

卫星导航干扰监测技术

范广伟¹, 晁磊¹, 刘莉²

(1. 河北省卫星导航技术与装备工程技术研究中心, 石家庄 050081;

2. 中国电子科技集团公司第54研究所, 石家庄 050081)

摘要: GNSS 所面临的电磁环境越来越复杂, 各种干扰对卫星导航系统的正常运行造成了严重的影响, 因此对卫星导航系统各频段干扰的有效监测, 在保证卫星导航系统正常运行和指导抗干扰设备研制方面都有着重要的意义。分析了卫星导航系统的国内外发展现状, 归纳总结了卫星导航干扰监测方向的4类关键技术: 干扰检测技术、干扰测向技术、干扰类型识别技术及干扰定位技术, 并对每类技术简要介绍了发展现状和发展方向; 最后分析了卫星导航干扰监测系统的发展方向和发展前景。

关键词: 卫星导航; 干扰监测; 干扰识别

中图分类号: TN911.22

文献标识码: A

文章编号: 1006-0707(2013)06-0125-04

Technology of Interference Monitoring for GNSS

FAN Guang-wei¹, CHAO Lei¹, LIU Li²

(1. Satellite Navigation Technology and Equipment Engineering Technology Research Center of Hebei Province,

Shijiazhuang 050081, China; 2. The 54th Research Institute of CECT, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: GNSS are facing with increasingly complex electromagnetic environment, and various kinds of interference have caused a serious impact on the normal operation of the satellite navigation systems. Therefore, the effective monitoring of interference of the satellite navigation system is of great significance on ensuring the normal operation of satellite navigation systems and providing guidance on anti-jamming equipment development. In this paper, first we analyze the development of satellite navigation systems around the world and summarize the four categories of key technology for satellite navigation interference monitoring: Interference detection technology, interference-finding technology, interference identification technique, and interference location. For each type of the technology, we give a brief introduction of its current situation and development direction. Finally, we discuss the development direction and prospects for satellite navigation interference monitoring system in details.

Key words: satellite navigation; interference monitoring; interference identification

卫星导航系统^[1]在在军事和民用领域得到世界认可的同时, 卫星导航系统所面临的电磁环境的日益复杂以及各类卫星导航干扰技术的长足发展已对卫星导航系统的精密应用提出了严峻的挑战, 对卫星导航系统的精度、可用性、连续性和完好性都构成严重威胁。这些干扰源可能来自“无意”的干扰, 也可能来自敌方的有意干扰; 有可能来自地面, 也有可能来自空中平台, 因此有必要对卫星导航系统周围的电磁环境进行监测。通过对卫星导航系统各工作频段干扰信号

进行、分析, 对干扰信号的功率、频率、带宽等参数进行准确估计, 对干扰类型进行分类, 有助于快速定位干扰源并采取正确的应对措施, 为卫星导航系统的可靠运行提供安全保障。

卫星导航系统干扰监测的发展主要围绕以下几个方面进行: 改善测向设备的信噪比和提高对微弱信号的监测、测向能力; 提高测向准确度; 提高对干扰源的定位精度; 对干扰类型的分类与识别; 干扰对系统功能的影响评估等。干扰监

收稿日期: 2013-03-20

作者简介: 范广伟(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事卫星导航抗干扰、干扰监测研究。

测系统建设一般由监测中心站以及若干固定式、可搬移式、移动式、便携式监测站组成。各监测站对周边电磁空间干扰信号进行监测,发现各种干扰源,并输出有关干扰信号的一些重要的技术参数,而多站联合组网就可以实现对干扰源的准确定位以及对整个卫星导航系统工作环境的电磁信号监测。

1 GNSS 干扰监测技术研究现状

卫星导航系统干扰监测技术是在无线电监测的基础之上发展起来的,随着无线电应用的日益广泛,其工作环境日趋复杂,国内外针对无线电干扰监测、测向、定位均进行了大量研究,建立了通用或专用的监测系统(专用监测系统如民航无线电监测系统、卫星干扰源监测系统等),开发了各种不同的干扰监测设备,对卫星导航系统专用干扰监测系统的研究和建设也取得了一些初步成果。

1.1 国外研究现状

卫星导航干扰监测是在一般的无线电监测的基础之上发展起来的,专门针对卫星导航的资料相对较少,下面简要介绍一下国外已经应用的卫星导航的干扰监测设备。

美国国家大地测量机构(national geodetic survey, NGS)组建了“连续运行参考站”(continuously operating reference stations, CORS),该网络是服务于政府、高校、商业部门和私人的多功能网络。到2010年1月12日,该网络已经包含1400个参考站。在该系统中,包含GPS监测接收设备和数据记录设备,监测接收设备每30s记录一次数据,数据记录设备形成每小时和每天的数据文件,这些数据文件包含有接收机在每一时刻的定位信息,通过对这些信息进行后续处理,即可监测站点周围是否受到有效的GPS干扰信号。

