

非线性逼近 与雷达信号处理

Feixianxing Bijin Yu Leida Xinhao Chuli

魏文斌 闫世强 黄晓斌 编著
于文震 主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press

非线性逼近与雷达 信号处理

魏文斌 闫世强 黄晓斌 编著
于文震 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以雷达信号处理为背景,运用非线性逼近的思想研究了雷达信号处理中的诸多问题。首先,研究了雷达信号数据压缩中的自适应小波贪婪(AWG)算法及其良好的信号保真能力;其次,研究了非线性幅相压缩方法及其良好的相位保真特性;再次,研究了雷达信号去高频中经验模式分解(EMD)算法及其在去高频中目标信息高保真性能;最后,研究了雷达通道均衡的非线性处理方法,主要包括均衡函数求解频域除法、最小二乘拟合方法和基于DFT的非线性均衡方法,验证了这些方法良好的均衡效果。

本书既可供从事预警装备研制的工程技术人员参考,也可供预警装备教学的师生使用,书中提出的非线性的处理方法可供从事天文、地理、经济和社会等各领域人士借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

非线性逼近与雷达信号处理/魏文斌,闫世强,
黄晓斌编著. —北京:国防工业出版社,2016.4
ISBN 978-7-118-10787-6

I. ①非… II. ①魏… ②闫… ③黄… III. ①函数
逼近论②雷达信号处理 IV. ①O174.41②TN957.51

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第053729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 787×1092 1/16 印张 6 字数 125 千字

2016年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 28.00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

序 言

在现代战争中,雷达是监视敌方海、陆、空、天行动的重要装备,也是敌方干扰和打击的首要目标。雷达能否对接收的信号进行准确快速的处理,不仅关系到雷达本身的生存,还直接关系到战争的胜负。

但是,目前雷达信号处理中仍面临诸多问题。

(1) 雷达信号压缩问题

为了增强雷达在恶劣环境下的生存能力,部分现代体制雷达采用各功能模块异地分布,提高雷达机动性和对低空目标、隐身目标的发现能力。这些体制雷达系统,功能模块异地分布导致信号收发和处理分离,海量回波数据需要传输和存储。为了减少传输带宽、提高传输效率,必须研究有效的雷达回波数据压缩方法。

(2) 雷达信号压缩传输途径问题

雷达信号处理中通常利用接收信号和某个基准参考信号进行相位比较来提取时延和多普勒信息以确定目标距离和速度,所以雷达回波数据压缩不仅要保证信号幅度的稳定性,而且必须保证信号相位的稳定性。回波正交数据压缩和幅相数据压缩是两种不同的压缩传输方法,其压缩恢复效果是不一样的。因此必须探寻好的压缩传输方法,为将来新体制雷达数据压缩传输提供技术支撑。

(3) 雷达信号去高频问题

雷达回波信号受到多种因素的影响,如外来的有源或无源高频干扰、传播介质、内部噪声的影响,这些都会引起回波信号的失真,从而在目标检测中导致虚警、漏警,影响目标的定位、跟踪和航迹的形成。雷达回波数据压缩中对雷达回波信号去高频不能回避。

(4) 雷达通道均衡问题

现代雷达主、辅通道或阵列天线多通道接收到的信号,经过模拟放大器、混频器、检波器、A/D变换等模拟器件组成的接收通道。由于各路通道模拟器件存在着温度和特性上的差异,各个通道间幅度和相位不一致,这些问题直接影响到雷达系统目标检测性能的高低。因此,必须采取有效的方法,消除这些因素的影响。

本书以雷达信号处理中急需解决的上述问题为牵引,提出了自适应小波贪婪(AWG)算法,研究了该算法在雷达信号数据压缩中的应用,将这种非线性压缩思想运用于雷达信号幅相压缩,论证了幅相压缩在保持回波信号相位上的稳定性,挖掘了经验模式分解(EMD)算法在雷达回波去高频中的目标信息高保真优势,提出了雷达通道均衡的非线性处理方法,如均衡函数频域求解法、基于DFT的非线性均衡方法,验证了这些方法良好的均衡效果。

本书运用非线性逼近的思想研究雷达信号处理中的若干问题,内容系统,深入浅出,算法处理效果好,计算速度快,结果具有较好的新颖性、创造性和实用性。可供从事雷达装备研制的工程技术人员参考,也可供从事雷达装备教学的师生使用。为此书作序,由衷高兴!

