

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.05.014

导航接收机抗干扰算法综述

常青, 王昊, 李显旭

(北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要:近年来,导航接收机抗干扰技术发展迅速,成为导航领域的研究重点。介绍了抗干扰技术的发展历程,分析总结了目前主要的抗干扰方法及算法特点,并讨论了未来关键需求和发展方向,对接收机抗干扰技术的研究和工程应用有一定意义。

关键词:卫星导航;单天线;阵列天线;压制性干扰

中图分类号:TN972

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)05-0083-06

The Review of Anti-jamming Algorithms about Navigation Receiver

CHANG Qing, WANG Hao, LI Xian-xu

(School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The anti-jamming technology of navigation receiver is developing rapidly in recent years, and has become the focus in the field of navigation. The anti-jamming history and the main techniques and algorithms are summarized, then the critical needs and future directions are discussed, which is meaningful for the research and engineering application about anti-jamming technology.

Key words: GNSS; Single-antenna; Array antenna; Blanket-jamming

0 引言

随着卫星导航系统的完善与发展,其在全球经济和社会发展中发挥着越来越大的作用。近年来,我国北斗卫星导航系统发展迅速,无论在军用领域或是民用领域都关系着国家的安全和发展。但是卫星信号到达地面后只有大概-130dBm,随着电磁传播环境的复杂化,原本微弱的导航信号很容易受到无意或有意干扰,导致接收机无法定位。所以,导航接收机必须具备较强的抗干扰能力,这也是衡量接收机性能的关键指标,而相应的抗干扰技术也成为导航领域研究的焦点。

目前,针对导航信号的干扰类型大致分为压制性干扰和欺骗性干扰,由于压制性干扰产生相对简

单直接,对接收机威胁突出,所以相应的抗干扰技术发展更迅速,也逐渐形成了一个完整的研究体系^[1]。本文主要针对压制性干扰,介绍了相应抗干扰技术的发展历程,并对近年来一些主流的抗干扰方法及算法的原理、性能进行梳理总结,指出了未来抗干扰技术的需求和发展方向。

1 抗干扰技术发展历程

导航接收机抗干扰技术可以大致分为基于单天线的方法和基于阵列天线的方法,当然,惯导辅助和军码直捕等手段也具备抗干扰的能力。但本文重点介绍基于单天线和阵列天线的方法,首先介绍单天线抗干扰方法的发展。

由于卫星导航信号大都采用扩频信号体制,所

收稿日期:2017-03-14;修订日期:2017-05-06

基金项目:国家自然科学基金(61471021)

作者简介:常青(1962-),男,教授,主要从事卫星导航及抗干扰技术研究。E-mail:changq@263.net

以针对扩频系统的抗干扰方法可以用于导航接收机。20世纪70年代,加利福尼亚大学的Milstein教授等将线性横向滤波器用于扩频系统来抑制窄带干扰^[2],也就是现在常用的自适应FIR滤波器;80年代Milstein教授又首先提出了基于快速傅里叶变换在频域滤除干扰的方法^[3],随后,有学者提出了不同的设置滤波门限的方法;也在80年代,Rao和Kung教授提出了直接性IIR陷波器抑制窄带干扰,目前IIR陷波器仍是使用较多的方法;90年代Leslie A和Poor教授基于抑制多址干扰的方法提出了码辅助技术抗窄带干扰,并对码辅助技术进行了总结^[4];近年来,部分学者又提出了基于分数阶傅里叶变换(FRFT)和小波包分解的方法来消除干扰,并发表了相关文章。

基于单天线的方法结构简单,算法灵活,只需在现有接收机结构中增加自适应滤波模块即可,无需改动天线和射频通道,目前应用场合也较多,但一般只能抑制窄带干扰,对于阻塞式干扰却无能为力。为此人们引入了阵列天线从空域滤除干扰,但是抗干扰的个数受到阵元数量的限制, M 阵元最多能抑制 $M-1$ 个干扰。2000年Mitre公司的Fante教授将空时自适应滤波(STAP)应用于GPS接收机当中,基于最小功率算法抑制干扰,从而提高了阵列自由度,改善了多干扰情况下抑制窄带干扰的能力^[5-6]。随后Myrik和Zoltowski教授提出了多级维纳滤波算法,降低了矩阵求逆带来的较大计算量,提高了算法的收敛速度^[7]。同时也有学者提出了空频自适应滤波(SFAP),该方法降低了自相关矩阵阶数,从而降低了计算复杂度。在此基础上,针对具体的抗干扰应用环境,又有学者提出了多波束形成技术,不仅对干扰进行抑制,同时也对信号形成有效增益,进而提升抗干扰性能^[8]。信号的导向矢量可以通过测向算法得到,也可采用盲波束形成的算法。在实际应用中,7阵元情况下可以对抗干扰性能提升5~8dB。除了算法层面的改进,也有学者引入了极化敏感阵列,结合空域滤波的方法,可以增加抗干扰的个数^[9]。

