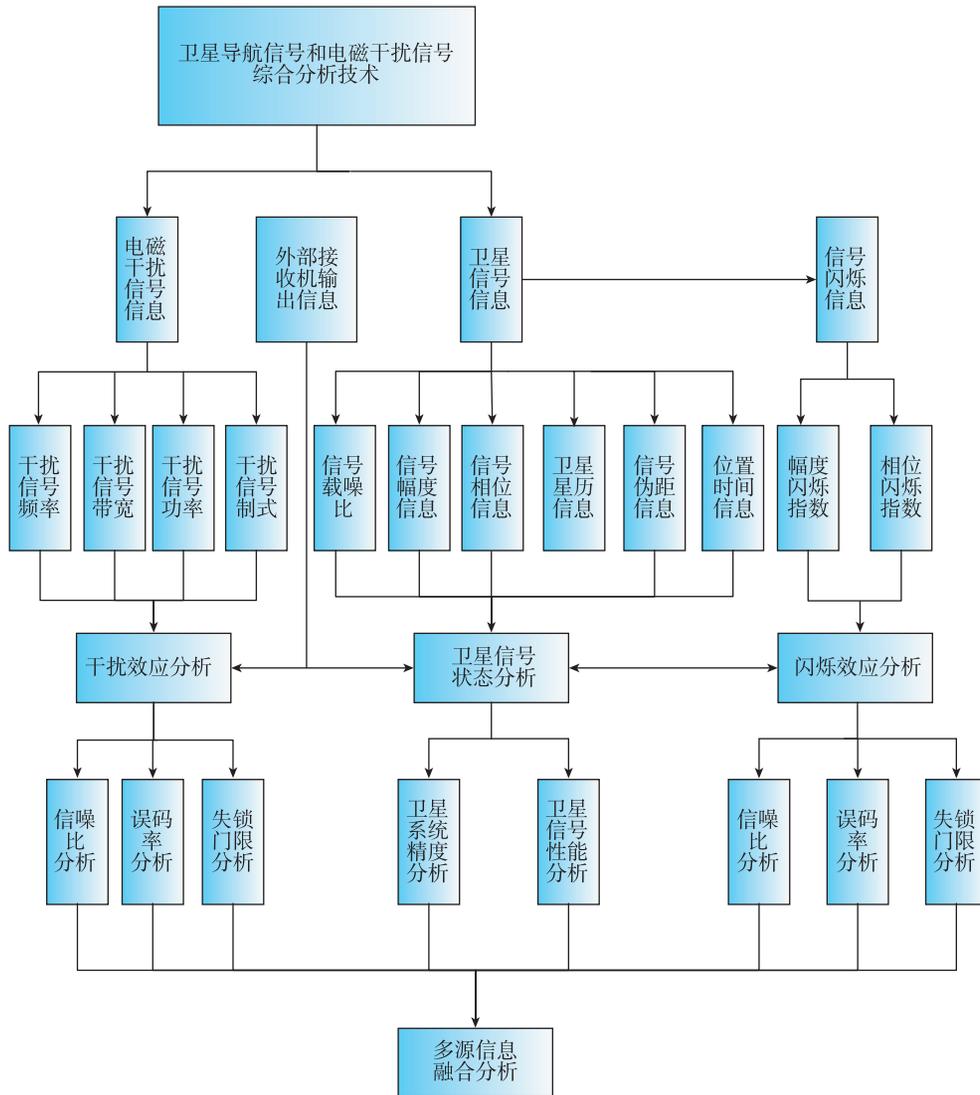


图 6 卫星导航信号和电磁干扰信号综合分析技术结构图

Fig. 6 Technical structure of satellite navigation signal and electromagnetic interference signal comprehensive analysis

通过分析测试采用的 GNSS 接收机在 GPS L1 和 BDS2 B1 频段的临界干扰功率,可得临界干扰功率约为 $-90\text{dBm} \sim -100\text{dBm}$ 。