张光义

中国工程院院士

前 言

随着诸如天波超视距雷达、分布式网络雷达、分布式数字宽带相控阵雷达等现代体制雷达的出现,在现代雷达信号处理领域产生了很多亟待解决的问题。大量的数据需要传输或存储,而传统的压缩方法往往导致较大的幅相误差,不利于雷达系统对目标的有效检测,因此,探寻高保真的雷达信号数据压缩算法和有效的压缩途径成为现代雷达信号处理的一个重要内容。雷达系统中接收机通道误差及 ADC 的量化噪声等多种因素引起接收机各通道间的幅相不一致,其结果是副瓣对消和数字波束形成效果变差,影响雷达探测性能。为使各通道的幅相一致、有效抑制干扰,必须解决通道失配问题。其中,解决通道失配的一个方法就是通道均衡技术。因此,通道均衡算法研究也成为雷达信号处理的一个必要内容。

本书以雷达信号处理为背景,围绕着现代雷达信号处理中的关键问题,如回波数据压缩、通道均衡等,运用非线性逼近方法展开研究。遵从理论研究和工程应用相结合、理论推导和计算仿真相结合、定性分析和定量计算相结合的原则,着重解决雷达数据压缩、去高频和通道均衡技术三个方面的问题。在回波数据压缩研究中,首先,针对雷达回波信号的特点,根据贪婪算法的基本思想,利用小波多层次变换系数之间的关系,研究基于小波变换的自适应贪婪算法,并将其应用于宽带信号的数据压缩;其次,探讨雷达回波数据的幅相压缩方法及其相位优势。在雷达信号去高频方面,通过与小波等方法比较,着重研究运用 EMD 算法去高频方法在保留目标信息方面的优势。针对雷达通道均衡方面存在的通道幅相不一致导致的高旁瓣问题,研究均衡函数的反卷积求解和频域除法求解,以及非线性方法求解均衡滤波器,通过仿真验证这些方法在通道均衡方面的优势。

本书共分为 7 章,具体安排如下:

第 1 章主要介绍研究的目的意义,介绍国内外在雷达数据压缩、经验模式分解和通道均衡技术三个方面的研究现状。

第 2 章介绍信号处理中与课题相关的时频分析基本知识,如变换、基、逼近,介绍雷达信号处理基本知识,如雷达信号形式、回波形式和脉冲压缩技术。

第 3 章研究基于贪婪算法思想的非线性数据压缩方法。主要内容包括:比较性地介绍非线性逼近和贪婪算法的基本概念,实现基于贪婪算法的非线性 DFT、DCT 和 AWG 算法,针对宽带雷达回波信号进行线性方法和非线性方法压缩效果的比较、传统小波方法和 AWG 算法压缩效果的比较、三种非线性压缩算法的保真性和实时性比较。

第 4 章为了在雷达回波数据压缩中较好地保留目标的相位信息,研究基于非线性 DCT 方法和 AWG 算法的雷达回波幅相压缩方法。运用上述两种算法对雷达回波进行 I/Q 压缩和幅相压缩实验,比较 I/Q 压缩和幅相压缩的性能,为雷达设计中选择传输途径和压缩算法提供参考。

第5章为了减少变换域数据压缩的数据量,并且选用方法确保目标识别时无漏警和虚警,研究宽带回波信号的 EMD 去高频方法。运用脉冲压缩技术比较该方法和传统小波、小波包等方法的去高频效果。

第6章针对雷达系统中通道幅相不一致影响旁瓣对消和数字波束形成,研究雷达通道均衡算法。分析通道失配的原因及失配对雷达系统性能的影响,介绍雷达通道均衡基本原理和传统均衡的实现;针对均衡函数的求解借助于矩阵形式研究频域除法;研究均衡滤波器的求解,其中包括实现频带内依能量加权最小二乘拟合方法求解 FIR 均衡滤波器。在此基础上,探讨在待校通道传输函数振幅和相位的波动幅度和波动频率较大时基于 DFT 的通道均衡算法的有效性;针对 DFT 均衡中宽带信号高频部分拟合精度较差的问题,利用 DFT 研究非线性均衡处理算法。

第7章总结和展望。

本书撰写过程中,得到了中国电子科技集团公司第十四研究所于文震首席专家的鼎力支持,于文震先生细心审阅全书,并从内容到结构提出了宝贵意见。

全书由魏文斌主编,各章的撰写过程中得到了闫世强主任的直接指导和黄晓斌博士的参与,同时参与本书编写工作的还有卢明、肖锐和许松。

空军预警学院为该书的出版提供了资金帮助,国防工业出版社的欧阳黎明为本书的出版付出了辛勤努力。在此向他们表示由衷的感谢!

