

卫星导航干扰与抗干扰技术综述

武成锋, 彭元, 何子君, 付晶晶
(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要: 剖析了卫星导航中常见的干扰类别, 针对卫星导航终端提出了抗干扰技术, 并简要分析了其技术机理和技术特点。对抗干扰技术的工程应用有一定价值。

关键词: 卫星导航; 干扰; 抗干扰技术

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-8110 (2014) 02-0059-05

The Review of GNSS Jamming and Anti-jamming Technology

WU Cheng-feng, PENG Yuan, HE Zi-jun, FU Jing-jing
(Beijing institute of automation control equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: The theory and characteristic of common GNSS jamming and anti-jamming technology is analyzed in this article. On the basis, the application of common anti-jamming technology methods in weapon models at home and abroad are summarized, which have great reference values for engineering application in weapon models.

Key words: GNSS; Jamming; Anti-jamming

0 引言

导航卫星远在数万公里高空, 信号到达卫星接收机时极其微弱, 导致卫星导航很容易受到干扰。为了提高复杂电磁环境下卫星导航应用的可靠性, 抗干扰能力已成为各国军用领域卫星导航的关键技术指标。

提高卫星导航抗干扰能力主要有三个途径: 提高卫星的发射功率(如采用点波束技术), 采用新的信号体制和编码方式(如BOC信号体制和M码), 提高导航终端抗干扰能力。本文介绍针对卫星导航的干扰类型和干扰方式, 介绍基于提高卫星导航终端抗干扰能力的主要技术, 以期对后续工程研制过程中卫星导航抗干扰技术设计提供帮助。

1 干扰与抗干扰技术简介

1.1 干扰技术简介

根据干扰体制的不同, 卫星导航干扰技术可分为两类: 一是压制式干扰, 二是欺骗式干扰。

1.1.1 压制式干扰

压制式干扰就是发射强干扰信号或投放大量无源干扰器材, 能使敌方电子信息系统、电子设备的接收端信噪比严重降低, 有用信号模糊不清或完全淹没在干扰信号之中而难以或无法判别的一种电子干扰。对于针对卫星接收机的压制式干扰信号, 将使卫星接收机定位性能下降, 甚至无法稳定定位。根据干扰信号带宽不同, 压制式干扰可以分为窄带压制干扰和宽带压制干扰。具体的干扰形式多种多样, 例如连续波、扫频连续波、带限高斯白噪声、窄带/宽带调频、伪码数字相关干扰等。压制式干扰是目前针对卫星导航干扰的主要形式。美国与俄罗斯的压制式干扰机一般都可以产生一系列不同干扰体制的干扰信号, 干扰功率从几瓦到几十千瓦不等。

1.1.2 欺骗式干扰

欺骗式干扰是指发射、转发、反射电磁波(或声波), 使干扰信号与真实信号相似, 以欺骗敌方电子设备或人员, 造成敌方得出虚假信息以致

收稿日期: 2014-06-11; 修订日期: 2014-07-05。

作者简介: 武成锋(1980-), 男, 高工, 主要从事惯性导航和卫星导航方面的研究。E-mail: asoka7879@gmail.com

产生错误判断和错误行动的一种电子干扰。针对卫星接收机的欺骗式干扰,一般指发射与卫星导航信号具有相似参数的假信号,使卫星接收机产生错误的定位信息。欺骗式干扰又分为转发式欺骗干扰和产生式欺骗干扰。转发式欺骗干扰是将接收到的卫星导航信号经过接收、放大、延迟后重新广播出去。产生式欺骗信号是指由虚拟设备发射与卫星导航信号完全相同的无线信号来欺骗接收机。对于军码卫星接收机,由于导航卫星的军码信息经过严密加密,实施产生式欺骗干扰一般较困难,常见的欺骗式干扰主要指转发式欺骗干扰。

1.1.3 干扰实施方式

综合分析当前卫星导航干扰与抗干扰技术的发展状况,卫星导航干扰实施方式主要有以下几种:

(1) 分布式组网干扰

分布式组网干扰是指在一定区域内,建立全方位、立体化的分布式组网干扰系统。优点是有利于实现无缝隙干扰覆盖,能够有效控制干扰范围,有效对抗天线增强抗干扰措施,降低被探测和攻击的概率。