在青岛某区域利用 GNSS 多功能干扰信号发生器(干扰源)、GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备(监测设备)等搭建验证试验场景。干扰源与监测设备之间的距离为 1km,满足开阔场条件,GPS L1 干扰信号发射功率为 16dBm,BDS2 B1 干扰信号发射功率为 6dBm,干扰信号分别设置

为点频干扰、调频干扰和白噪声干扰。监测天线采用增益约为 0dBi 的相关干涉仪天线和增益约为 12dBi 的比幅测向天线,监测设备监测灵敏度约为 -110dBm/kHz 。

分别对 GPS L1 和 BDS2 B1 在不同干扰调制信号和干扰功率下进行测试并分析测试数据,结论如表 3 和表 4 所示。

在表 3 和表 4 中,第一行表示相关干涉仪天线信号检测情况,第二行表示比幅测向天线信号检测

情况,第三行表示 GNSS 接收机状态;√表示发现干扰信号,×表示未发现干扰信号,*表示临界,干扰信号超出本底噪声约 2dB 包络。

表 3 GPS L1 测试
Tab. 3 GPS L1 test

到达天线口面 干扰信号 功率/dBm	-110	-100	-90	-80
点频干扰	×	√	√	√
	C/N 正常	C/N 下降约 6dB	临界 2 颗卫星	失锁
调频干扰	×	√	√	√
	C/N 正常	C/N 下降约 6dB	临界 2 颗卫星	失锁
白噪声干扰	×	×	√	√
	C/N 正常	C/N 下降约 3dB	卫星锁定波动	失锁

表 4 BDS B1 测试
Tab. 4 BDS B1 test

到达天线口面 干扰信号 功率/dBm	-110	-100	-90	-80
点频干扰	×	√	√	√
	C/N 下降约 6dB	临界 2 颗卫星	失锁	失锁
调频干扰	×	√	√	√
	C/N 下降约 6dB	临界 2 颗卫星	失锁	失锁
白噪声干扰	×	×	√	√
	C/N 下降约 2dB	卫星锁定波动	失锁	失锁

利用实际设备测试发现,同一频率干扰信号在选择白噪声干扰与点频、调频干扰相比,干扰信号幅度下降约 10dB。通过验证试验发现,在干扰信号较小时,引起了接收机载噪比变化,但存在监测设备不能准确检测到干扰信号的现象。

因此,通过综合分析电磁干扰信号和卫星导航信号两种干扰监测结论互为补充,可以大大降低干扰误报、漏报事件的发生,还有利于 GNSS 复杂电磁环境影响效应的分析与影响结果的表征。

1.3 GNSS 复杂电磁环境影响效应评估技术

通过研究符合 ITU 标准的 GNSS 影响效应评估准则,进行电磁环境影响效应理论计算和效应分析,为

GNSS 复杂电磁环境影响效应评估提供技术支撑^[19]。

1)GNSS 影响效应评估准则

设备根据不同的评估要求,选择确定合适的评估准则,进行 GNSS 影响效应评估,例如:

载干比准则或信干比准则,反映电磁环境对 GNSS 链路的影响程度。其中载干比是有用信号功率和噪声功率的比值。

误码率准则,考虑到 GNSS 链路系统本身的编码和调制方式等,能够较准确地反映电磁环境对 GNSS 链路系统性能的影响。

2)电磁环境影响效应理论计算

依据干扰信号的功率、带宽、中心频率与调制方式等参数,结合 GNSS 信号的相关设计参数以及信号接收过程中采用的典型抗干扰算法,进行电磁环境影响效应的理论计算。对于干扰源的影响情况从空域、时域与频域三维进行显示,空域显示干扰源的可能影响区域(以某个准则),时域显示干扰源的时间分布特点,频域显示干扰源的自身频域分布及其落入 GNSS 频段的干扰信号频域分布。