导航接收机抗干扰技术在国外发展较早,例如Mayflower公司、Navsys公司、麻省理工学院等无论在芯片研发还是算法研究方面都取得了较大进展。美国军方的F-16、F-22等战机均装备了7阵元的空时滤波处理模块,“战斧”巡航导弹也采用了基于自适应调零的抗干扰接收机^[10-11]。国内近10年

来,相关领域也发展迅速,其中北京理工大学、清华大学、国防科技大学、北京航空航天大学等高校研究了空时、空频、波束形成、极化滤波等技术,并在FPGA平台上实现算法,对算法进行改进融合,同时对天线阵列、射频特性等方面的研究也取得了较大进展^[12]。

2 常用抗干扰方法及算法分析

2.1 基于单天线的方法

基于单天线的方法可以分为时域和变换域两大类。首先介绍时域方法,其次介绍变换域方法。

2.1.1 时域方法

(1) 自适应FIR滤波器

窄带干扰相对于导航信号和噪声信号,其样本值之间有很强的相关性,时域滤波主要利用自适应线性预测滤波来估计出干扰信号,再从天线收到的信号中减去干扰信号。一般自适应预测滤波器基于最小均方误差(MMSE)准则,求出维纳-霍夫解,具体求解的方式有Levinson-Durbin算法、最小均方(LMS)算法、递归最小二乘(RLS)算法等。其中LMS算法简单,计算量较小,但步长因子控制着算法稳态和收敛速度,需要设定在合理范围内;而RLS算法收敛速度快,误差小,但该方法使用已输入的每个时刻的信号来计算权值,所以计算量较大,不利于实时性设计。

(2) 自适应IIR陷波器

相对于FIR陷波器,IIR陷波器不需较高的阶数就可以实现陡峭的滤波特性,有效降低了计算复杂度,也减弱了对导航信号的失真。IIR陷波器分为直接型和格型两种结构,其中格型IIR陷波器具备较好的收敛性,陷波带宽可以灵活调整,在实际中应用较为广泛。一般处理过程是把A/D采样后的中频信号分为两路,一路进行FFT做频谱分析,检测干扰的频率和带宽,确定频率参数和带宽参数,生成IIR陷波器,然后对时域信号进行滤波。自适应IIR陷波器的关键在于准确估计干扰信号频率及带宽,即确定频率参数 b 和带宽参数 a 。在实际中由于FFT点数有限,不可避免地存在频谱泄露,所以还需要频谱校正技术,常用的方法有相位内插法等;而带宽参数 a 则一般选取较大数值, a 越大,陷波带宽越窄,降低对卫星信号造成的失真,但也可能无法包含所有干扰频率,在实际工程中可将一个窄带干扰划分成多个频带,每个频带内对应一

个 IIR 陷波器来抑制干扰,这样 α 取较大数值,即保证了陷波器对干扰的抑制效果,也降低了其对卫星信号的影响^[13-14]。其原理如图 1 所示。

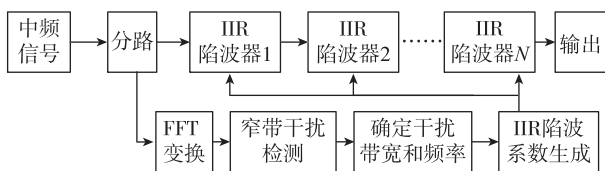


图 1 自适应 IIR 陷波器原理图

Fig. 1 The schematic diagram of adaptive IIR notch filter

(3)码辅助技术

码辅助技术是基于扩频系统中的多址检测技术发展而来的,多址技术利用扩频码之间的相关矩阵,求逆后乘上接收信号可以消除干扰。同样对于窄带干扰,根据其于扩频信号的速率关系,对应等效虚拟为 M 个扩频用户。后来基于 MMSE 准则又形成了自适应码辅助技术,通过 RLS 方法迭代求逆计算抗干扰权值,进而滤除干扰。