魏文斌

2015年8月于武汉

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 研究的内容及其意义	1
1.2 国内外相关研究	2
第 2 章 基础知识	6
2.1 时频分析基础	6
2.1.1 时频分析中几种变换的特性	6
2.1.2 信号空间的基底、框架	8
2.1.3 有限项逼近	10
2.2 雷达信号处理基础	11
2.2.1 雷达信号波形	11
2.2.2 基带回波信号	13
2.2.3 脉冲压缩技术	17
2.3 本章小结	18
第 3 章 雷达信号非线性压缩算法	19
3.1 非线性逼近与贪婪算法	19
3.2 基于 DFT 和 DCT 的雷达信号压缩算法	20
3.2.1 算法定义	20
3.2.2 算法评价标准	22
3.2.3 实验结果分析	23
3.2.4 结论	24
3.3 基于小波变换的回波信号压缩算法	24
3.3.1 传统小波压缩原理	25
3.3.2 自适应小波贪婪算法步骤及流程	25
3.3.3 基带回波参数及信号形式	26
3.3.4 几种小波算法对基带回波信号的压缩及结果分析	27
3.3.5 结论	29
3.4 基于雷达回波信号的 AWG 算法性能研究	29
3.4.1 AWG 算法随 CR 变化时的压缩性能	29
3.4.2 AWG 算法随 SNR 变化时的压缩性能	30

3.4.3 结论	31
3.5 基于 DFT、DCT 和 WT 的非线性压缩算法比较	32
3.5.1 基于 DFT 的非线性算法和 AWG 算法的保真性比较	32
3.5.2 基于 DCT 的非线性算法和 AWG 算法的保真性比较	35
3.5.3 三种非线性算法的实时性比较	36
3.5.4 结论	38
3.6 本章小结	39
第 4 章 雷达回波信号的幅相压缩	40
4.1 引言	40
4.2 雷达回波压缩途径	40
4.2.1 I/Q 压缩	41
4.2.2 幅相压缩	41
4.3 I/Q 压缩和幅相压缩仿真实验	41
4.4 本章小结	48
第 5 章 宽带回波信号 EMD 去高频方法	49
5.1 引言	49
5.2 雷达接收的宽带信号模型	49
5.3 基于 EMD 的去高频方法	51
5.4 匹配滤波技术	52
5.5 用匹配滤波技术分析小波(包)和 EMD 去高频效果	53
5.6 本章小结	55
第 6 章 雷达通道均衡算法研究	56
6.1 通道均衡基础简介	56
6.1.1 接收机通道失配及对雷达系统性能影响	56
6.1.2 通道均衡基本原理	56
6.1.3 传统均衡算法	58
6.1.4 雷达通道频率响应模型	59
6.1.5 均衡示例	60
6.2 均衡函数的求解研究	61
6.2.1 问题的提出	61
6.2.2 均衡函数的求解方法	62
6.2.3 均衡函数求解仿真实验	64
6.2.4 结论	66
6.3 均衡滤波器的求解研究	67
6.3.1 基于最小二乘拟合法的 FIR 均衡器的研究	67
6.3.2 基于 DFT 的通道均衡算法研究	72

6.3.3 基于 DFT 的非线性均衡算法	75
6.4 本章小结	79
第 7 章 总结与展望	80
7.1 总结	80
7.2 展望	81
参考文献	82

第1章 概述

运用非线性逼近的思想研究雷达信号处理是本书的基本特色,雷达信号处理涵盖范围很广,本书研究哪些内容,有何意义,是本书首先要明确的问题;其次,还必须了解目前国内外在这些方面的研究概况。

1.1 研究的内容及其意义

随着雷达技术的发展,雷达的功能从简单地发现和定位目标扩展到测量目标速度以及从回波中提取更多关于目标特性的信息。这种功能通常是通过向空间发射某种特定的信号,然后接收并处理目标的回波信号来实现。作为这样的系统,面临着低空/超低空突防、反辐射导弹、电子干扰和隐身目标“四大威胁”。为了增强雷达在恶劣环境下的生存能力,部分现代体制雷达采用各功能模块异地分布,提高雷达机动性和对低空目标、隐身目标的发现能力。例如:多基地分布式数字相控阵雷达由于各功能模块异地分布具有良好的隐蔽性、抗干扰和反隐身目标能力;收发分站的天波超视距雷达,通过电离层反射,对目标进行探测和定位,具有广域探测优势和对低空/超低空目标的探测能力;机载/星载合成孔径雷达的收发器件和信号及数据处理器件通常分别置于空中和地面,大量的回波信号需要传输到地面进行处理。这些新体制雷达系统,功能模块异地分布导致信号收发和处理分离,海量回波数据需要传输和存储。为了减少传输带宽、提高传输效率,通常在传输前端对雷达回波数据进行压缩,在后端再进行解压缩。针对传输的信号探寻高保真压缩算法成为十分紧迫的工作。