3)效应分析

效应分析主要考虑互调分析和电波传播分析两方面。

互调分析,自动计算扫描出的信号二阶或三阶互调,判别信号之间是否会产生干扰,对某一受干扰信号或预指配频率,考虑各种互调类型,并基于传播模型与互调门限电平,计算出对其可能产生互调干扰的各种频率组合,并自动生成报告。

电波传播分析,通过研究不同环境下的电波传播理论,建立不同的电波传播算法模型,调用相关的传播模型算法进行 GNSS 复杂电磁环境影响预测,包括区域覆盖和覆盖等值线计算等。分析计算结果在电子地图上进行显示,并以不同的颜色表示影响程度。

在某区域利用 GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备进行干扰信号的影响效应评估试验。采用载干比准则结合干扰信号的功率、带宽、中心频率进行电磁环境影响效应的理论计算,并结合电波传播模型进行电磁环境影响态势显示,态势图如图 7 所示。利用实测数据,结合理论分析结果对该干扰信号可能影响的范围以及影响程度进行分析显示。

2 应用前景

GNSS 复杂电磁环境综合监测测向与分析评估

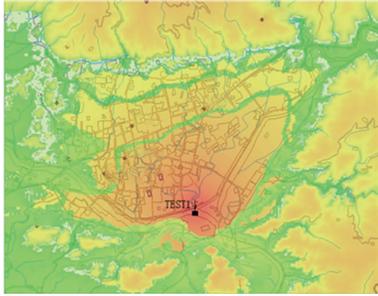


图7 电磁影响态势

Fig. 7 Electromagnetic influence situation

技术创新性地提出了卫星导航信号和电磁干扰信号的联合监测,实现了电磁干扰数据、卫星导航数据与电离层闪烁数据的多元信息融合分析,实现了多功能一体化。

设备目前已经应用于中国科学院海洋大科学研究中心的海上电磁环境监测保障项目,对北斗海洋电磁环境进行监测保障。这一设备也可广泛应用于空军场站(包括陆航及无人机地面站)、海军战舰及码头、火箭军发射阵地、武器装备实验基地、部队驻地及指挥中心等关键敏感区域的卫星导航电磁环境管理,以及民航机场通信导航用频保障、电力系统导航授时安全监测保障、金融交易场所导航授时安全监测保障等方面。

3 结论

随着我国北斗全球卫星导航系统的全面建成,针对北斗的电磁环境监测保障成为了其当前发展面临的一个重要课题。

本文开发的GNSS复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备提升了弱干扰信号检测能力,大大降低了干扰误报、漏报事件的发生;解决了压制干扰、欺骗干扰和电离层闪烁综合监测的问题;弥补了现有通用设备在弱信号监测测向、电磁干扰信号与导航信号联合监测,以及在复杂电磁环境影响效应分析评估方面存在的欠缺和不足。

GNSS复杂电磁环境综合监测测向与分析评估设备可以为要地、重点区域电磁频谱保障,重点频段电磁频谱监测等方面提供技术支持;可以为我国北斗卫星导航系统提供常态化的监测服务,为北斗卫星导航系统的全球化发展提供数据支撑。

参考文献

[1] Deshpande S M. Study of interference effects on GPS signal acquisition[D]. Geomatics Engineering Univer-

sity of Calgary, 2004.