(2) 大功率干扰

使用大功率干扰机,使一定区域内的接收机受到阻塞,无法正常工作。大功率干扰机在战时容易被敌方反辐射导弹摧毁,一般布置在防区内重要目标附近。

(3) 多体制组合干扰

针对卫星导航抗干扰技术,采用新的干扰信号体制,同时对不同干扰信号体制进行智能化组合。

1.2 抗干扰技术简介

卫星接收机一般采用扩频解调的方式,该方式对干扰具备约30dB的抗干扰能力。在解扩频处理的基础上,卫星导航常用抗干扰技术包括基于天线的自适应滤波技术、数字波束技术,以及基于接收机的惯性辅助技术^[3-4]。

1.2.1 基于天线的抗干扰技术

1.2.1.1 自适应滤波技术

自适应滤波技术包括自适应时域滤波、自适应频域滤波、自适应空域滤波,以及组合模式自

适应空时滤波、自适应空频滤波等。自适应滤波技术相对较为成熟,达到工程化应用水平,并在武器型号中逐步应用。近年来发展起来的极化域滤波、极化域+空时域滤波技术是新的技术发展方向,在减小天线体积、增加抗干扰个数方面具有重要意义。

自适应时域滤波是在时域内对信号特征进行处理,设计自适应算法调整横向滤波器的系数,以达到抑制多个窄带干扰的目的,能够用于多径效应和回波抵消干扰处理,但对宽带干扰抑制效果不明显。

自适应频域滤波是利用离散傅里叶变换技术(DFT)将干扰信号映射到频域,调整陷波器位置或阈值来抑制干扰,但主要针对窄带干扰,对宽带干扰效果不明显。

自适应空域滤波技术的典型应用为采用天线阵列和自适应调零算法。自适应调零算法利用扩频系统将随机码信号深埋在热噪声中的特点,使进入接收机的总输入功率降至最低。采用自适应算法修正天线的加权值,在天线阵方向图的干扰源方向形成零点,从而有效地抑制干扰对卫星导航的影响。但其抗干扰源的个数受限于天线阵元数,对于M阵元的天线阵仅能抑制M-1个干扰,并且在抑制干扰信号的同时也抑制了同方向卫星信号的正常接收。基于自适应空域滤波的自适应调零天线对窄带和宽带干扰都能达到很好的抑制效果,算法简单,易于实现,近几年在工程中得到快速发展。

自适应空时滤波(STAP)是将自适应时域滤波和自适应空域滤波相结合,对于窄带干扰不需要浪费空域滤波的自由度,同时降低零点对卫星信号接收的影响,还可以自动补偿天线信道的宽带幅相差异,提高宽带干扰的对消效果。其难点在于计算复杂度较高、信号处理复杂、大量权值敛性的综合考虑等,需要采用降维处理等手段加以改进。

自适应空频滤波(SFAP)则是将自适应频域滤波和自适应空域滤波相结合,首先将输入信号变换到频域,根据频谱将数据分为几个不同中心频率块数据,针对每块数据采用自适应加权处理,滤波数据合成后进行逆变换,之后输出送入后段

处理。该方式可以充分发挥频域和空域两种处理技术的优势，对存在大量频域分离的连续波干扰，具备更好的调零效果。自适应空频滤波计算量高于自适应空时滤波，同等计算量条件下，空时滤波算法优于空频滤波。

极化域滤波技术是近年发展起来的抗干扰新技术。极化域滤波技术充分利用极化信息，弥补天线阵列中天线的数量不足，达到用较少的天线阵元数量，实现抗更多干扰的目的。可以用一个天线实现抗一个宽带干扰，4 个阵元抗 6 个宽带干扰。

自适应滤波技术的概况如表 1 所示。

表 1 自适应滤波技术概况

Tab. 1 Adaptive filter technology overview

序号	滤波类型	技术特征	抗干扰类型	技术实现难度
1	自适应时域滤波	时域	窄带	低
2	自适应频域滤波	频域	窄带	低
3	自适应空域滤波	空间调零	窄带、宽带	适中
4	自适应空时滤波	空间调零 + 时域	窄带、宽带	复杂
5	自适应空频滤波	空间调零 + 频域	窄带、宽带	较复杂

1.2.1.2 数字波束技术

数字波束技术是在阵列天线和信号处理基础上发展起来的一项新技术。其基本思想是利用天线阵的阵方向函数乘积定理，通过在天线阵元上加权以控制天线阵的方向函数，达到控制天线阵方向图动态的在有用信号方向上产生高增益窄波束。采用数字波束技术后，卫星接收天线方向图平面示意图如图 1 所示。对于 n 阵元天线阵列，采用数字波束技术后，在理论上，接收卫星信号信噪比可以提高 $10\log(n)$ 倍。

