



王红霞 潘成胜 宋建辉 著

星载智能天线 波束形成技术

XINGZAI ZHINENG TIANXIAN
BOSHU XINGCHENG JISHU



國防工業出版社
National Defense Industry Press

星载智能天线波束 形成技术

王红霞 潘成胜 宋建辉 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

星载智能天线波束形成技术/王红霞,潘成胜,宋建辉著. —北京:国防工业出版社,2013. 1

ISBN 978-7-118-08435-1

I. ①星… II. ①王… ②潘… ③宋… III. ①星载仪器—智能天线—自适应波束形成 IV. ①V443

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 255956 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 4 7/8 字数 180 千字

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前 言

卫星通信是现代通信的主要方式之一,它在军事应用和航天科技领域具有重要的地位。由于通信卫星的暴露性和广泛使用的广播型的通信方式,其上、下行链路容易受到干扰。基于数字波束形成技术的智能天线可以在数字域内动态地形成所需要的各种波束,同时具备抑制干扰和低截获概率的能力,所以它被认为是“所能想到的卫星星载设备中最好的抗干扰手段之一”。为此本书从抗干扰的角度研究分析了同步轨道卫星上的智能天线的波束形成技术,重点研究了当通信信号分别为窄带信号、宽带信号及跳频通信信号时所采用的智能天线波束形成方法,这对实现安全的卫星通信具有重要的理论意义和实用价值。

本书分为7章。第1章介绍了星载智能天线的研究背景、目的意义以及国内外的研究现状。第2章分析了Ka频段星地链路信号的传播特性。卫星通信信道的信号传播的机理、特性及数学建模方式,是智能天线技术的基础,而且Ka频段电波受气象因素的影响更加显著,因此本章重点分析了降雨、降雪对星地链路信号性能的影响,并建立了典型天气条件下的Ka频段卫星通信信道及系统的仿真模型。第3章介绍了智能天线的基本控制算法。首先介绍了智能天线的基本理论,包括天线阵列原理、阵列信号处理基础,然后介绍了部分智能天线的基本控制算法。第4章在分析了最小均方误差(LMS)算法的优点和缺点的基础上,提出了LMS改进算法。由于LMS算法的运算量较少、结构简单并且在抗干扰信号方面也具有较好的效果,因此该算法较适用于星上窄带信号的波束形成,但是,该算法存在着收敛速度与稳态误差不易同时满足,以及受到干扰时跟踪效果较差

的问题,因此,提出了改进的变步长 LMS 波束形成方法。第 5 章针对星上宽带信号的波束形成问题,提出了恒定束宽波束形成方法。首先分析了现有恒定束宽波束形成方法,如傅里叶变换法、Chebyshev 加权法、Bessel 函数法及最小二乘估计法。分析表明这些方法都能取得恒定束宽的效果,但仅仅是对波束的旁瓣级、主瓣宽度、阵增益、稳健性和逼近精度等指标中的一两个进行优化,进而提出了恒定主瓣低旁瓣频率不变恒定束宽波束形成方法。第 6 章针对跳频通信系统,提出智能天线的波束形成方法。在详细分析了跳频通信对智能天线波束形成的影响以及多种干扰方法对跳频通信信号干扰可行性的基础上,针对能有效干扰跳频通信信号的干扰方法,提出跳频系统的智能天线波束形成方法。第 7 章是智能天线技术前景与展望。

在本书的编写过程中得到了徐步荣、朱德成等专家的大力支持和热情帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在疏漏和错误,恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	研究背景	1
1.2	国内外研究现状	4
1.2.1	智能天线的国内外研究现状	4
1.2.2	波束形成技术的国内外研究现状	7
第 2 章	Ka 频段星地链路信号传播特性分析	18
2.1	Ka 频段卫星通信的信道特性分析	19
2.1.1	降雨衰减特性分析	19
2.1.2	大气吸收特性分析	25
2.1.3	云雾衰减特性分析	30
2.1.4	沙尘衰减特性分析	32
2.1.5	大气闪烁特性分析	34
2.2	Ka 频段卫星通信信道模型建立	36
2.3	信道模型仿真分析	38
2.4	信道模型理论计算分析	40
2.5	本章小结	43
第 3 章	智能天线基本控制算法	44
3.1	引言	44
3.2	智能天线基础	44
3.2.1	天线阵列理论	44
3.2.2	窄带信号模型	47