2.1.2 变换域方法

(1)基于 FFT 滤波

导航信号淹没在噪声下,频谱呈白噪声特性,若在某个频点出现特别大的幅值,可以认为该频点受到强干扰。频域滤波方法重点在于可以迭代自适应调整干扰判决门限,保证最大限度地滤除干扰,同时对信号的影响减到最小。处理过程一般先对接收信号进行加窗重叠,然后经过 FFT 变换,自适应计算门限值,对干扰进行判决和抑制,然后再经过 IFFT 变换回到时域^[15]。

(2)基于 FRFT 滤波

分数阶傅里叶变换(FRFT)的概念由 Namias 在 1980 年提出,是对傅里叶变换的分数化,即对时域信号旋转 $\frac{\pi}{2}$ 的分数倍。该方法的优势在于可以较好地抑制扫频干扰,一般需要增加干扰识别模块,以选择不同的变换基,当存在频谱较宽的扫频干扰时进行 FRFT,对于普通的点频或窄带干扰则退化为 FFT。设置门限的方法较多,和基于 FFT 方法类似,常用的自适应门限为:频域谱线标准差乘以门限系数加上均值。其原理图如图 2 所示。

(3)基于小波包分解滤波

小波包分解也是一种信号的时频分析方法,相比传统的短时傅里叶变换(STFT),它具有多分辨率性能和良好的时频局部化特性,能够处理非平稳

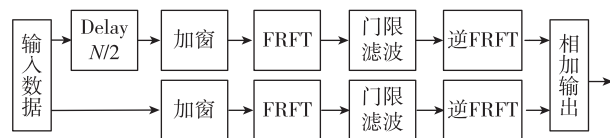


图 2 基于 FRFT 抗干扰原理图

Fig. 2 The schematic diagram of anti-jamming based on FRFT

信号,迅速定位窄带干扰的频率范围,通过将相应的子带小波包系数置零,然后进行信号重构,滤除窄带干扰。基于小波包分解的方法重点在于定位窄带干扰所在的子带,也就是确定一个合理的阈值。这需要引入一个能量聚集度的概念,也有学者称为频谱均匀度:即父节点系数的方差比上左右子节点系数方差的乘积的开方值,然后和设定的阈值相比,将大于阈值的对应系数置零,阈值可以基于统计固定下来,也可以根据干扰强度自适应计算^[16]。另外,小波包分解的层数对干扰抑制效果也有一定影响,分解层数要权衡窄带干扰的抑制效果以及小波包重构信号后的失真程度。

(4)基于压缩感知滤波

将压缩感知用来抑制窄带干扰是一种较新的方法,近年来不少学者在深入研究。首先要对信号进行稀疏表示,由于窄带干扰在频域上满足稀疏性,所以可以设计相应的正交基,投影得到稀疏信号,然后设计观测矩阵,最后重构窄带干扰并从信号中滤除干扰^[17-18]。重构算法一般有贝叶斯稀疏重建算法、基追踪(BP)算法、正交匹配追踪(OMP)算法等,其中 OMP 算法的计算复杂度较小,所以在实时性要求较高或数据量较大情况下应用更广泛^[19]。

基于单天线抗干扰方法的总结如表 1 所示。

表 1 单天线抗干扰方法总结

Tab. 1 The summary of anti-jamming techniques based on single-antenna

方法分类	抗干扰方法	算法类别	性能分析
时域方法	自适应 FIR 滤波器	LMS 算法	算法简单,计算量小,但收敛速度慢,积累误差。
		RLS 算法	算法稳定,收敛速度快,计算量大,不利于实时性设计。
	IIR 陷波器	—	干扰抑制能力好,但需要 FFT,进行频谱分析。
	自适应码辅助	—	性能稳定,但算法原理相对复杂,需进行矩阵求逆,或采用 RLS 迭代求逆。

续表

方法分类	抗干扰方法	算法类别	性能分析
变换域方法	基于 FFT	—	算法简单,对干扰滤除彻底,但对卫星信号也会造成损失。
	基于 FRFT	—	属于时频分析方法,可抑制扫频干扰,性能较佳。
	基于小波包分解	—	可以处理非平稳信号,算法过程相对复杂。
	基于压缩感知	—	算法相对复杂,需要重构干扰信号,目前研究较多,工程应用较少。