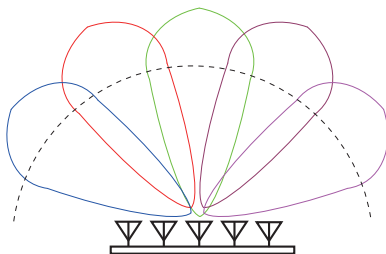


图 1 数字多波束示意图（虚线为单天线方向图）

Fig. 1 The schematic diagram of Digital Beam Formatting

由图 1 还可以看出，采用数字波束技术后，卫星接收天线的方向图由传统的全向变为锥状，使得指向卫星有用信号的数字波束变窄，从理论上来说，只有进入到波束范围内的干扰信号才有干扰作用。因此，应用数字波束技术后，抗干扰源的个数不受限制。对于某一方向较强的干扰信号，通过在干扰信号方向控制波束形成相位零点抑制干扰；对于大面积范围的干扰信号，采用波束控制技术，可以灵活地调整数字波束跟踪卫星的方向，在抗干扰的同时，保证对卫星信号的跟踪和接收。数字波束技术对于多径干扰具有较强的抑制作用。

随着惯性/卫星深组合技术的发展，在惯性姿态的辅助下，波束动态跟踪能力大大提高，能够满足导弹武器系统高动态、大机动的要求。

1.2.2 基于惯性信息辅助卫星接收机抗干扰技术

除接收机本身基于扩频处理机制带来的抗干扰能力外，基于惯性信息辅助的卫星接收机可以大大提高抗干扰能力。惯性信息辅助技术是指利用惯性信息，辅助卫星信号的捕获与跟踪，提高卫星导航高动态适应性和抗干扰能力，实现高动态、抗干扰的兼顾。根据惯性辅助程度以及接收机环路架构的不同，可粗分为半耦合设计和全耦合设计。

惯性辅助半耦合设计是指利用惯性导航信息，对接收机码环和载波环进行辅助时，接收机环路架构基本不变，其结构如图 2 所示。惯性辅助半耦合设计工程实现简单，可有效减小由载体机动引起的动态跟踪误差，压缩接收机环路带宽，从而在提高卫星接收机高动态适应性的同时，进一步提高抗干扰能力。在惯性信息辅助下，卫星接收机可适应加速度 $50g$ 、加加速度 $30g/s$ 以上的高动态运动，并可将抗干扰能力提高约 $5 \sim 8dB$ 。

惯性辅助全耦合设计相对传统接收机跟踪环路设计思路有较大不同，对经典跟踪环路进行了重构，其结构如图 3 所示。其中，传统环路中的鉴相器、环路滤波器功能由惯性/卫星组合滤波器替代。对于每一路卫星信号，对应一路独立的解算通道，惯性信息、卫星信息深层次耦合，互相辅助，达到组合性能的最优。设计良好的惯性/卫星深组合系统，抗干扰能力可提高约 $10 \sim 15dB$ 。