3.2.3	阵列输入矢量的自相关矩阵	49
3.2.4	自适应天线主波束和方向性图零点的控制 ...	51
3.3	智能天线控制算法	53
3.3.1	LMS 算法	53
3.3.2	RLS 算法	54
3.3.3	DMI 算法	55
3.3.4	MUSIC 来波方向检测算法	58
3.4	本章小结	61
第 4 章	变步长 LMS 算法	62
4.1	LMS 算法性能分析	62
4.2	LMS 改进算法——基于误差归一化的变步长 LMS 算法	65
4.3	算法仿真及性能分析	69
4.3.1	参数取值分析及算法性能验证	70
4.3.2	不同变步长 LMS 算法仿真分析	71
4.4	算法的抗干扰能力分析	73
4.5	本章小结	75
第 5 章	宽带信号恒定束宽波束形成方法	76
5.1	宽带恒定束宽波束形成	76
5.1.1	宽带信号模型	76
5.1.2	宽带恒定束宽问题的提出	78
5.1.3	宽带恒定束宽波束形成方法分析	79
5.2	恒定主瓣低旁瓣的频率不变恒定束宽波束形成 方法	90
5.2.1	频域频率恒定波束形成器的结构	90
5.2.2	CMLS - FDFIB 中的 DOA 估计	92
5.2.3	CMLS - FDFIB 宽带恒定束宽波束形成	94
5.3	CMLS - FDFIB 方法性能分析	96

5.4	抗干扰能力分析	98
5.5	本章小结	100
第 6 章	跳频系统的智能天线波束形成方法	101
6.1	跳频对智能天线波束形成的影响	101
6.1.1	跳频通信系统的波束形成实现方式	101
6.1.2	跳频对波束指向及信号增益的影响	105
6.2	跳频系统的波束形成方法	109
6.2.1	干扰跳频通信信号方法的分析	109
6.2.2	抑制干扰跳频信号的波束形成方法	115
6.3	一种抑制 PTRI 的波束形成方法	121
6.3.1	系统结构模型	121
6.3.2	干扰抑制及波束形成方法	123
6.4	抑制 PTRI 波束形成方法性能分析	127
6.4.1	验证部分驻留时间干扰的干扰能力	128
6.4.2	抑制 PTRI 波束形成方法分析	129
6.5	本章小结	130
第 7 章	前景与展望	132
参考文献		135

第1章 绪 论

1.1 研究背景

卫星通信系统,尤其是高轨道卫星的通信系统,具有通信距离远、覆盖范围广、不受地理条件限制、通信频带宽、传输容量大、适于多种类型的业务传送、可进行多址通信、通信质量高,以及既可为固定终端又可为移动终端(车载、船载、机载和个人终端)提供通信等一系列特点,在现代通信中具有十分重要的地位,近十年来获得了迅速的发展。由于通信卫星的开放性,以及广泛采用的广播型通信方式,通信卫星的上、下行链路易受干扰。因此如何有效地抑制各种干扰是卫星通信领域必须要解决的关键问题之一^[1]。

目前抗干扰通信技术主要有频域抗干扰技术、时域抗干扰技术、空域抗干扰技术以及频域、时域、空域抗干扰技术的组合技术,其中空域抗干扰技术主要通过智能天线实现^[2,3]。智能天线也叫自适应天线,其内涵主要是指天线中的系数可以根据一定的自适应算法进行自适应更新调整。智能天线的基本思想是:以多个窄波束自适应地跟踪多个期望用户,在接收模式下,抑制来自波束主瓣以外的信号,实现空域抗干扰;在发射模式下,使期望用户接收的信号功率最大,同时使波束主瓣以外的非期望用户受到的干扰最小。星载智能天线就是安装在通信卫星上并在信号入口处抑制干扰的新型天线,其关键技术之一是数字波束形成(Digital Beam Forming, DBF)技术^[4-6]。

基于数字波束形成技术的智能天线可以在数字域内动态地形成所需要的各种波束。当天线处于接收状态时,能保证在期望信

号方向上的增益不受影响的同时,将方向图零响应点自适应对准干扰信号方向,起到抑制干扰的作用;当它处于发射状态时,产生的波束主瓣增益较高旁瓣较低,降低了通信信号被敌方截获的概率。由于智能天线同时具备抑制干扰和低截获概率的能力,所以它被认为是“所能想到的卫星星载设备中最好的抗干扰手段之一”^[6]。