雷达回波数据压缩不同于普通信号或图像压缩,回波数据的压缩不仅要保证信号幅度的稳定性,而且必须保证信号相位的稳定性。雷达信号处理,通常都是利用接收信号和某个基准参考信号进行相位比较来提取多普勒信息,进而利用反映速度差别的相位信息来鉴别运动目标与固定目标回波。所以,回波数据压缩时保持信号相位稳定性具有特别重要的意义。因此,在雷达回波数据压缩中,选择幅相稳定的算法尤为重要。本书研究的不仅是运用非线性贪婪算法思想寻找合适的雷达回波数据压缩算法,有效解决回波数据的传输和存储,还要研究对何种形式的信号进行压缩和传输。

雷达回波信号受到多种因素的影响,如外来的有源或无源干扰、传播介质、内部噪声以及多模多径的影响,这些都会引起回波信号的失真,从而在目标检测中导致虚警、漏警,影响目标的定位、跟踪和航迹的形成。鉴于此,本书将介绍处理非平稳非线性信号的经验模式分解(EMD)算法。这种信号处理算法被认为是近年来对以傅里叶变换和小波变换为基础的谱分析的一个重大突破。该算法本质上是对复杂信号进行平稳化处理,结果是将信号中具有不同尺度的数据逐级分解开来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,每一个序列就是一个内模函数(IMF),从而提取数据序列趋势,去除数据序列中的高频噪

声。由于这种分解是基于数据的局部特征尺度,该算法具有良好的局部自适应性。为了有效地进行回波数据变换域压缩,又能在压缩过程中保留目标信息,本书将对 EMD 算法和小波算法进行比较性研究,将该算法应用于宽带回波信号去高频处理,进一步挖掘该算法的优势。

无论是在和平时期还是在现代战争中,雷达肩负着监视敌方海、陆、空、天行动,也是敌方干扰和打击的对象。雷达常常处于强的有源干扰环境中,干扰信号有时从天线旁瓣进入天线影响天线主瓣对目标的探测,以至于淹没目标信号,使雷达系统不能正常工作。所以雷达需要有很好的抗副瓣干扰的能力。抗副瓣干扰常用的方法是自适应旁瓣相消(ASLC)技术消除有源干扰。但是,在 ASLC 系统中,主、辅通道或阵列天线多通道接收到的信号,经过模拟放大器、混频器、检波器、A/D 变换等模拟器件组成的接收通道。由于各路通道模拟器件存在着温度和特性上的差异,从而导致各个通道间接收到的信号存在幅度和相位上的不一致,使得旁瓣相消效果不理想。因此,在雷达系统设计中,必须采取有效的方法,消除这些因素的影响。

通道均衡技术就是为了解决雷达多通道信号幅相不一致问题而产生的一个研究分支,其研究水平直接影响到雷达系统目标检测性能的高低。对精准实时的通道均衡技术方法的探求已成为各雷达设备研发单位的迫切需求,本书将在该领域对时域反卷积和频域除法算法展开研究,将研究结果用于对均衡函数求解,并进一步研究 FIR 均衡滤波器和基于 DFT 的滤波器的非线性求解。

从科学角度看,上述三方面算法的研究具有十分重要的理论价值,其中一些新提出的非线性算法具有良好的逼近性能。从适用性看,书中这些算法应用于雷达回波数据压缩、去高频和通道均衡,具有重要的经济价值和军事价值。

1.2 国内外相关研究

相关的国内外研究从信号数据压缩、经验模式分解和通道均衡技术三个方面进行介绍。

1. 信号数据压缩

信号或图像数据压缩的目的是尽量减少表示信号或图像需要的数据量,减少数据量的基本方法是除去其中多余的数据。以数学观点看,就是在传输或存储前将信号向量或图像阵列变换成一个在统计上无关联的数据集合,在某个时间或地方再对被压缩的信息进行解压缩来重构原信号或图像。根据压缩前后有无信息损失,数据压缩分为无损压缩和有损压缩。无损压缩性能取决于数据本身的可压缩度,像 Huffman 编码、算术编码、LZW 编码均为无损压缩,其压缩比通常较小;目前数据压缩中常用的基于 DCT 和 WT 的 JPEG 格式的压缩方法则是有损压缩,它们可以实现较大压缩比的压缩^[1]。