2.2 基于阵列天线的方法

基于阵列天线的方法主要有自适应调零、STAP、SFAP、波束形成技术等。总体来说,这些方法的基本思想是一致的,都是基于天线阵形成零陷对消干扰,在此基础上又不断改进发展。

(1) 自适应调零

自适应调零是较早使用的方法,是最基本的空域滤波,每个阵元对应一个权值,一般采用最小功率算法自适应生成抗干扰权矢量。该方法实现简单,无需知道卫星信号来向,以及天线阵型,具备盲自适应能力。但是该方法在干扰功率较小时效果不理想,滤除干扰个数受阵元数量限制。

(2) 空时自适应滤波

空时结构是在每个阵元后增加延时单元构成空时域二维滤波,提升了阵的自由度,以及多干扰情况下抗窄带干扰性能^[20]。算法上一般较多采用最小功率准则或线性约束最小方差准则等,为了避免高阶矩阵求逆过程,也有采用多级维纳滤波来计算抗干扰权值^[21]。目前 STAP 是这代抗干扰技术的主流方法。

(3) 空频自适应滤波

SFAP 是将各阵元接收的信号变换到频域来处理,首先要加窗,然后 FFT 把各路信号对应的同一频点划分为一个子带,对每个子带计算抗干扰权值,算法与空时相同,然后对该频带信号进行滤波,所有频带处理完后进行 IFFT,得到抗干扰后的信号^[22],处理过程如图 3 所示。SFAP 和 STAP 是对应等效的,两种方法的抗干扰性能也是一致的,但是 SFAP 降低了样本协方差矩阵的阶数,空时结构中阶数为 $M \times N$,空频结构中阶数为 M ,其中 M 为阵元个数, N 为每个阵元后抽头系数个数。

(4) 波束形成技术

波束形成技术是在以上方法基础上增加导向

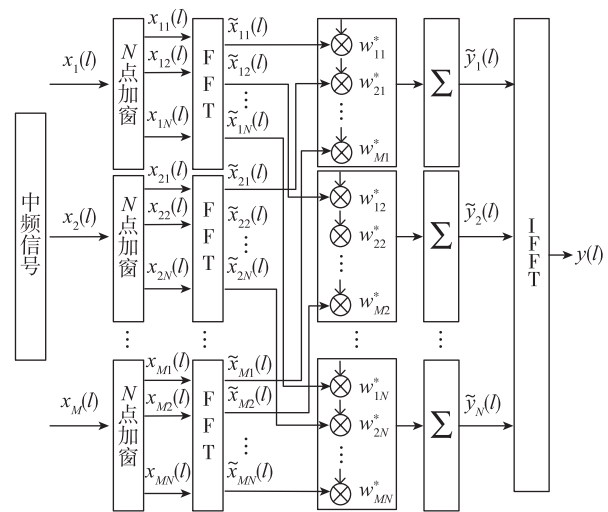


图 3 空频自适应滤波流程图

Fig. 3 The flow chart of SFAP

矢量计算抗干扰权值,不仅对干扰形成零陷,同时也对信号形成一定增益,也可避免干扰和卫星信号角度十分接近时,零陷对卫星信号造成的较大失真,该方法可以分为信号来向已知和未知两种情况。

当信号来向已知或通过计算可以确定时,则可以在计算抗干扰权值时加入信号的导向矢量即可;在工程中也有先自适应调零再波束形成的方法,即接收机先抗干扰,正常定位后获得方位角、俯仰角,然后通过计算得出信号方向矢量,再带入到抗干扰权值的计算过程中即可。当信号来向未知时,需要先对卫星信号进行测向,测向算法有 CAPON 算法、MUSIC 算法、ESPRIT 算法等^[23]。其中 MUSIC 算法较为常用,具体需要先对接收信号进行解扩使信号增强,然后再求接收信号的样本协方差矩阵,并进行特征分解确定信源个数以及噪声子空间,最后计算空间谱函数进行峰值搜索测得信号来向。这类方法相对成熟,但阵元数需要多于能接收到的卫星数,而且当干扰较强时,测向结果会出现较大误差^[24]。近年来,也有一些基于卫星信号周期或伪码周期进行测向的算法,这类方法相对复杂,但测向结果优于传统测向算法。