目前,智能天线的数字波束形成技术可以分为三大类:基于参考信号的波束形成方法、基于波达方向(Direction of Arrival, DOA)的波束形成方法和基于信号结构特性的盲波束算法,而应用最为广泛的就是基于波达方向(DOA)的波束形成方法和基于参考信号的波束形成方法^[6]。星上智能天线的数字波束形成方法,在保证算法性能的基础上,对算法的抗干扰能力及算法的计算复杂度等指标提出了更高的要求,并且算法要宜于硬件实现。基于参考信号的波束形成方法中的最小均方误差法(Least Mean Square, LMS)是目前智能天线波束形成方法中应用最广泛的方法之一。一方面,LMS算法的运算量较少,容易硬件实现;另一方面,LMS算法能自适应锁定并跟踪所需信号,同时把天线方向图的零响应点对准干扰信号,因此在抗干扰信号方面具有较好的效果。由于LMS算法存在收敛速度与稳态误差特性不能同时满足的缺点,进一步研究LMS算法及其改进算法,提高算法的性能,使其更加适用于卫星通信,是非常有意义的工作。

随着通信业务需求量越来越大以及战场实时的要求,原来单一的电话、窄带数据正逐渐向话音、图像、文本、视频和数据等多媒体业务方向发展,这就要求卫星通信必须实现宽带数据传输以满足新业务的需求。由此可见,宽带数据业务将是卫星通信的重要发展方向之一^[1,3]。目前,卫星通信的可用频谱资源非常有限,宽带数据传输必然要向更高频率发展。由于Ka频段具有可用带宽宽、干扰少、设备体积小特点,近年来开始逐渐采用Ka频段来实现宽带数据传输,例如,美国的Milstar军事卫星就采用Ka及毫米波频段跳频通信^[3]。那么,星上智能天线如何处理宽带信号、

宽带信号对智能天线将产生怎样的影响,将是需要解决的另一个关键问题。

对于宽带信号,若采用常规的加权求和波束形成方式,那么各个频率上的波束图是不一样的,这会导致从波束最大响应轴以外的方向上入射的信号波形发生失真,直接影响系统对波形的估计及对目标特性的识别等一系列功能。因此,对宽频带信号处理技术的探索将具有十分重要的意义。解决这一问题的基本方法就是设计恒定束宽波束形成器,使得基阵系统对应不同频率的输入信号具有相同的波束图,以有效地保护输入信号的波形,为后续目标识别等功能提供高质量的无失真数据。目前,恒定束宽波束形成方法有很多种,如傅里叶变换法、Chebyshev 加权法、Bessel 函数法、最小二乘估计法等,这些方法一般都能取得恒定束宽的效果,并能用数值计算的方法实现。虽然这些方法都能产生恒定的主瓣宽度,但是当存在强干扰的情况下,算法的稳健性和逼近精度都会受到很大影响。因此,研究恒定主瓣低旁瓣的高精度恒定束宽波束形成方法是非常必要的。

进入 20 世纪 90 年代后,作战环境变得非常复杂,军用通信系统遭遇到性能越来越好、威胁越来越大的各类武器的多方向、多层次、多批次、高密度的电子干扰,有时仅使用智能天线从空域进行抗干扰,在某种程度已不能满足卫星通信抗干扰的要求。如果将频域和空域抗干扰技术相组合,将能够更好地抑制各种干扰,实现卫星的安全通信。频域抗干扰技术主要指的是扩展频谱技术,它具有很强的抗干扰能力,而跳频技术就是一种常用的扩展频谱技术,它采用多个载波频率,并在伪码控制下不断随机跳变,通过躲避干扰信号的方法来抗干扰,具有较好的抗干扰性。跳频技术是从频域上来对抗干扰的,当干扰与跳频信号频率相同时,仍会形成干扰,而将空域抗干扰技术与跳频通信相结合,就可以同时从空域和频域上来对抗干扰,同时提高系统容量。因此,研究跳频系统的智能天线波束形成方法可以更加有效地抑制干扰,具有重大的意义。