JLOC(jammer and interference location system)是美国NAVSYS公司建设的一种较为复杂的基于网络体系结构的GPS信号干扰监测系统。该系统由主控站、干扰监测网络和客户端软件组成,能够实现对各种干扰源的检测和定位。

美国Agilent公司和TCI公司、德国Plath GmbH公司和Rohde & Schware公司、俄罗斯IRCOS公司等也都研制了性能优良的干扰源监测/测向系统。其中典型指标是频率覆盖范围25~3000MHz,频率扫描速率1000MHz/s。部分系统采用开发架构,从而可以提供快速的宽带信号监测、测向及一整套的信号分析方法(提供频率、方向、位置、编码种类、调制参数、带宽等参数)。

2009年7月,英国CHRONO TECHNOLOGY公司公布了他们的一款手持式GPS干扰监测机CTL3500。它是一款低功耗、由电池供电的干扰监测系统,能够检测L1频段内的GPS信号、非GPS信号和干扰信号。

1.2 国内研究现状

我国“北斗”二代卫星导航系统刚刚开始试运行,专门服务于北斗系统的干扰监测系统尚未开始部署,但国内有关单位已经做了一些论证工作,例如国防科技大学、航天5院503

所、中电集团第20所以及中国船舶集团系统工程部等科研院所开始对卫星导航干扰监测技术进行研究,一些学者也发表了一些关于卫星导航系统干扰监测方面的文章,例如国防科技大学的韩其位对卫星导航干扰监测的现状和发展趋势^[2]做了分析,国防科技大学的戴雪杨对卫星干扰监测的现有技术^[3]进行了总结,王哨军等对卫星干扰监测的技术实现进行了研究^[4]。国内虽然进行了一定的研究,但是由于北斗二代卫星导航系统刚刚开始试运行,专门服务于北斗导航系统的干扰监测设备还未有成熟的产品,研究大部分还是停留在理论阶段。

2 关键技术分析

针对卫星导航系统中涉及的星上、地面站、用户端各种接收机的复杂电磁环境的监测,卫星导航干扰监测技术主要包括研究卫星导航系统中干扰源的测向定位技术^[5-7]、干扰检测与告警技术^[8-11]、干扰信号频谱特征提取技术及干扰类型识别技术^[12-14]等,下面分别从这几个方面对卫星导航所涉及的关键技术进行展开论述。

2.1 干扰检测技术

干扰检测是干扰监测的基础,只有首先检测到干扰信号才能完成干扰监测的诸多后续工作。1998年,斯坦福大学的Awele Ndili和Dr. Per Enge研究了GPS接收机的自动干扰检测技术,该技术能有效检测高斯白噪声干扰、宽带脉冲干扰、相干连续波干扰、脉冲连续波干扰、多径干扰等,但是目前国内在GNSS干扰检测方面的研究还相对较少。

信号检测常用的方法有能量检测法^[15](ED)、匹配滤波器检测法^[16](MFD)、循环平稳特征检测法^[17](CFD)。但是,由于干扰信号缺乏先验知识,目前,应用在干扰检测方面的算法主要包含下面几种:能量检测法、时频分析法、循环平稳分析法、高阶统计量分析法、极化分析法及其它数字信号处理方法。就目前来说,对于无干扰先验信息的盲检测,主要应用能量检测算法,查阅关于干扰检测方面的文献,大多都是二元检测问题,并没有在给出干扰存在与否同时给出干扰信号的参数,多数检测时针对整段频谱的,并没有给出具体的干扰频点位置,干扰信号功率和干扰类型判断。高阶统计量方法因其对多种噪声都有很好的抑制作用逐渐成为信号处理的新热点^[18-19],是近年来发展较快的现代信号处理方法之一Nikias最早提出可以利用信号高阶累积量^[20]进行信号检测,高阶累积量检测性能优于普通的能量检测器。

2.2 干扰测向技术

传统测向方法的主要代表是振幅法测向和相位法测向^[21]。振幅法测向即根据测向天线接收信号的相对幅度大小来确定信号的到达角,具体又分为最大信号法、等信号法和比较信号法。相位法测向采用天线阵对导航系统工作空间进行监测,根据各阵元对同一干扰的接收相位差来确定信号的到达角。由于相对相位差来源于相对波程差与波长的比值,而射频干扰载波波长较短,相位变化对波程差很灵敏,