在应用中,也有无需测向直接进行盲波束形成的方法,这种方法按接收机通道进行波束形成,每个通道对应一个波束,将 M 个波束的角度按序排列,保证对天空的覆盖范围,这样卫星信号落入波束内就对信号形成增益,如果干扰落入波束内,则舍去该通道,最终要保证有 4 个以上的通道正常工作。这种方法的优势在于无需知道信号方向或进行测向,只需按序排列波束,覆盖天空,从而提升卫

星信号载噪比。

(5)极化滤波

极化滤波一般采用极化敏感阵列,通过调整天线加权系数,改变极化匹配因子,利用信号与干扰间不同的极化方式滤除干扰。该方法一般结合空域滤波,可有效提升阵列的自由度^[25-26]。

基于阵列天线方法总结如表2所示。

表2 阵列天线方法总结

Tab. 2 The summary of anti-jamming techniques based on array antenna

抗干扰方法	性能分析
自适应调零	算法简单,对于强干扰抑制较好,但受阵元自由度限制。
空时自适应滤波	多干扰情况下,抗窄带干扰性能得到提升,多级维纳滤波算法避免高阶矩阵求逆。
空频自适应滤波	抗干扰性能与空时相近,降低了矩阵阶数,但需要FFT。
波束形成技术	对信号形成增益,进一步提升抗干扰性能,但方法也相对复杂。
极化滤波	需采用极化敏感阵列,可有效提升阵元自由度,4阵元可以抑制6干扰

3 抗干扰技术关键需求和发展方向

(1)超强抗干扰需求

在实际中,干扰个数往往较多,例如飞机上的机载设备自身也会对接收机产生干扰,很容易突破阵元自由度,这就需要增加阵元,但增加阵元又会出现阵元间的互耦加剧、通道一致性变差等新的问题。另外,随着美军兆瓦级干扰机的出现和装备部队,军方对抗干扰能力提出了越来越高的需求。国外相关产品抗干扰能力已达到120dB。

(2)高动态及复杂运动场景抗干扰需求

飞机、导弹上的抗干扰接收机随载体做高速运动,干扰方向动态变化,可能很快就偏出了零陷。一般需要加快抗干扰权值的更新时间,但为了保证算法的收敛性,每次处理的信号数据不能太少,所以还要提高采样率,但是这些措施不能从根本上解决问题。目前也有一些加宽零陷的方法,但是对卫星信号也会造成一定损失^[27]。

另外,一些小型导弹在飞行中自旋,自身遮挡导致阵列天线不能连续接收信号,抗干扰性能急剧恶化,并且即使不存在干扰,接收机自身也会失锁无法定位。目前,较好的方法是增加一副天线保证信号可以持续正常接收,但是接收机抗干扰性能仍

会受到影响。

(3)对阵列和射频通道校正的需求

阵列和射频通道的精准性是接收机抗干扰的前提,现实中往往存在天线方向图偏差、阵元间互耦、通道幅相不一致等问题^[28],这需要进行标定校准才可以保证出色的抗干扰性能,在接收机工作中实时校正可以提高抗干扰性能10~20dB。

(4)降低抗干扰对信号失真的需求

抗干扰算法以及零陷对消过程对卫星信号都会带来一定的畸变,导致跟踪环路中相关函数展宽、码相位和载波相位误差增大等问题,这需要研究新的减少信号失真的算法,并对误差进行定量估计和补偿,以减小抗干扰过程对接收机最终定位结果的影响^[29-30]。

以上需求其实也是目前接收机抗干扰技术的研究重点和发展方向,未来接收机对抗干扰性能的要求会更高、更全面,要适应多种恶劣的条件和战场环境。同时,也有很多学者开始关注导航安全问题,也就是抑制欺骗性干扰,目前研究成果颇多。虽然还没有成熟完善的方法,但已成为下一代导航接收机抗干扰技术的重要内容。

4 总结

本文对导航接收机抗干扰技术的发展历程进行介绍,梳理总结了目前主要的单天线和阵列天线的抗干扰方法以及相应的算法特点,并提出了未来接收机抗干扰技术的关键需求及发展方向,有助于抗干扰技术的研究和工程应用。