因此,本书将从抗干扰的角度研究分析同步轨道卫星上的智能天线的波束形成技术,重点研究分析当通信信号分别为窄带信号、宽带信号和跳频通信信号时所采用的智能天线波束形成方法,有效地抑制多种不同干扰对卫星通信的影响,提高卫星通信的安全性。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 智能天线的国内外研究现状

智能天线初期研究主要集中在接收数字波束形成上,在 20 世纪 80 年代,美国国防部就已计划在美国陆军导弹司令部的远程雷达和 PATRIO 雷达的改进产品、空军的先进战术雷达、陆军的霍克式地对空导弹等雷达系统中采用数字波束形成技术。并有在美国、英国、联邦德国和中国都进行了数字波束形成技术的模型实验的报道。例如,美国通用电气公司的双站超视距雷达的接收阵就采用了 DBF 技术,可同时形成四个具有自适应零点的波束;联邦德国的 ELRA 相控阵雷达是最早的接收数字波束形成雷达;中国华东电子工程研究所也于 20 世纪 80 年代末建成了我国第一个数字波束形成雷达试验台。总的来说,智能天线在 20 世纪 80 年代已取得了一些成果。

随着数字处理技术的发展,各国开始进一步研究智能天线发射波束形成技术和数字收发组件技术。主要体现在:英国罗克马诺尔研究中心开展了全数字收发组件研究,该中心最早提出了数字收发组件的概念,开发了一个收发全数字波束形成验证系统;美国 AIL 系统公司开展了数字波束形成发射天线研究,数字直接频率合成器由存有时间 and 相位延迟信息的一个通用数字处理器进行编程,形成所需的天线方向图;法国 NetLander 计划的探地雷达研究,该雷达是 2007 年发射的“NetLander”火星探测系统计划中的一个研究项目,核心部件是一个采用“甚高速集成电路硬件描述

语言”(VHDL)编程的现场可编程门阵列;我国的华东电子工程研究所也开展了发射数字波束形成研究,在概念研究的基础上,该所对基于直接频率合成的数字收发组件进行了深入研究,于1998年研制出4单元数字波束形成发射阵,可以形成发射波束、差波束及低副瓣的方向图;中国南京电子技术研究所也开展了数字收发组件研究,构建了一个基于直接频率合成的4单元L波段相控阵发射阵试验台,对相关技术进行实验研究。

GaAs微波单片集成技术MMIC、高速ADC转换器、VLSI和VHSIC技术及光纤传输技术的发展,使得数字波束形成技术走向实用阶段。另一方面,软件无线电技术的发展和完善给智能天线的数字波束形成技术也提供了平台。软件无线电的基本思想是以一个通用、标准、模块化的硬件平台为依托,通过软件编程来实现无线电台的各种功能。功能的软件化实现势必要求减少功能单一、灵活性差的硬件电路,尤其是减少模拟环节,把数字化处理(A/D和D/A变换)尽量靠近天线。数字波束形成的思想也是要减少模拟环节、把数字化处理尽量靠近天线,此两项技术相互结合,大大促进了智能天线的实用化,并进一步推动数字波束形成技术的发展。

最近几年,为了满足日益增长的通信扩容的需要,智能天线逐渐应用到了卫星通信系统。为了使地面站与卫星之间能进行有效的通信,将智能天线应用到卫星通信系统将有助于抑制来自其他方向的干扰,同时提高信道利用率。目前,许多大学、研究机构和通信公司都已经致力于智能天线的研究与开发。到目前为止,智能天线技术的研究已经取得了一定的成果。

欧洲通信委员会在RACE(Research into Advanced Communication in Europe)计划中实施的第一阶段智能天线技术研究,称为TSAUAMI(the Technology in Smart Antennas for Universal Advanced Mobile Infrastructure),由英国、德国、西班牙和丹麦合作完成,天线由8阵元组成,阵元间距可调,射频工作频率为1.89GHz,阵元分布分别有直线型、圆环型和平面型三种形式,天线是收发全向类