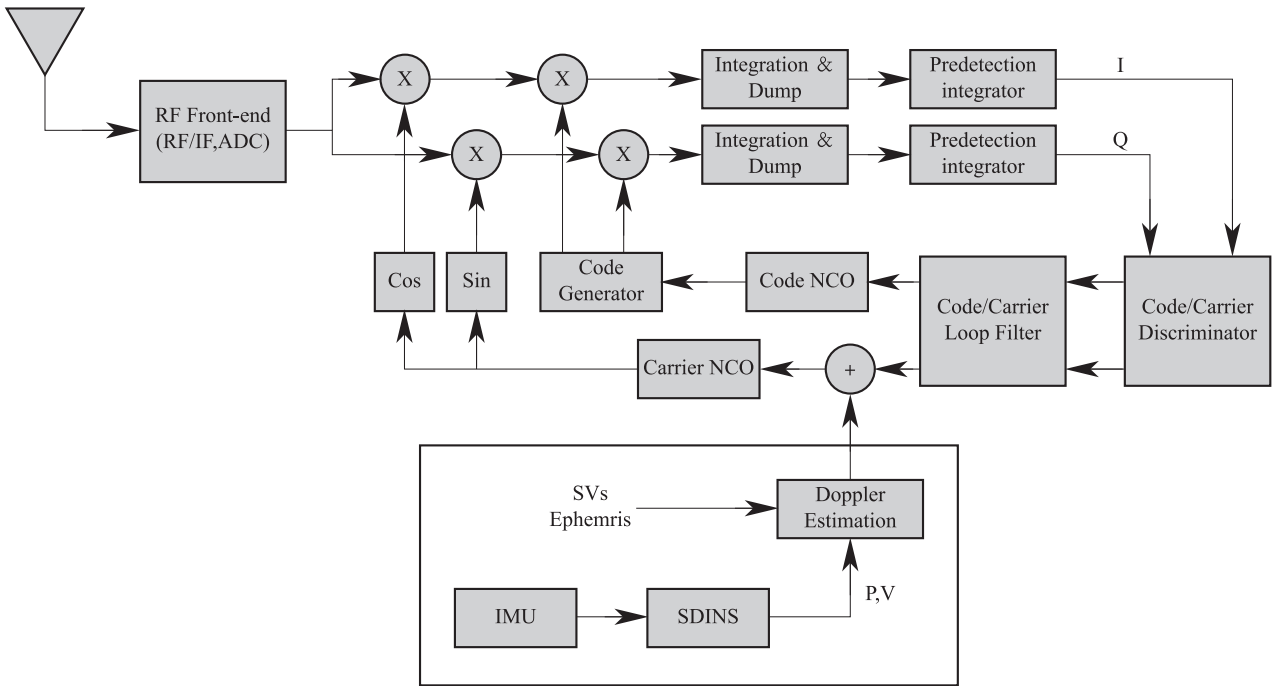


图 2 惯性辅助半耦合环路结构图

Fig. 2 The Inertial aided receiver Loop

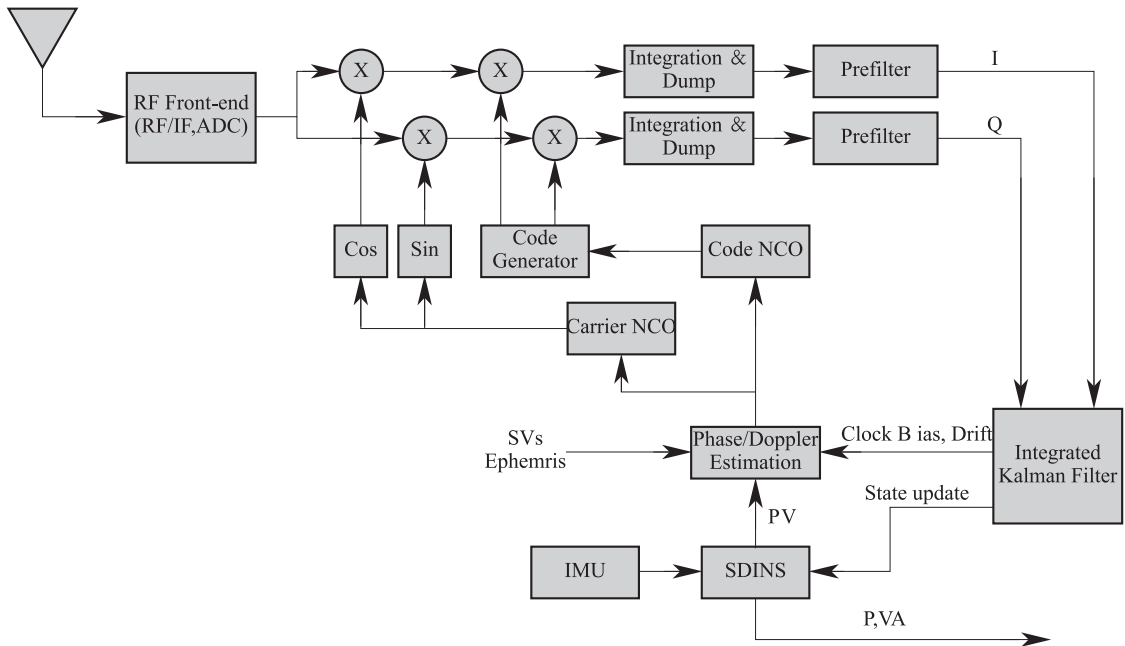


图 3 惯性辅助全耦合环路结构图

Fig. 3 The deeply coupled Inertial aided receiver loop

2 国内外抗干扰技术典型应用

2.1 以自适应调零天线为代表的空域滤波抗干扰

美国 GPS 联合计划办公室 1998 年列出 29 种技术以提高 GPS 的性能，其中提高卫星导航接收机抗干扰性能的技术包括 GPS 与 INS 组合技术、

自适应调零天线技术、抗干扰滤波器技术、直接 Y 码捕获技术以及波束形成技术等。在提升卫星接收机抗干扰性能方面，美军导航战的一个重要方向是采用自适应空域调零，在干扰方向形成零陷，使干信比提高 40 ~ 45dB。截止到 21 世纪初期，自

