

随机调制压缩感知雷达 信号设计与处理

Signal Designing and Processing of
Random Modulated & Compressed Sensing Radar

刘 振 魏玺章 黎 湘 著



科学出版社

随机调制压缩感知雷达 信号设计与处理

Signal Designing and Processing of
Random Modulated & Compressed Sensing Radar

刘 振 魏玺章 黎 湘 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

随机调制信号是一种典型的“图钉型”雷达信号,压缩感知理论是 21 世纪初提出的一种新的信号获取与处理手段,两者的结合研究作为突破现有雷达体制瓶颈的希望引起了众多学者和研究机构的浓厚兴趣。

本书以新体制随机调制压缩感知雷达信号设计与处理为主线,系统地阐述压缩感知框架下的随机调制信号参数估计、连续参数精确估计、快速序贯处理、无模糊时频分析等理论基础,并重点介绍上述理论在典型随机调制雷达运动目标检测/成像以及微动目标特性分析/成像等方面的应用性研究成果。

本书可以作为高等院校相关专业研究生学习统计信号处理和雷达信号处理的参考书,对从事随机调制雷达以及压缩感知雷达研究的广大科技工作者和工程技术人员也具有较大的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

随机调制压缩感知雷达信号设计与处理/刘振,魏玺章,黎湘著. —北京:科学出版社, 2015.12

ISBN 978-7-03-046503-0

I. ①随… II. ①刘… ②魏… ③黎… III. ①雷达信号处理—研究
IV. ①TN957.51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015) 第 286138 号

责任编辑:刘信力/责任校对:邹慧卿

责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 12 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2015 年 12 月第一次印刷 印张: 10 3/4

字数: 200 000

定价: 68.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

随机调制雷达信号在解决传统相参脉冲串体制雷达中存在的模糊和耦合两大瓶颈问题上具有较大的潜力,但传统的时域相关处理方法会带来较高的旁瓣基底,影响目标的检测与成像性能。压缩感知理论深入阐述了信号重构中观测随机性和信号稀疏性之间的内在联系,为随机调制雷达的低旁瓣信号处理提供了全新的思路。因此,随机调制压缩感知雷达系统是突破传统雷达瓶颈之所在,并可广泛应用于预警雷达、制导雷达、雷达导引头等军用设备以及测速雷达、穿墙雷达、探地雷达等民用设备,前景十分广阔。虽然已有学者在这方面开展了部分开创性工作,但至今缺乏较为系统的研究。

本书主要以作者所在课题组的研究工作和原始论文为基础,全面介绍压缩感知理论在随机调制雷达检测、成像、参数估计等应用中的最新研究成果,全书分为五章。第1章挖掘压缩感知理论和随机调制雷达之间的内在联系并介绍其发展现状及趋势;第2章讨论基于压缩感知的随机调制信号参数估计中的基本问题;第3章介绍基于迭代压缩感知的连续参数估计理论并探讨其在随机脉冲重复间隔雷达动目标精确测速与检测中的应用;第4章介绍稀疏恢复的快速序贯处理并探讨其在随机跳频雷达一维和二维动态成像中的应用;第5章介绍随机采样信号的无模糊时频分析方法并探讨其在随机脉冲重复间隔雷达微动目标特性分析与成像中的应用。

本书同时涉及理论研究和应用研究两方面。一方面,所提的随机调制信号参数估计算法充实并拓展了传统的半参数化谱估计理论;另一方面,所提的目标检测、成像及参数估计技术将为新体制雷达的研制和部分现有雷达的改造提供实用性的技术支撑。希望本书的出版能为推动我国随机调制压缩感知雷达的研究起到一定的促进作用。

本书的研究工作受到国家自然科学基金项目(项目编号:61401481,61271442)的资助。衷心感谢所有在本书编著过程中给予帮助和支持的人们,特别感谢科学出版社刘信力编辑促成本书的问世,还需要感谢王宏强研究员、陈浩文讲师对本书提出的意见和建议。

本书是作者对随机调制压缩感知雷达研究心得和认识的总结，由于作者的水平 and 经验有限，疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