型,采用 TDD (Time Division Duplex) 双工方式^[7];日本 ATR 光电通信研究所研制了基于波束空间处理方式的智能天线,天线阵元采用 16 阵元的平面方阵,间距为半波长,射频工作频率是 1.545GHz,阵元组件接收信号在模数变换后进行快速傅里叶变换 (FFT) 处理形成正交波束后,分别采用最大比值合并分集算法或恒模 CMA 算法,天线数字信号处理部分由 10 片 FPGA 完成^[8];美国的 ArrayComm 公司研制出应用于无线本地环路 (WLL) 智能天线系统,采用可变阵元配置,有 12 元和 4 元环形自适应阵列可供不同环境选用,在日本进行的现场实验表明,PHS 基站采用该技术后可使系统容量提高四倍^[9,10];加拿大 McMaster 大学研究开发了 4 元阵天线,采用恒模算法;得州大学奥斯汀 SDMA 小组也建立了一套智能天线试验环境,着手理论与实际相结合。

在我国,一些大学和研究机构,如清华大学、西安交通大学、中国科技大学、电子科技大学、北京交通大学、北京邮电大学、电信科学技术研究院等相继开展了智能天线理论研究。一些大的电信设备生产企业如大唐电信、华为、中兴等科技公司也投入了很多的人力物力进行研发。国家“863”计划、国家自然科学基金等也相应支持有关单位,如中国电子科技集团 54 所、中国航天科技集团空间技术研究院西安分院、中国邮电科学研究院等,进行理论与技术平台的研究。其中,中国邮电科学研究院所属的信威公司走在了技术与产品开发、实用化的前列,他们成功地研制出采用 8 阵元环形的自适应阵列,射频工作为 1785MHz ~ 1805MHz,采用 TDD 双工方式,收发间隔 10ms,接收机灵敏度最大可提高 9dB,是国际上第一套应用智能天线的同步 CDMA (Code Division Multiple Access) 无线通信系统^[11,12]。由于采用 TDD 双工方式,上下行信道同频,只要上下行间隙之间的时间小于信号的相干时间,则可以认为两条信道具有相同的电波传输特性,所以从上行信道获得的空间参数可以直接用于下行信道的波束赋形。智能天线对于下行链路预算的赋形增益可以达到 18dB,提升了系统的覆盖面积。此外,系统通过采用零陷增强技术,在干扰方向上产生信号空间零陷,达到抑

制干扰信号的目的。该零陷增强算法干扰抑制能力可以达到 20dB ~ 30dB, 不仅用于对外部干扰信号抑制, 还可以有效抑制系统内部干扰信号, 大幅提高基站接收信号的信噪比和信干比。

1.2.2 波束形成技术的国内外研究现状

智能天线技术的研究已经取得了一定的成果, 但是尚未在卫星通信领域获得广泛应用。这是因为虽然智能天线相关技术从理论上讲可以达到最优, 但在实际应用中仍有许多重要问题有待解决, 而最关键的问题还是要找到一种能够满足业务需求的真正快速收敛而性能优良的波束形成算法, 以实现智能天线的自适应波束形成。

智能天线的波束形成算法根据是否需要参考信号(导频序列或导频信道)来进行划分, 可将波束形成算法大致分为盲算法和非盲算法两大类^[6,13-15]。盲算法和非盲算法分别又有多种类型, 如图 1.2.1 所示。

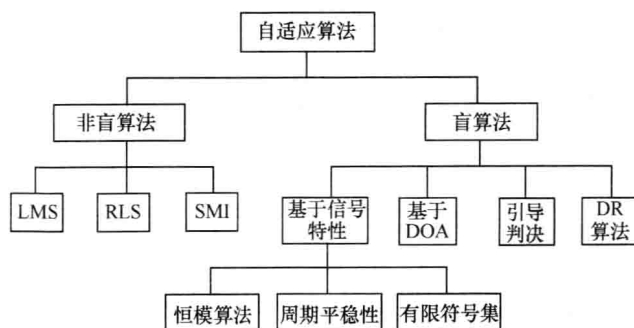


图 1.2.1 各种自适应形成算法

从图 1.2.1 可以看出波束形成方法较多, 这些方法有着各自的特点, 适用于不同的应用环境。目前应用较广泛的算法有非盲算法中的最小均方误差(LMS)算法、样本相关矩阵直接求逆方法(SMI)、递归最小二乘(Recursive Least squares, RLS)算法和盲算法中的恒模算法(Constant Modulus Algorithm, CMA)等。