因此相位法测向的准确度较高。干涉仪测向通过直接或间接测量分布在空间不同位置的天线感应信号之间的相位差并求解来波的入射方位角和仰角,是相位法测向的典型代表。

空间谱估计测向^[22-23]具有超分辨率测向能力,可以实现对多个干扰的同时测向。空间谱估计方法克服了传统测向定位方法精度低的缺点,可以有效解决密集信号环境中多个辐射源的高分辨率、高精度测向定位问题。空间谱估计测向体制基于多元天线阵加多通道所构成的传感器阵列,因此空间谱估计测向系统可以在不同空间位置上同时获得多个信号样本,得到比较高的精度。常见的空间谱估计方法有 MUSIC、ESPRIT 和 Cappon 等,这些方法已经成功的应用到测向中;一些较新的空间谱估计方法还有基于高阶累积量的空间谱估计和基于多级维纳滤波的空间谱估计方法等,这些方向相比常见的测向算法或者有更好的测向性能或者有更小的运算量。

2.3 干扰识别技术

在卫星导航接收机实际应用中发现,空间环境中存在各种各样的干扰,干扰形式比较复杂,而非仅仅是稳定的窄带、宽带、脉冲等典型样式。为更好地应对实际环境中复杂多变的各种干扰,使导航系统在干扰环境中正常工作,需在对空间各种无线电信号进行长期观测的基础上,采集各种干扰样本并对其各种信号特征进行分析,建立干扰频谱模板和干扰数据库,然后再干扰信号调制方式识别中提出当前干扰特征与数据库中数据进行对比,才能快速识别干扰,做出快速灵活准确的反应。而对于干扰数据库没有的模板的信号则无法识别。

干扰信号自动调制识别的基本方法一般认为有 2 类:一种是决策论方法,另一种是统计模式识别方法。决策论方法的理论基础是假设检验,而统计模式识别方法的理论基础是模式识别。

干扰信号特征识别主要是指对信号调制方式的识别,调制识别是指对干扰信号调制种类的识别,常见的调制识别方法有:神经网络 BP 法^[24]、基于高阶累积量的调制识别方法^[25]、基于支持向量机的数字调制识别方法^[26]、基于小波分解的调制识别方法和星座图聚类分析调制识别方法^[27]。但是这些算法目前都是应用在通信信号的调制方式识别,专门针对卫星导航干扰识别的应用目前还较少,因此分析干扰特征,把这些算法应用到卫星导航信号的干扰识别中还需要进一步深入研究。

2.4 干扰源定位技术

干扰源定位一直以来都是干扰监测领域的难点。原因在于干扰源信号形式往往变化多端,如何针对各种不同的干扰源进行准确定位是干扰监测系统的一大挑战。干扰源的定位是在单个监测站实现测向的基础之上,联合多个监测站(包括固定、移动和便携监测定位站)进行组网,实现对空间电磁环境的联合监测和测向定位。常用的干扰源定位技术包括到达时间法^[28](TDOA)、到达频率法^[29](FDOA)、到达

角度法^[30](AOA)、它们相组合的方法,以及幅差法干扰源定位技术,基于多波束天线的干扰源定位方法包括基于空间谱估计的干扰源定位、基于 RBF 神经网络的干扰源定位、卫星干扰源定位与自适应调零一体化。实际应用中具体选用那种方法要根据监测网络设置和性能要求等多方面因素选取合适的定位方法实现干扰源的有效定位。

3 GNSS 干扰监测未来发展方向

通过对国内外卫星导航系统发展现状及关键技术的分析,卫星导航干扰监测将会按照以下几个方向进行发展:

1) 高性能

随着微电子技术和干扰技术的不断发展,使得为达到同等效果所需的干扰功率越来越低,设备也越来越简单,这就需要干扰监测系统有较高的灵敏度,可以有效监测到较弱的干扰信号,因此干扰监测接收机的高性能成为主要发展方向。

2) 小型化

干扰监测不但需要专门的干扰监测和数据处理基站,还需要便携的小型、手持检测设备来实现对一些特定区域突发干扰的快速监测。

3) 复合化

最终卫星导航干扰监测系统不但要实现对干扰的监测,还要实现对不同导航信号的监测,还要有组网能力、通信功能,能够实现感兴趣区域的全天候不间断监测和不同监测站之间的数据交互能力。

卫星导航干扰监测系统的研究和建设,可以实现对卫星导航系统各工作频段干扰的有效监测,为卫星导航系统的有效运行提供保障,为卫星导航抗干扰设备的研制提供技术支持,为我国高端导航接收机的研发与应用奠定基础。

参考文献:

- [1] KAPLAN E D. Understanding GPS Principles and Applications, Second Edition [M]. BEIJING: Publishing House of Electronics Industry, 2002.
- [2] 韩其位,曾祥华,李峥嵘,等. 卫星导航干扰监测技术发展现状与趋势[J]. 航天电子对抗, 2009 (6): 17-19.
- [3] 戴雪扬,徐辉. 卫星干扰监测技术的研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 13(12): 1305-1308.
- [4] 王哨军,陈天立,陈鑫. 基于 LabVIEW 的卫星干扰监测技术研究[J]. 电子测量技术, 2011, 34(4): 74-76.
- [5] 王宏禹. 现代谱估计[M]. 南京:东南大学出版社, 1990.
- [6] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 1999.
- [7] 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.
- [8] Maksym J N, Bonner A J, Dent C A, Hemphill G L. Machine

- analysis of acoustical signals [J]. Pattern Recognition, 1983,16(6):615-625.
- [9] Stephen A S Jones, Gray J Heald, Fred Dawe. Application of Novel Techniques to Passive Sonar Image Enhancement [J]. Proc I O A, 1991(13):160-167.
- [10] Cappel D V, Alinat P. Frequency Line Extractor Using Multiple Hidden Markov Models [J]. IEEE Trans On Account, Speech and Signal Processing, 1998,28:1481-1485.
- [11] CABRIC D, TKACHENKO A, BRODERSEN R W. Spectrum sensing measurements of pilot, energy, and collaborative detection [C]//Proc. IEEE Military Communications Conference. [S. l.]:IEEE Press,2006:1-7.
- [12] 田上成,王可人,金虎. 卫星通信中数字调相信号调制方式识别方法研究[J]. 信号处理,2011(2):271-275.
- [13] 陈健,阚永红,李建东,等. 通信信号自动识别方法[J]. 电路与系统学报,2005,10(5):102-108.
- [14] Dobre O A, Abdi A, Bar Ness Y, et al. Blind modulation classification;a concept whose time has come [C]//IEEE Sarnoff Symposiums. [S. l.]:[s. n.]2005:223-228.
- [15] WU J B, LUO T, YUE G X. An Energy Detection Algorithm Based on Double-Threshold in Cognitive Radio Systems [C]//2009 1st International Conference. Information Science and Engineering. Nanjing, CN:IEEE Press,2009:493-496.
- [16] WANG Haiquan, YANG Enhui, ZHAO Zhijin, et al. Spectrum Sensing in Cognitive Radio Using Goodness of Fit Testing [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009,8(11):5427-5430.
- [17] 刘小莉,朱琦. 基于能量-循环平稳特征的联合频谱检测方法[J]. 南京邮电大学学报:自然科学版,2010,30(003):34-38.
- [18] Hinich M J. Detecting a transient signal by bispectral analysis. Acoustics, Speech, and Signal Processing [J]. IEEE Transactions on,1990,38(7):1277-1283.
- [19] Hinich M J, Wilson G R. Detection of non-Gaussian signals in non-Gaussian noise using the bispectrum. [J]. IEEE Transactions on,1990,38(7):1126-1131.
- [20] Chrysostomos L Nikias, Jerry M. Tutorial on Higher-order Statistics(spectra) in Signal Processing and System Theory [J]. Theoretical Results and some Applications. IEEE Proc. 1991,3(79):278-305.
- [21] 谢东. 干涉仪测向技术研究[D]. 成都:四川大学,2003.
- [22] Paine A S. Fast MUSIC for large 2-D element digitized phased array radar [C]//Radars Conference, Proceedings of the International IEEE. [S. l.]:[s. n.],2003:200-205.
- [23] Huang Yikun, Weber, Raymond. Analysis for Capon and MUSIC DOA estimation algorithms [J]. Antennas and Propagation Society International Symposium. 2009. APSURSI'09. IEEE.
- [24] Dubey, Harish Chandra, Nandita, et al. Blind modulation classification based on MLP and PNN [C]//Engineering and Systems (SCES) 2012 Students Conference. [S. l.]:[s. n.],2012:1-6.
- [25] Orlic V D, Dukic M L. Automatic modulation classification algorithm using higher-order cumulants under real-world channel conditions [J]. Communications Letters, 2009,12(13):917-919.
- [26] Hassan K, Dayoub I, Hamouda W, et al. Automatic modulation recognition using wavelet transform and neural network [C]//IEEE 2009 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications, Lille, France, 2009:234-238.
- [27] Okhtay Azarmanesh Sven G. Bilen, New Results on a Two-Stage Novel Modulation Classification Technique for Cognitive Radio Applications [C]//MILCOM, Military Communications Conference. [S. l.]:[s. n.],2011:266-271.
- [28] 江翔. 无源时差定位技术及应用研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
- [29] 贾兴江,周一宇,郭福成. 双/多机测角频差定位算法研究[J]. 信号处理,2011,27(001):37-42.
- [30] 林雪原,骆卉子,范文强. 一种 TDOA/AOA 联合定位的算法[J]. 兵工自动化,2010,29(6):1-3.

(责任编辑 杨继森)