信号或图像的数据压缩研究可以追溯到 20 世纪 40 年代。C. E. Shannon 1948 年在文献[2]中提出了用于计算数据信息量及其传输率的 Shannon 定理,为数据压缩方法奠定了理论基础。数据压缩从最初的标量量化发展到现在的自适应标量量化,矢量量化,基于 FFT、DCT、WT 的分块压缩。压缩算法越来越多,压缩效果越来越好^[3-10]。

随着现代雷达技术的发展,海量数据的快速传输成为必须解决的问题,对有效压缩算

法的研究引起了与雷达相关的科研院所研究人员的广泛关注。王志刚等研究了LZW算法优化及其在雷达数据压缩中的应用^[11];谢少波等研究了脉冲多普勒雷达回波信号数据压缩处理方法^[12];叶少华等研究了BAQ算法在SAR原始数据压缩中的应用^[13];祁海明等进行了星载SAR原始数据BAQ压缩算法性能评估^[7]。国外也有关于雷达数据压缩的大量文献。例如,Kwok R、Johnson W展开了对海量SAR数据分块自适应量化的研究^[14];Lebedeff D等研究了原始SAR数据的VAQ算法^[15];Moreira将分块自适应量化和矢量量化结合起来进行有效的SAR数据压缩^[16];Benz等进行了SAR数据压缩算法的比较^[17,18];Fisher J提出了一种有效的SAR原始数据频域压缩方法^[19];Pascazia V等运用小波变换编码研究了SAR原始数据的压缩^[20]。可以看出,Kwok R、Johnson W、祁海明等研究的BAQ压缩算法属于标量压缩方法,其特点是实现简便;Lebedeff D等研究的对原始SAR数据进行的VAQ则属于矢量压缩算法,是一种有损压缩技术;Fisher J和Pascazia V的研究方法属于变换域压缩算法,也是一种有损压缩算法。

研究表明,矢量压缩算法和变换域压缩算法的压缩性能优于标量压缩算法。近年来,变换域压缩特别是基于DCT和小波变换的压缩方法得到蓬勃发展。基于DCT的数据压缩一直是图像压缩中使用最为普遍的技术,而基于小波的压缩方法近年来引起了数学家和工程师们的研究兴趣。Daubechies I等在1992年运用小波变换实现了图像压缩^[4];Wei D、Tian J等人在1998年用双正交小波实施了图像压缩^[5];为了提高图像的保真度,人们提出了小波包压缩算法^[21]。由于小波进行信号或图像分解重构有快速算法,且小波分解系数具有“稀疏”特性,因此小波被广泛应用于信号或图像压缩。但是对于宽带雷达信号,传统小波压缩算法难以满足保真度要求,并且在抑制噪声和保持相位上存在难以克服的困难,因此传统小波压缩算法在该领域应用受到限制。

目前世界上一些数学家已经着手于非线性逼近方法研究,美籍俄罗斯数学家Temlyakov从不同数学空间的角度对非线性逼近方法进行了研究,但空间的抽象使他无法给出其具体实现方法,因此文中指出“在无穷项中存在有限项”只能作为一个前提条件,其结果也只能是“理论上”的^[22,23];本书作者在Temlyakov研究的基础上,提出了 L^p 空间中基于小波变换的贪婪算法的实现方法^[24];DeVore, Jawerth和Popov从数学的角度研究过非线性 N 项逼近^[25];Cohen A对非线性小波逼近和图像压缩进行了探讨^[26]。他们的结果均侧重于逼近结果理论研究,强调非线性逼近方法的收敛性和逼近阶,并没有对它们进行算法实现,也没有对它们的逼近效果进行客观数据分析。由于讨论的不是雷达信号,因此他们没有考虑数据压缩后产生的信号相位变化。

对于宽频带雷达回波信号来说,传统的有损压缩算法(如傅里叶变换压缩法、小波低频方法、小波阈值方法、小波包方法)往往对高频部分带来较大损失,脉冲压缩后经CFAR检测容易产生虚警和漏警,这使得信号中的弱小目标(如导弹、小型战机、隐形战机)信息更容易丢失,而这些信息又非常重要,因此雷达信号压缩必须具有高保真度。同时雷达信号相位承载着目标位置和运动状态等信息,在被压缩处理时对相位要求也十分严格,细微的相位改变有时对信号脉冲压缩和波束合成都会带来很大影响。由此可见,寻找并研究相位稳定的高保真度压缩算法对现代体制雷达信号压缩具有十分重要的意义。