LMS 算法的特点是结构简单,性能稳定,计算复杂度低,易于硬件实现,是在实际中应用最广泛的自适应波束形成方法之一,但是 LMS 算法存在稳态误差特性与收敛速度不能同时满足的缺点,步长控制其性能^[6,16]。SMI 算法(又称 DMI 算法)是利用某一时间段内的接收数据构造对相关矩阵的估计,通过接收数据和参考信号形成互相关矩阵的估计,从理论上讲,SMI 算法比 LMS 算法的收敛速度快,其缺点是计算复杂度大。RLS 使用迭代模式工作,在每个迭代步骤结束后,用接收数据后面的每个分量依次替代前面的分量,并重新获取最后一个数据分量点,在高信噪比条件下,RLS 算法收敛速度比 LMS 算法要快,但是计算量也较大。恒模算法(CMA)是应用最广泛的一种盲算法,它的突出优点是不需要恢复所需信号的幅度和相位信息,其性能不依赖于载波同步和采样时刻的精度,缺点是以收敛于局部极值对应的权值点,还存在强干扰时的捕获问题及相位含糊问题。其他盲算法性能的提高是以增加复杂度为代价的^[8,13,17-19]。总的来说,非盲算法虽然发送参考信号浪费了一定的系统带宽,但它相对盲和半盲算法而言,收敛速度快,通常误差较小,且实现起来简单易行。

本书重点调研分析了当通信信号分别为窄带信号、宽带信号及跳频通信信号时所采用的智能天线波束形成方法的国内外研究现状。

1. LMS 算法

LMS 算法的运算量较少,结构简单容易硬件实现,并且在抗干扰信号方面也具有较好的效果,因此该算法较适用于星上窄带信号的波束形成。

LMS 算法有两个重要的性能参数指标,分别为失调量和迭代步长,并且失调量与迭代步长的大小成正比。为了获得较小的失调量,通常采用较小的固定步长,但是迭代速度却很慢。可见,步长在 LMS 算法迭代过程中是一个矛盾量,它既控制着 LMS 算法的收敛速度,同时决定着算法的稳态误差。为了保证算法具有较小的稳态误差的同时又具有较快的收敛速度,很多文献就步长与

失调量的关系研究了每次迭代所允许的最大步长的取值问题,并提出了各种改进的 LMS 算法。这些改进算法的基本思想是用变步长代替固定步长来解决传统 LMS 算法收敛速度与失调量之间的矛盾,首先指定一个较大的步长使算法有较快的收敛速度,经过若干次迭代以后会进入稳态邻域,然后减小步长,算法就会在稳态的基础上进一步收敛,从而和维纳解更接近,进入范围更小的稳态邻域。针对 LMS 算法的不足,国内外学者提出了许多改进措施。

1) 国外学者提出的有代表性的变步长 LMS 算法

Kwong 提出的变步长算法^[20],该算法具有与固定步长的 LMS 算法在较大步长时同样的收敛速度和与较小步长时同样的稳态均方误差,步长受瞬时误差平方的控制,但是由于噪声的存在,算法在稳态后也有可能由于噪声存在而产生震荡,这使得算法的效率大大降低;Mathew 提出的变步长算法^[21],该算法步长受相邻梯度向量的内积控制,但是该算法瞬时梯度的方向很容易受噪声的影响;Aboulnasr 算法^[22],该算法步长由平滑后的相邻时刻误差的互相关函数控制,在不相关噪声信号的情况下具有很好的收敛性能,但是在误差信号相关的情况下仍旧可能使步长迭代不能达到预期的效果;Pazaitis 提出了步长受瞬时误差的四阶积累量控制的想法^[23],该算法具有更小的稳态误差,但是要求噪声信号服从高斯分布,从而不适用于非高斯噪声信号的应用;Mader 提出的变步长算法^[24],通过在每步更新时使均方权值偏差 (Mean square deviation, MSD) 的下降达到最大以达到理论最优的效果,步长与额外均方误差和均方误差的比值成正比,该算法被看作是一种理论最优的变步长 LMS 算法,然而由于参数选择的敏感性使该算法的应用受到一定的限制;WeePeng 算法^[25],引入了平滑的思想,通过对梯度向量的平滑减少噪声的影响;Shin 对文献[24]进行了改进^[26],通过一些假设对文献[24]的算法进行了近似,使该算法在实际中可以适用,但是 Shin 算法中所作的假设对参数选择很敏感,在较高噪声情况下该算法使用的近似将会产生较大的偏差,因而在实际应用中很可能由于参数选择不恰当而达不到最佳的性能。