

文章编号:1004-9037(2013)06-0300-04

基于微波暗室 GNSS 抗干扰接收机的测试方法

郭淑霞 张 宁

(西北工业大学无人机特种技术重点实验室,西安,710065)

摘要:全球卫星导航系统(Global navigation satellite system,GNSS)抗干扰接收机的性能测试方法研究,对提高卫星导航系统在实际应用环境下的安全性与可靠性具有重要意义。本文提出了一种基于微波暗室改进的GNSS抗干扰接收机的测试方法,该方法通过扩大模拟信号的视场角范围,实现了卫星信号的多路输出、干扰信号的动态模拟。和传统的卫星信号单路输出、干扰信号静态模拟的测试方法相比,本文提出的测试方法能够逼近室外真实的测试环境,提高了抗干扰接收机性能测试的准确性。最后通过数字仿真,分析了干扰源与信号源的夹角关系及信号模拟误差对抗干扰接收机测试带来的影响。

关键词:全球卫星导航系统;抗干扰接收机测试;多路输出;动态干扰

中图分类号:TN911

文献标志码:A

Test Method of GNSS Anti-Jamming Receiver in Microwave Anechoic Chamber

Guo Shuxia, Zhang Ning

(Science and Technology on UAV Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710065, China)

Abstract: Research on performance test method of GNSS anti-jamming receiver is very important to improve the safety and reliability of satellite navigation system under actual application environment. This paper presents an improved test method of GNSS anti-jamming receiver by expanding the viewing angle range of analog signal based on microwave chamber, the method realizes multiple output of satellite signal and dynamic simulation of interference signal. Compared with the traditional test method, which are signal output of satellite signal and static simulation of interference signal, the method proposed in the paper can approximate the external reality test environment, which improves the accuracy of anti-jamming receiver performance test. Finally, through the digital simulations, the influence on anti-jamming receiver test brought by the angle of interference source and signal source and simulation error of signals is also analyzed.

Key words: global navigation satellite system (GNSS); anti-jamming receiver test; multiple output; dynamic interference

引 言

以GPS为代表的全球卫星导航系统(Global navigation satellite system, GNSS)在人类生活的众多领域中都发挥着非常重要的作用^[1-2],在军事中更是为美国创造了不可估量的效益。然而,由于卫星距离地球大约20 000 km,卫星导航接收机接收到的卫星信号十分微弱,只有约-160 dB,比接收机热噪声还要弱20~30 dB。同时又面临着各

种有意或无意的复杂电磁干扰信号,导致卫星导航接收机无法发挥精确定位的功能,因而提高卫星导航接收机的抗干扰能力已成为核心问题。

为了评估卫星导航抗干扰接收机^[3]的抗干扰性能,必须建立适当的测试环境和测试方法。目前主要分为室外测试环境和室内测试环境。室外测试环境是指在空旷地带或山谷建立的导航接收机无线测试系统;室内测试是指在室内建立的有线或微波暗室无线接收机测试系统。国外特别重视卫星导航测试试验环境的建设,早在1974年美国在

亚利桑那州建立 YUMA 试验场,作为 GPS 系统的测试环境,在沙漠地面上布置以太阳能供电的地基发射机作为伪卫星来模拟 GPS 卫星,发射的信号结构类似于 GPS 卫星信号;Etcheron 谷 GPS 测试场^[4]建在位置偏僻、四面环山的谷地,该测试场地包括 8 根带升降器的电线杆围成圆形,用于悬挂干扰天线,场地中心放置一个 GPS 抗干扰接收机的天线转台,所有干扰测试信号产生、控制、GPS 数据录取都在不远处的控制室中实现。

室外测试虽然环境真实,但这种方法存在很多问题,如可能接收到来自外界环境的射频干扰,影响了测试的精度和可信度;而且成本较高、重复性不强。然而室内测试成本低、可控性好、重复性强,得到了广泛的应用。美国空军实验室和迈阿密大学已经构建了室内无线抗干扰测试环境^[5],微波暗室内导航信号采用模拟器模拟,其发射天线安装在穹顶结构上,干扰信号发射天线安装在旁边,完成在室内环境中对 GPS 抗干扰接收机的性能测试,这种测试平台模拟环境真实、但成本很高;国内一些单位建有室内无线测试环境^[6],大部分在暗室天花板安装导航信号发射天线,导航单路输出,地面相应位置放置天线塔,干扰天线安装在天线塔滑轨的云台上,这种测试平台无法模拟卫星星座的空域位置,以及连续动态的干扰场景。