2. 经验模式分解

经验模式分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD)是美国国家宇航局(NASA)

的 Huang 等人于 1998 年提出的一种非线性非平稳信号分析和处理的方法^[27]。Huang 等人建立了 EMD 的基本框架和基本理论,引入了本征模函数的概念,比较了 EMD 算法和小波及其他信号分析方法的区别,并将 EMD 方法应用到非线性系统分析、水波分析、风速分析、潮汐和海啸分析、海洋环流分析和地震信号分析等方面。该方法既具有小波变换的多分辨的优势,同时又克服了小波变换中需要人为选取小波基的困难。作为一种完全的数据驱动方法,它具有良好的自适应分解的特性。

经过近几年的研究,EMD 方法逐步形成了一个独立的理论体系。作为一种新的分析方法,特别是对非平稳非线性信号的分析,具有非常好的效果。其理论研究和实际应用都取得了丰硕的成果。理论研究方面,针对 EMD 分解过程中求信号的极值点包络,要对信号或其极值点进行延拓。Huang 本人提出了自己的延拓方法;邓拥军等人提出了一种利用神经网络对原始信号进行延拓的方法^[28];黄大吉等人提出了镜像闭合延拓和包络的极值延拓方法^[29],刘慧婷等人提出了一种基于多项式拟合算法^[30]。在一维应用方面,陈东方等人利用 EMD 方法处理非平稳非线性信号^[31];于德介等人将 EMD 方法应用于齿轮故障振动信号处理^[32];本文作者也曾和空军雷达学院师生一起对 EMD 算法进行过研究,将 EMD 算法应用于超声波流量检测信号处理^[33]、装载机动态称重系统^[34]、雷达信号拖尾噪声去噪^[35],取得了较好的效果。国外一些学者还试图通过 EMD 方法来解释许多随机想象,如 Stephen C. Phillips 用 EMD 方法成功模拟出分子的运动^[36];Gabriel Rilling 用 EMD 方法研究分形高斯噪声的 HURST 指数与分解分量序数之间的关系,认为可以根据分解分量序数估计出分形高斯 HURST 指数^[37]。

在二维 EMD 算法理论和应用方面,Nunes J C 把 EMD 方法推广到二维图像处理,提出了相应的二维 EMD 算法,分析了该算法在图像纹理中的独特性质,纹理图像和医学图像处理中取得了不错的效果^[38,39];瑞典学者 Linderhed A 在比较小波方法和 EMD 方法特点的基础上,提出了用 EMD 方法进行数据压缩的新方法^[40];Sinclair S 等人将二维 EMD 方法应用于空间降雨量数据分解^[41];韩春明等人提出了一种利用经验模态分解(EMD)抑制 SAR 斑点噪声的方法^[42];本书作者和甘学武等将 EMD 算法和小波方法结合起来,对 Nunes 等人提出的二维 EMD 基本方法进行了改进,将改进算法应用到 SAR 图像斑点噪声抑制,取得了较好的效果^[43]。该方法将含斑点噪声的 SAR 图像分解为若干层基本分量,然后对每层分量进行小波阈值化处理,最后重构图像,达到抑制斑点噪声的目的。该方法避免了单纯用 EMD 方法或小波方法在抑制噪声的过程中丢失大量的图像边缘和细节信息。实验结果表明,该方法同传统的斑点抑制算法相比,有明显的去噪效果,在保持边缘和细节信息的同时,较好地抑制了斑点噪声。

EMD 算法从提出到现在的十多年时间里,理论研究和应用成果不断涌现。EMD 方法解决了非线性非平稳信号分析和二维信号处理中的一些难题,它应用于雷达信号处理领域必然会带来新的活力,取得新的成果。

3. 雷达通道均衡算法

通道均衡最初始于通信领域。在通信中,为了去除由于信道传输码间干扰,必须采用信道均衡技术,而且对于无线移动的信道是时变的,均衡器要能够根据信道传输特性的变化自动调整参数以尽可能实现最佳均衡,所以均衡器常被设置为自适应的,即自适应均衡器。这种均衡器可以通过各种均衡算法来实现。目前,提出的信道均衡方法大致可以分

为盲均衡方法、基于参考信号的均衡方法和半盲均衡方法。盲均衡方法不需要参考信号,只利用接收信号的特性来完成信道估计;基于参考信号的均衡方法是按某些准则进行逐步跟踪和调整待恢复的信号值;半盲均衡方法结合了盲均衡与基于参考信号均衡两种方法的优点^[44,45]。Ram Babu 等研究了无线通信系统中多输入、多输出 FIR 通道盲均衡方法^[46];Paulo 等研究了半盲通道均衡算法^[47]。