参考文献

- [1] Mohamed E A, Tan Z Z. Adaptive antenna utilizing power inversion and linearly constrained minimum variance algorithms [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(2):153-160.
- [2] Li L M, Milstein L B. Rejection of narrow-band interference in PN spread-spectrum systems using transversal filters [J]. IEEE Transactions on Communications, 1982, 30(5):925-928.
- [3] Milstein L B. Interference rejection techniques in spread spectrum communications [J]. Proceedings of the IEEE, 1988, 76(6):657-671.
- [4] Poor H V. Active interference suppression in CDMA overlay systems [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(1):4-20.
- [5] Fante R L, Vaccaro J J. Wideband cancellation of in-

- interference in a GPS receive array [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2000, 36(2):549-564.
- [6] Klemm R. Principles of space-time adaptive processing [M]. The Institution of Engineering and Technology, 2006.
- [7] Goldstein J S, Reed I S, Scharf L L. A multistage representation of the Wiener filter based on orthogonal projections [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1998, 44(7):2943-2959.
- [8] Brown A. Performance and jamming test results of a digital beamforming GPS receiver [R]. Navsys Corp in Colorado Springs Co, 2002.
- [9] 刘玲, 曾浩, 刘陆军, 等. 调零天线中的空域极化域联合抗干扰算法[J]. 重庆大学学报自然科学版, 2015, 38(4):146-151.
- [10] 邓志鑫, 赵彦雷, 司东晓. GNSS 终端抗干扰技术综述[C]//中国卫星导航学术年会电子, 2011.
- [11] 郭艺. GPS 接收机空时抗干扰理论与实现关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [12] 刘泳庆. 卫星导航系统多维域抗干扰技术研究[D]. 北京理工大学, 2016.
- [13] 龚文飞, 孙昕, 吴嗣亮. 卫星导航接收机陷波器级联抑制窄带干扰研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(12):2704-2710.
- [14] 龚文飞, 孙昕. 卫星导航接收机时域窄带干扰抑制滤波器设计与性能分析[J]. 信号处理, 2011, 27(11):1774-1779.
- [15] Ouyang X, Amin M G. Short-time Fourier transform receiver for nonstationary interference excision in direct sequence spread spectrum communications [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 51(4):851-863.
- [16] 朱立为, 蒋品群. 基于小波包变换的自适应阈值抑制窄带干扰[J]. 数据采集与处理, 2013, 28(6):843-847.
- [17] Selen Y, Larsson E G. RAKE receiver for channels with a sparse impulse response [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(9):3175-3180.
- [18] 姚彦鑫. GPS 窄带干扰的压缩感知多级原子库估计[J]. 电讯技术, 2016, 56(1):1-6.
- [19] 李智勇. 基于压缩感知的脉冲超宽带系统窄带干扰抑制问题研究[D]. 山东大学, 2014.
- [20] Zatman M. Circular array STAP [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2000, 36(2):510-517.
- [21] 王永良, 彭应宁. 空时自适应信号处理[M]. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [22] Gupta I J, Moore T D. Space-frequency adaptive Processing (SFAP) for radio frequency interference mitigation in spread-spectrum receivers [J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2004, 52(6):1611-1615.
- [23] Beck A, Eldar Y C. Doubly constrained robust capon beamformer with ellipsoidal uncertainty sets [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(2):753-758.
- [24] He Y, Song G, Wang C, et al. Simulation research of the influence of random amplitude disturbance on mvdr beam former [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 121-126:196-203.
- [25] Zeng W, Wang L, Wang Y, et al. Joint polarized and spatial domain anti-jamming method for GNSS [C]// IEEE International Conference on Signal Processing, Communication and Computing. IEEE, 2013:1-5.
- [26] Guo Y H, Chang Q M, Yu D J, et al. An improved polarization-space adaptive beamforming algorithm [J]. Tien Tzu Hsueh Pao/Acta Electronica Sinica, 2012, 40(6):1279-1283.
- [27] Zatman M, Guerci J R. Comments on "Theory and application of covariance matrix tapers for robust adaptive beamforming" [with reply] [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2000, 48(6):1796-1800.
- [28] Liu Q, Matsumoto K, Iwata T, et al. Effect of phase pattern of antennas onboard flying spin satellites on doppler measurements [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(1):405-419.
- [29] O'Brien A J, Gupta I J. Mitigation of adaptive antenna induced bias errors in GNSS receivers [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(1):524-538.
- [30] De Lorenzo D S. Navigation accuracy and interference rejection for GPS adaptive antenna arrays [D]. Stanford University, 2007.