针对上述问题,本文提出了一种基于微波暗室改进的大视场角 GNSS 抗干扰接收机的测试方法,该方法是在已有微波暗室射频模拟系统的基础上,通过扩大射频模拟信号的视场角范围,采用多通道卫星导航信号模拟器^[7]的多路输出方式,构造一个能够模拟多星座卫星导航信号空域特征的半实物仿真环境,同时可以实现大角域的动态干扰信号模拟,此方法模拟的测试环境逼近了外部真实的导航信号及干扰信号分布场景,提高了抗干扰接收机性能测试的准确性。

1 信号模型^[8-10]

考虑 M 元等距线阵,相邻阵元间的距离为载波半波长,到达波与阵列法线的夹角 θ 为到达波的波达方向,其中, $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。第一个阵元为参考阵元,则线阵相对于波达方向为 θ 的信号的导向矢量表示为

$$\boldsymbol{\alpha}(\theta) = [1, e^{-j\pi \sin \theta}, \dots, e^{-j(M-1)\pi \sin \theta}]^T \quad (1)$$

假设空间中有 P 个卫星信号,波达方向分别为: $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_P$; Q 个干扰源,波达方向分别为: $\theta_{P+1}, \theta_{P+2}, \dots, \theta_{P+Q}$;则天线阵列接收到的信号表示为

$$X(t) = \sum_{p=1}^P s_p(t) \boldsymbol{\alpha}(\theta_p) + \sum_{q=P+1}^{P+Q} j_q(t) \boldsymbol{\alpha}(\theta_q) + N(t) \quad (2)$$

式中: $s_p(t)$ 为第 p 个卫星信号, $\boldsymbol{\alpha}(\theta_p)$ 为第 p 个卫星信号的波达方向; $j_q(t)$ 为第 q 个干扰信号, $\boldsymbol{\alpha}(\theta_q)$ 为第 q 个干扰信号的波达方向; $N(t)$ 为高斯白噪声。

则天线阵列接收信号的协方差矩阵为

$$\mathbf{R}_{XX} = \mathbf{E}[X(t)X^H(t)] = \sum_{p=1}^P \sigma_p \boldsymbol{\alpha}(\theta_p) \boldsymbol{\alpha}^H(\theta_p) + \sum_{q=P+1}^{P+Q} \sigma_q \boldsymbol{\alpha}(\theta_q) \boldsymbol{\alpha}^H(\theta_q) + \sigma_n^2 \mathbf{I} \quad (3)$$

式中: σ_p 为第 p 个卫星信号的功率, σ_q 为第 q 个干扰信号的功率, σ_n 为噪声功率, \mathbf{I} 表示单位矩阵。

考虑线性约束最小方差准则^[11-12] (Linearly constrained minimum variance, LCMV), 在满足一定的约束条件(通常采用式(4))下,使输出的信号功率最小,也称为最小功率准则。由于卫星导航接收机实际接收到的有用信号十分微弱,而干扰信号很强,使用 LCMV 准则求得的最优权向量可以在干扰方向形成很深的零陷,从而达到抗干扰的目的。

$$\begin{cases} P_{\min} = \min \{ \mathbf{w}^H \mathbf{R}_{XX} \mathbf{w} \} \\ \mathbf{w}^H \mathbf{s} = c \end{cases} \quad (4)$$

式中: \mathbf{s} 为 $M \times 1$ 阶矢量 \mathbf{s} 中的 \mathbf{w} 与式(6)中相同。通常令 $c = 1$, 该算法称为功率倒置算法^[12], 则有

$$[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M][1, 0, \dots, 0]^T = 1 \quad (5)$$

即 $\omega_1 = 1$, 选择 $[\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M]^T$ 的最佳值使输出功率 P 最小, 构造拉格朗日函数

$$L(\boldsymbol{\omega}) = \boldsymbol{\omega}^H \mathbf{R}_{XX} \boldsymbol{\omega} + \lambda(\boldsymbol{\omega}^H \mathbf{s} - 1) \quad (6)$$