雷达中的均衡与通信中的均衡相似,都是按照一定的准则求得均衡器的权系数。雷达通道均衡技术是雷达抗干扰信号处理的一个重要研究方向。在自适应副瓣对消处理中,主辅天线通道间干扰信号的相关性越强,对消性能越好。但是,主辅天线通道间频率特性的不一致会减弱这种相关性。对于数字阵列雷达的数字波束形成来说,天线接收的信号要经过天线校正网络、T/R 组件、ADC 等模拟器件,这些设备会导致各个通道幅度和相位的不一致。尤其是,宽带接收通道频带宽,带内频率特性不一致更严重,对波束形成影响更大。因此,必须采取通道均衡措施来提高通道间频率特性的一致性,从而改善对消性能和波束形成效果^[48]。

近年来,国内对雷达通道均衡研究的院校及研究所也比较多,但主要集中于研究通道失配对雷达或者阵列性能的影响、通道均衡算法及其改进。长期从事雷达信号处理研究和开发的高级工程师孙建平针对阵列天线雷达介绍了通道均衡原理和非加权的基于最小二乘的 FIR 均衡滤波器的实现方法^[49];傅有光、梁兵等分析了雷达系统中通道间幅相不一致给旁瓣相消带来的影响,提出了通道均衡的解决方法,阐述了该方法的基本原理^[50,51];林育梅等在仿真分析通道失配对自适应旁瓣相消性能影响的基础上,研究了影响均衡性能的几个主要参数与旁瓣相消性能的关系,通过仿真验证了通道均衡技术的引入可以较大幅度地提高旁瓣相消性能^[52];陈刚等利用窗函数对不同频率点的拟合进行加权,使不同频率点上的拟合误差在总的误差中所占的比例不同,这样可以使 FIR 滤波器能够在需要的频带上进行较为有效的均衡^[53];彭小亮、王永良等提出了参考通道修正法和整体失配特性修正法,使得均衡滤波器的求解方法具有一定的鲁棒性^[54]。上述研究方法均属于基于最小二乘的 FIR 滤波器求解方法,在文献[45]里,王峰等提出的基于傅里叶变换的雷达通道均衡求解算法则与上述方法完全不同,它是对频域均衡函数求解逆傅里叶变换后保留低频项得到的,仿真结果证明了该算法在输入信号为宽带调频信号时通道均衡的有效性。

在数学领域,近几年兴起的一个研究热点就是非线性逼近。作者本人曾针对实际应用做过基于 DFT 和 DCT 的非线性逼近的应用研究^[55,56]。结果显示,非线性算法具有很好的逼近性能,在有限维空间可实现确定基下的有限项最佳逼近,这些方法不仅适于数据压缩,而且也适于信号逼近,见文献[24]。对于雷达的通道均衡应用背景来说,从最佳逼近的角度引入非线性方法进行均衡滤波器的构造,这对于提高通道的幅相一致性能具有十分重要的意义。

第2章 基础知识

为了便于对雷达信号数据压缩算法、适于目标识别的去高频方法和雷达通道均衡方法的研究,本章对与研究相关的时频分析基础知识,如变换、基、逼近进行简单介绍;并介绍雷达信号处理基本知识,如雷达信号形式、回波形式、脉冲压缩技术。

2.1 时频分析基础

2.1.1 时频分析中几种变换的特性

很长时间以来,傅里叶变换一直是人们对各种信号进行时频分析的工具。最主要的原因是傅里叶变换采用的正弦波 $e^{i\omega t}$ 是所有线性时不变算子的特征向量。若用 L 表示线性时不变算子, h 为 L 的脉冲响应,显然有

$$Le^{i\omega t} = h * e^{i\omega t} = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{i\omega(t-u)} du = e^{i\omega t} \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{-i\omega u} du \quad (2.1)$$

根据傅里叶变换的定义,有

$$\hat{h}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{-i\omega u} du \quad (2.2)$$

因此

$$\forall \omega \in R, Le^{i\omega t} = \hat{h}(\omega) e^{i\omega t} \quad (2.3)$$

这表明,该算子完全由其特征值刻画,且特征值就是该算子脉冲响应的傅里叶变换^[57,58]。设 f 是系统的输入,将 f 分解成正弦波 $\{e^{i\omega t}\}_{\omega \in R}$ 之和,即