- [2] Delange J, Frick S, Runnels J, et al. Sensor for small satellite relative PNT in deep-space[C]// Proceedings of 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Savannah, GA, 2016:955-963.
- [3] United States Government Accountability Office. GPS disruptions; efforts to assess risks to critical infrastructure and coordinate agency actions should be enhanced [R]. Government Accountability Office Reports, 2013:11-18.
- [4] Ziebold R, Dai Z, Noack T, et al. The on-board maritime PNT module-integrity monitoring aspects and first experimental result[C]// Proceedings of 14th International Scientific and Technical Conference on Marine Traffic Engineering. Swinouice, Polen, 2011: 557-568.
- [5] Thomas M. Global navigation space systems; reliance and vulnerabilities[R]. The Royal Academy of Engineering, 2011:951-964.
- [6] Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Wasle E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems[M]. Springer, 2008: 208-253.
- [7] 张佩华, 吕红丽. GNSS智能相干跟踪欺骗干扰方法及效能分析研究[J]. 现代导航, 2018, 9(3):163-171. Zhang Peihua, Lyu Hongli. Research on GNSS intelligent coherent tracking spoofing jamming method and its effectiveness analysis[J]. Modern Navigation, 2018, 9(3):163-171(in Chinese).
- [8] Psiaki M L, Humphreys T E. GPS欺骗[J]. 科技纵览, 2016(8):26-33. Psiaki M L, Humphreys T E. GPS spoofing [J]. IEEE Spectrum, 2016(8):26-33(in Chinese).
- [9] 赵爽. “光平方”4G通信网络干扰GPS事件始末[J]. 太空探索, 2012(11):42-44. Zhao Shuang. The beginning and end of the GPS interference event of “Optical Square” 4G communication network[J]. Space Exploration, 2012(11):42-44 (in Chinese).
- [10] Hewitson S, Wang J. GNSS receiver autonomous integrity monitoring (RAIM) performance analysis[J]. GPS Solutions, 2006, 10(3):155-170.
- [11] 刘悦. 天地一体化4G移动通信运营商最新发展动态[J]. 国际太空, 2012(5):28-33. Liu Yue. The latest development trend of 4G mobile communication operators integrating heaven and earth [J]. Space International, 2012(5):28-33(in Chinese).
- [12] 王娜, 寇艳红. 集成电离层闪烁仿真的数字中频GPS信号模拟器设计验证[J]. 导航定位学报, 2014,

- 2(1):55-61.
Wang Na, Kou Yanhong. Design and validation of a digital IF GPS signal simulator capable of ionosphere scintillation simulation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 2(1):55-61(in Chinese).
- [13] 晨光. 值得借鉴的美国民航无线电干扰监测系统(上)[J]. 中国无线电, 2004(4): 62-63.
Chen Guang. IMDS of American civil aviation[J]. China Radio, 2004(4):62-63(in Chinese).
- [14] 晨光. 值得借鉴的美国民航无线电干扰监测系统(下)[J]. 中国无线电, 2004(5): 62-65.
Chen Guang. IMDS of American civilaviation[J]. China Radio, 2004(5):62-65(in Chinese).
- [15] 陈军,黄静华,安新源,等. 卫星导航定位与抗干扰技术[M]. 北京:电子工业出版社,2016:524-580.
Chen Jun, Huang Jinghua, An Xinyuan, et al. Satellite navigation, positioning and anti-jamming technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2016: 524-580 (in Chinese).
- [16] 雷亮. GNSS 卫星导航系统干扰监测技术的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学,2017.
Lei Liang. Research on GNSS satellite navigation system interference monitoring technology [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2017(in Chinese).
- [17] 马珂,徐声海. 比幅测向与比相测向侦察技术比较研究[J]. 舰船电子对抗, 2020,43(2):16-20.
Ma Ke, Xu Shenghai. Research into the comparison of reconnaissance technologies of amplitude comparison direction finding and phase comparison direction finding [J]. Shipboard Electronic Countemeasure, 2020,43(2):16-20(in Chinese).
- [18] 梁双港. 基于相位干涉仪测向算法的定位技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
Liang Shuanggang. Research on location technology based on direction finding algorithm of phase interferometer[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006(in Chinese).
- [19] 陈谷仓,刘承禹,杜黎明,等. 全球导航卫星系统复杂电磁环境监测分析方法[J]. 全球定位系统,2011, 36(4):1-5.
Chen Gucang, Liu Chengyu, Du Liming, et al. Methods of monitoring and analysis for GNSS complex electromagnetic environment (EME)[J]. Global Positioning System,2011, 36(4):1-5(in Chinese).

(编辑:孟彬)