其中 λ 为拉格朗日乘数。

令 $\nabla_{\boldsymbol{\omega}} L(\boldsymbol{\omega}) = 0$, 可得

$$\mathbf{w}_{\text{opt}} = P_{\min} \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{s} \quad (7)$$

$$P_{\min} = (\mathbf{s}^H \mathbf{R}_{XX}^{-1} \mathbf{s})^{-1} \quad (8)$$

则输出的信干噪比(SINR)

$$\text{SINR} = 10 \lg \left(\frac{\mathbf{w}_{\text{opt}}^H \mathbf{R}_s \mathbf{w}_{\text{opt}}}{\mathbf{w}_{\text{opt}}^H (\mathbf{R}_i + \mathbf{R}_n) \mathbf{w}_{\text{opt}}} \right) \quad (9)$$

式中: \mathbf{R}_s 为卫星信号协方差矩阵, \mathbf{R}_i 为干扰信号协方差矩阵, \mathbf{R}_n 为噪声协方差矩阵。

1-1 测试方法

1-1-1 传统的测试方法

目前在微波暗室内进行 GNSS 抗干扰接收机测试时,卫星信号绝大多数采用单天线注入式模拟,射频卫星信号模拟系统将某一个特定场景下的多星合成射频信号利用单天线从一个方向辐射,如

图 1 所示。此方法虽然简单易实现,但是无法模拟多个卫星空域位置特性,与实际环境不相符。

干扰信号采用静态干扰模拟(指干扰与接收机的相对位置在一次实验过程中不发生变化),通过分析抗干扰接收机的测试需求及干扰环境,在微波暗室中相应位置放置天线塔,干扰天线安装在天线塔上,并且可以调节高度,以此实现干扰信号的模拟,如图 1 所示。但是此方法仅能满足干扰与信号固定夹角的测试,无法连续变化,因而不能模拟复杂的电磁干扰信号场景。

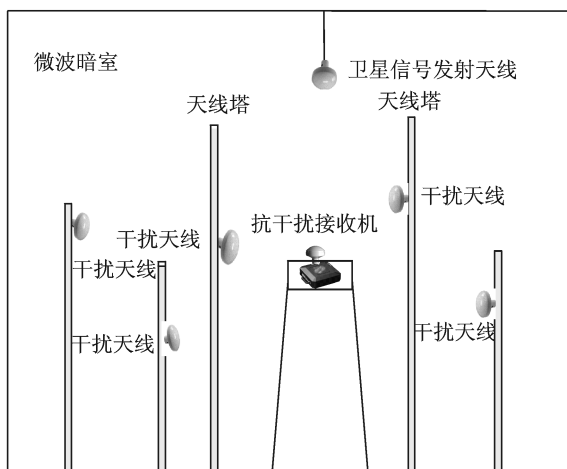


图 1 传统的测试方法框图

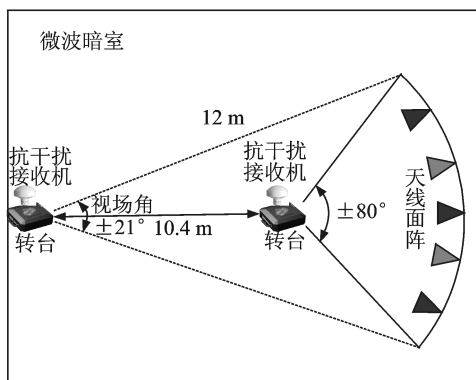


图 2 改进的测试方法原理框图

与 θ_i 、方位角与 φ_i 最接近的天线作为第 i 个卫星导航信号的辐射天线,从而确定 N_1 根辐射天线的位置。导航信号模拟器输出的 N_1 路导航信号由选定的 N_1 根天线向转台方向进行辐射,从而实现了卫星空间位置在微波暗室的空域模拟。