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.4)$$

于是,有

$$Lf(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{f}(\omega) \hat{h}(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2.5)$$

这意味着,算子 L 的作用相当于将 f 的正弦波分量 $e^{i\omega t}$ 放大或缩小 $\hat{h}(\omega)$ 倍,这可认为算子 L 的作用相当于 f 的一个频率滤波。可见,如果只是运用线性算子研究周期信号,傅里叶变换足以解决大多数问题。

人们所研究的通常不是线性时不变算子,并且信号也通常不是周期正弦波信号。而在傅里叶变换中,信号 f 与正弦波 $e^{i\omega t}$ 的内积得到 f 的傅里叶系数 $\hat{f}$,其积分区间为整个实数轴。要得到 $\hat{f}(\omega)$ 在 ω 处的信息,必须知道所有时间 $t \in R$ 上的信号的信息;不能由 $f(t)$ 在某一时刻上的信息了解 $\hat{f}(\omega)$ 在某一频域上的信息。也就是说,傅里叶变换是一个全局性变换,在对信号进行局部特征分析上具有很大的局限性。

20 世纪 40 年代, Gabor 提出了加窗傅里叶变换, 也称 Gabor 变换。同传统傅里叶变换相比, Gabor 变换只不过是傅里叶变换中添加了一个窗函数 g 。相当于用一个 Gabor 原子 $g_{u,\omega}(t) = g(t-u)e^{i\omega t}$ 替换了正弦因子 $e^{i\omega t}$, 即

$$Sf(u, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g_{u,\omega}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) g(t-u) e^{-i\omega t} dt \quad (2.6)$$

由于 $g(t-u)$ 通常是一个具有紧支撑或两端具有衰减的窗函数, 加窗傅里叶变换的积分值是以 u 为中心邻域的局部积分值。它可以实现信号的时频局部化分析。但是它的时频窗具有固定形状和大小。在对瞬时信号的分析中, 人们期望时频窗具有可调性, 高频信号的时间窗相对窄, 低频信号的时间窗相对宽。

小波变换是在傅里叶变换和 Gabor 变换的基础上发展起来的^[57]。小波 ψ 是一个积分为零的函数, 即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2.7)$$

伸缩平移后可得

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.8)$$

函数 f 在尺度 a 、位置 b 的小波变换定义为

$$Wf(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{a,b}^*(t) dt = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (2.9)$$

小波变换至少有以下优点: 它的窗口可随频率增大而减小, 通过尺度变化, 能有效检测瞬变信号; 小波种类繁多, 应用中可供选择的余地大; 小波变换具有快速算法, 实时性强。但是小波变换也存在一些缺点: 信号分解后各频带间可能存在频率混叠现象; 传统小波变换不具有自适应特点, 处理非平稳信号容易产生多余杂波。

1998 年 Huang 等人提出了经验模式分解方法 (EMD)。这种信号处理方法是近年来对以傅立叶变换为基础的线性和稳态谱分析的一个重大突破^[33,34]。EMD 算法的原理是将信号 $f(t)$ 分解为满足下列两个条件的函数之和: ①这些函数的极值点和零点的个数相等或相差 1; ②在任何点, 由局部极值点定义的包络的均值为 0。这些函数称为 IMFs (intrinsic mode functions), 记为 $\text{imfc}_i(t)$ 。其分解过程可以描述如下:

Step 1: 初始化 $r_i(t) = f(t)$, $i = 1$ 。 $r_i(t)$ 为外层循环差值变量。

Step 2: 提取第 i 个 IMF:

- (1) 初始化 $h_j(t) = r_i(t)$, $j = 1$, $h_j(t)$ 为内循环差值变量;
- (2) 提取 $h_{j-1}(t)$ 的局部极小值点和局部极大值点;
- (3) 用三次样条对局部极小值点和局部极大值点插值, 形成 $h_{j-1}(t)$ 的上包络和下包络;
- (4) 计算 $h_{j-1}(t)$ 的上包络和下包络的均值 $m_{j-1}(t)$;
- (5) 令 $h_j(t) = h_{j-1}(t) - m_{j-1}(t)$;
- (6) 如果满足停止条件, 则令 $\text{imfc}_i(t) = h_j(t)$; 否则回到 (2), 其中 $j = j + 1$ 。

Step 3: 令 $r_i(t) = r_{i-1}(t) - \text{imfc}_i(t)$;

Step 4: 如果 $r_i(t)$ 仍然至少有 2 个极值点, 则回到 Step 2, 其中 $i = i + 1$; 否则结束,