适应调零天线技术一直是西方国家提高 GPS 接收机抗干扰能力的主要方法,典型产品有意大利马可尼公司的 ANV-161 机载 GPS 接收机,英国普莱赛公司的 PA9000 系列 GPS 接收机,美国柯林斯公司的 Navstar CRPA,英国 STC 公司 STC2400 系列天线控制器等。

在国内,以自适应调零天线为代表的空域滤波抗干扰是一种典型应用,天线阵元个数多为 4 个。可有效抑制 1~3 个干扰信号,抗单干扰能力约 60~65dB,抗三干扰能力约 50~55dB。

2.2 以空时/空频自适应滤波为代表的抗干扰

空时/空频自适应抗干扰技术的思想是将一维的空域滤波推广到时间/频域与空间的二维域中,形成空时/空频二维处理结构。在阵列设计、最优准则选取方面提供了更大的选择余地。空时/空频自适应滤波兼具空域滤波和时域/频域滤波的优势:1)在不增加阵元个数的前提下,可有效提高抗干扰个数;2)提高空域滤波零陷质量,有效改善零陷附近卫星信号的正常接收。

空时/空频自适应滤波是国内的一个研究热点,技术日趋成熟,且当前主流硬件平台能够胜任增加的算法计算量,整机功耗也在可接受范围内。

2.3 以数字波束技术为代表多种滤波相结合的综合抗干扰

为了进一步提高抗干扰能力,以数字波束技术为代表的多种滤波相结合的综合抗干扰是另一种典型应用,主要抗干扰技术包括数字波束形成、自适应调零和惯性辅助等,天线阵一般多于四个阵元。该典型应用不仅提高了抗干扰个数,而且大幅度提高了抗多干扰能力。

美国在 2000 年左右开始以数字波束技术为代表的多种滤波相结合的综合抗干扰技术攻关研究,并将该类产品定位为“第三代”产品。2005 年左右,综合采用数字波束等抗干扰技术的 GPS 卫星接收机在军事领域开始列装,在三类跟踪情况下,综合抗干扰能力优于 120dB。典型产品包括雷锡恩公司应用于 F-35 联合战机的 DAR 数字抗干扰接收机、应用于战斧巡航导弹的 AGR 抗干扰接收机,

以及洛克希德马丁公司和罗克威尔公司联合研制的 G-STAR 抗干扰模块等。

国内“十一五”期间开始数字多波束抗干扰卫星接收机技术研究,目前已突破核心关键技术,相关产品陆续投入工程应用。

3 结论

本文对卫星导航专业领域常用的干扰与抗干扰技术进行了系统阐述,介绍了自适应滤波技术、数字波束技术和惯性信息辅助技术的技术机理和技术特征,分析了抗干扰技术在工程中的典型应用,对抗干扰技术应用研究具有理论和工程指导意义。

参考文献

- [1] Capt Jeremiah A. Shockley and Lt Scott Zetterstrom, 50 Years of the Central Inertial and GPS Test Facility [C], AIAA 2009-1724.
- [2] Mario M. Casabona and Murray W. rosen, Discussion of GPS Anti-Jam Technology, GPS Solution, Vol. 2, No. 3, pp. 18-23 (1999).
- [3] Moeness G. Amin, Alan R. Lindsey, Liang Zhao and Yimin Zhang, Anti-Jamming Techniques for GPS Receivers, AFRL-IF-RS-TR-2001-186, Final Technical Report, September 2001.
- [4] C. Hay, S. Lath, Anitjam GPS for Precision Guided Munitions, AIAA 99-448 1.
- [5] Alison Brown, NAVSYS Corporation, Performance and Jamming Test Results of a Digital Beamforming GPS Receiver
- [6] Schmidt, G. and Phillips, R., INS/GPS Integration Architectures, and INS/GPS Integration Architecture Performance Comparisons NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, LOW-cost Navigation Sensors and Integration Technology, October 2008. GJB 891A-2001, 电子对抗术语. [Terminology for electronic warfare.]
- [7] 周治宇, 陈豪. 卫星导航定位抗干扰技术分析. 空间电子技术 [J], 2006, (4).
- [8] 赵江. 导航定位 GPS 制导武器的抗干扰技术. 战术导弹控制技术 [J], 2006, (2).
- [9] 党明杰. 自适应调零天线技术在组合导航抗干扰中的应用 [J]. 全球定位系统, 2008, (3).
- [10] 陈向东, 王明诚. 基于波束控制的卫星导航接收机抗干扰算法研究 [J]. 全球定位系统, 2009, (2).