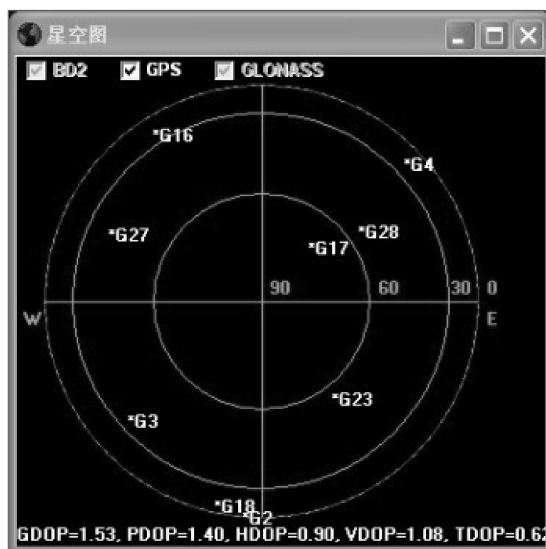


图 3 GPS 卫星星座分布图

2.2
1.2 改进的测试方法

现有微波暗室的射频面阵模拟系统布置有辐射天线,面阵为球冠结构,微波暗室内原转台(抗干扰接收机放置在转台上)距离射频面阵 l 为 12 m,视场角 β 为 $42^\circ(\pm 21^\circ)$,模拟多个卫星星座及动态干扰的空间范围有限;本文提出将原转台向面阵方向移动,进一步加大视场角,拓宽卫星星座及动态干扰的模拟范围,由公式(10)计算可知,将载有被测接收机的转台向射频面阵方向移动距离 d 为 10.4 m 时,视场角 α 将扩大至 $160^\circ(\pm 80^\circ)$,基本上可以达到上半空间角域模拟能力,如图 2 所示。

$$d = l - \frac{l \tan(\alpha/2)}{\tan(\beta/2)} \quad (10)$$

图 3 是 2012 年 12 月 15 日下午四时西安上空 GPS 卫星星座的空间分布图,横轴为东西方向,纵轴为南北方向,坐标中心为天顶方向,仰角为 90° ,最外圆周对应仰角为 0° ,卫星星座空间分布图描述了相对地面的整个上半空间星座分布情况。根据某时刻卫星星座的空间分布图,在微波暗室射频面阵模拟系统上进行位置解算,假设第 i ($i=1, 2, \dots, N_1, N_1$ 为可见星数目) 个卫星的俯仰角为 θ_i 、方位角为 φ_i ,则从面阵天线单元上选择俯仰角

根据场景设置中的空域干扰信号的运动轨迹参数,将干扰源的空间位置变化轨迹模型导入计算机,控制射频面阵模拟系统上相近位置的天线单元,通过调整面阵信号源发射功率的大小可模拟干扰源的距离变化。假设某一场景中第 j ($j=1, 2, \dots, N_2, N_2$ 为干扰数目) 个干扰源的俯仰角为 θ_j 、方位角为 φ_j ,从射频面阵天线单元上选择俯仰角与 θ_j 、方位角与 φ_j 最接近的天线作为第 j 个干扰信号的辐射天线,从而确定 N_2 根辐射天线的位置。干扰源输出的 N_2 路干扰信号由选定的 N_2 根天线向转台方向进行辐射,从而实现了复杂环境中空域动态干扰在微波暗室的模拟。

2 性能仿真与分析

3.1

2.1 信号源与干扰源的夹角

为了研究干扰源与信号源的夹角对抗干扰测试的影响,采用 matlab 仿真了卫星信号与干扰信号夹角对输出信噪比的影响,仿真中仅考虑一路卫星信号与一路干扰信号,输入干噪比为 30 dB,信噪比为 -10 dB,规定干扰信号的波达方向为 0°,改变卫星信号的波达方向,观察输出信噪比的变化。仿真结果如图 4,5 所示。

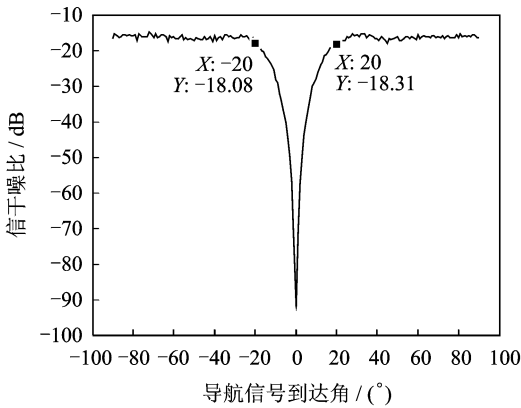


图 4 四阵元抗干扰接收机干扰与信号夹角对输出 SINR 的影响

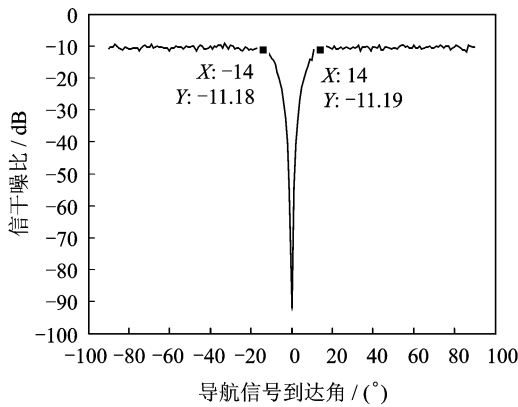


图 5 七阵元抗干扰接收机干扰与信号夹角对输出 SINR 的影响

由图 4 可以看出,卫星信号在 -20°~20°之间(与干扰信号夹角小于 20°)时,随着夹角逐渐减小,信噪比急剧下降;当干扰与卫星信号方向一致(都为 0°)时,输出信噪比降至最低;当卫星信号与干扰信号夹角大于 20°时,输出的信噪比保持在 -18 dB 左右。由图 5 可以看出,卫星信号在 -14°~14°之间(与干扰信号夹角小于 14°)时,随着夹角逐渐减小,信噪比急剧下降;当干扰与卫星信号方向一致(都为 0°)时,输出信噪比降至最低;当卫星信号与干扰信号夹角大于 14°时,输

出的信噪比保持在 -11 dB 左右。

这是由于卫星信号与干扰信号夹角较小时,抗干扰算法抑制干扰的同时也会抑制掉一部分卫星信号,导致输出的信噪比下降。比较图 4 与图 5 得出结论:随阵元数的增加,对干扰信号与卫星信号的最小夹角要求逐渐降低,而且阵元数目越多,抗干扰性能越好,输出的信噪比越大。因此在进行抗干扰测试时,模拟的卫星信号与干扰信号之间的夹角不能小于某一最小夹角(阵元数不同,最小夹角取值不同),否则会影

3.2

2.2 信号模拟误差分析

本文提出的改进的抗干扰接收机测试方法采用射频天线面阵模拟卫星信号与干扰信号,下面对信号模拟误差进行分析。

模拟误差的大小与天线面阵各相邻天线单元夹角相关,天线面阵各相邻天线单元夹角关系如图 6 所示(黑点表示天线单元,红点表示干扰或卫星信号模拟源位置)。当视场角扩大为 160°(±80°)时,抗干扰接收机与射频面阵最小距离为 1.6 m,经计算,相邻两个天线单元之间最大夹角约为 20°,所以用天线面阵单元模拟干扰或卫星信号引起的最大位置偏差为 10°,平均位置偏差在 3°~6°之间,如图 6 所示。

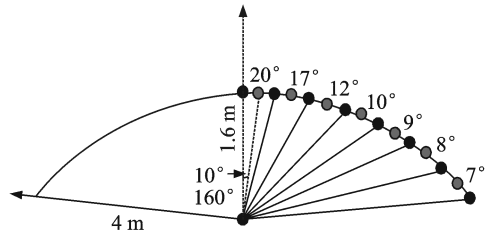


图 6 面阵各相邻天线单元夹角关系图

图 7 是七元阵抗干扰天线波束方向图,高增益波束 3 dB 宽度约为 15°,所以模拟误差仍在主波束

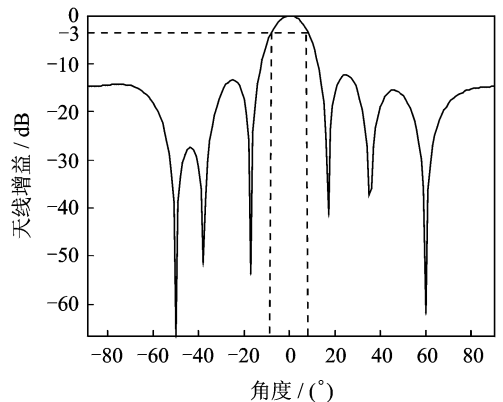


图 7 七元阵抗干扰天线波束方向图

3 dB 宽度内,对抗干扰测试不会带来太大影响;图 8 是十六元阵抗干扰天线波束方向图,高增益波束 3 dB 宽度约为 6° ,所以模拟误差有可能在主波束 3 dB 宽度之外,因此可能对抗干扰测试带来影响;

综上所述,本文中提出的大视场角抗干扰测试方法对阵元数较少的接收机测试不受影响,对阵元数较多的接收机可能存在一定误差,这是因为随阵元数的增加,所形成的主波束宽度将变窄,模拟误差可能落在主波束宽度之外,对抗干扰测试造成影响。

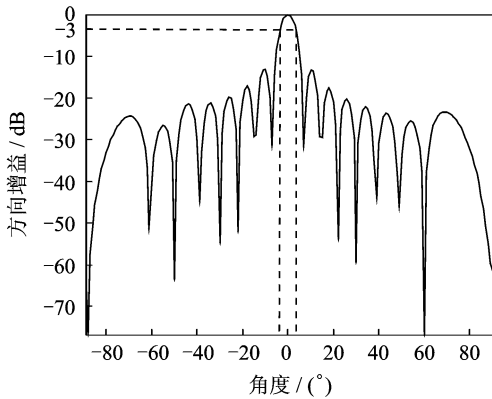


图 8 十六元阵抗干扰天线波束方向图

4

3 结束语

GNSS 抗干扰接收机测试方法有很多种,如何在已有微波暗室条件下提高抗干扰测试的准确性是本文研究的主要问题。已有微波暗室抗干扰测试方法无法在空域上模拟卫星空间位置关系以及真实的复杂干扰场景,本文提出的改进的大视场角抗干扰测试方法是通过扩大射频模拟信号的视场角范围,构造了一个能够模拟多星座卫星导航信号空域特征以及大角域动态干扰信号的半实物仿真环境,该方法逼近了卫星导航抗干扰接收机测试的真实性,提高了测试的准确性,并且分析了干扰源与信号源夹角关系及信号模拟误差对抗干扰测试的影响。

参考文献:

- [1] Thakar P V, Mewada H. Receiver acquisition algorithms and their comparisons for BOC modulated satellite navigation signal[C]//2012 International Conference on Communication Systems and Network Technologies, 2012;586-589. IEEE, USA
- [2] Meng Weixiao, Liu Enxiao, Han Shuai. Research and development on satellite positioning and navigation in China[J]. IEICE Transactions on Communications, 2012, E95B(11):3385-3392.
- [3] 苗剑峰,陈武,刘建业,等. 基于软件无线电技术的 GPS 软件接收机的研究与实现[J]. 南京航空航天大学

学报,2008,40(6):774-779.

- Miao Jianfeng, Chen Wu, Liu Jianye, et al. Design and implementation of GPS software receiver based on software-defined radio[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(6):774-779.
- [4] Hamalainen J R, Howland J W. Adaptive antenna processor test results[C]//Proceedings of IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. [S.l.]: IEEE, 1991:118-120.
- [5] Aloj D N, Alsliety M, Akos D M. A methodology for the evaluation of a GPS receiver performance in telematics applications[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2007,56(1):11-24.
- [6] 刘海波,吴德伟,卢艳娥. GNSS 抗干扰实验室平台搭建与测试方法研究[J]. 系统仿真学报,2011,23(9):1837-1841.
Liu Haibo, Wu Dewei, Lu Yane. Research on in-lab GNSS anti-jamming platform and its measurement methods[J]. Journal of System Simulation, 2011,23(9):1837-1841
- [7] 林静然,高鹏,周渭民,等. 多通道 GPS 模拟信号源[J]. 数据采集与处理,2012,27(6):677-683.
Lin Jingran, Gao Peng, Zhou Weimin, et al. Multi-channel GPS signal simulator[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012,27(6):677-683.
- [8] Yimin D, Moeness G Amin. Anti-Jamming GPS receiver with reduced phase distortions[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012,19(10):635-638.
- [9] 赵宏伟,廉保旺,冯娟. GNSS 抗干扰接收机的自适应波束形成算法[J]. 系统工程与电子技术,2012,37(7):1312-1317.
Zhao Hongwei, Lian Baowang, Feng Juan. Adaptive beamforming algorithm for space-time interference suppression in GNSS receivers[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2012,37(7):1312-1317.
- [10] Zheng Yaohua. Adaptive antenna array processing for GPS receivers[D]. Master of Engineering Science, The University of Adelaide, 2008.
- [11] Monamed E A, Zhazhong TAN. Adaptive antenna utilizing power inversion and linearly constrained minimum variance algorithms[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005,18(a):153-160.
- [12] Fa Rui, Lamare De. An adaptive LCMV beamforming algorithm based on dynamic selection of constraints[C]//2010 7th International Symposium on Wireless Communication Systems, 2010:404-407.

作者简介:郭淑霞(1965-),女,博士,副教授,研究方向:卫星定位与组合导航,E-mail:guoshuxia0223@163.com;张宁(1988-),女,硕士研究生,研究方向:卫星定位与组合导航。

IEEE, United Kingdom