刘 振

2015 年 3 月

于国防科学技术大学

缩略语表

BP	Basis Pursuit	基追踪
BPDN	Basis Pursuit Denoising	降噪基追踪
CFAR	Constant False Alarm Rate	恒虚警率
CoSaMP	Compressive Sampling Matching Pursuit	压缩采样匹配追踪
CNR	Clutter-to-Noise Ratio	杂噪比
CPI	Coherent Processing Interval	相干处理间隔
CRLB	Cramer-Rao Lower Bound	克拉默-拉奥下界
CS	Compressed Sensing	压缩感知
DFT	Discrete Fourier Transform	离散傅里叶变换
FFT	Fast Fourier Transform	快速傅里叶变换
FPRI	Fixed Pulse Repetition Interval	固定脉冲重复间隔
GPR	Ground-Penetrating Radar	探地雷达
GRT	Generalized Radon transform	广义拉东变换
HRRP	High Resolution Range Profile	高分辨距离像
I.I.D.	Independent and Identically Distributed	独立同分布
IGO	Iterative Grid Optimization	迭代网格优化
ISAR	Inverse Synthetic Aperture Radar	逆合成孔径雷达
ISLR	Integrated Side-lobe Level Ratio	积分旁瓣比
LFM	Linear Frequency Modulation	线性调频
MCPC	Multi-Carrier Phase-Coded	多载频相位编码
MIMO	Multiple Input Multiple Output	多输入多输出
MLE	Maximum Likelihood Estimate	最大似然估计
MTRC	Migration Through Resolution Cells	越距离单元走动
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OMP	Orthogonal Matching Pursuit	正交匹配追踪
PDF	Probability Density Function	概率密度函数
PRF	Pulse Repetition Frequency	脉冲重复频率

PRI	Pulse Repetition Interval	脉冲重复间隔
PSD	Power Spectral Density	功率谱密度
PSLR	Peak Sidelobe Level Ratio	峰值旁瓣比
RCS	Radar Cross Section	雷达散射截面
ROMP	Regularized Orthogonal Matching Pursuit	正则化正交匹配追踪
RD	Range-Doppler	距离-多普勒
RDA	range-Doppler Algorithm	距离多普勒算法
RFH	Random Frequency-Hopping	随机跳频
RIC	Restricted Isometry Constant	约束等距常量
RIP	Restricted Isometry Property	约束等距性质
RPRI	Random Pulse Repetition Interval	随机脉冲重复间隔
SAR	Synthetic Aperture Radar	合成孔径雷达
SL0	Smoothed L0	平滑 L0
SCNR	Signal to Clutter and Noise Ratio	信杂噪比
SNR	Signal-to-Noise Ratio	信噪比
STCS	Short-Time Compressed Sensing	短时压缩感知
STFT	Short-Time Fourier Transform	短时傅里叶变换
TFD	Time-Frequency Distribution	时频分布
TWR	Through-the-Wall Radar	穿墙雷达
UWB	Ultra Wideband	超宽带
WGN	White Gaussian Noise	高斯白噪声
WVD	Wigner-Ville Distribution	维格纳分布

目 录

前言

缩略语表

第 1 章 概论	1
1.1 研究背景及其意义	1
1.2 随机调制雷达与压缩感知理论的内在联系	3
1.2.1 随机调制雷达信号的定义和特点	3
1.2.2 压缩感知理论的随机内涵	4
1.2.3 随机调制雷达与压缩感知的结合	6
1.3 随机雷达信号的历史与现状	7
1.3.1 捷变雷达的概况	7
1.3.2 噪声雷达的历史	8
1.3.3 离散随机调制雷达的现状	10
1.4 压缩感知雷达的概述	11
1.4.1 压缩感知理论与应用的现状	11
1.4.2 压缩感知雷达的研究现状	12
1.5 基于压缩感知的随机调制雷达研究热点与方向	16
1.5.1 基于压缩感知的随机调制雷达研究现状	16
1.5.2 压缩感知在随机调制雷达应用中的关键问题	17
1.6 主要内容和结构安排	18
第 2 章 基于压缩感知的随机调制信号参数估计	20
2.1 引言	20
2.2 数学模型抽象	21
2.2.1 RPRI 雷达运动目标回波模型	21
2.2.2 RFH 雷达目标宽带回波模型	21
2.2.3 抽象数学模型	22
2.3 随机调制参数估计的 CRLB	23
2.3.1 单个随机调制复正弦信号参数的 CRLB	23
2.3.2 估计参数 CRLB 的近似数学期望	24
2.4 随机调制参数的 MLE 及其统计特性	27
2.4.1 单个随机调制复正弦信号参数的 MLE	27

2.4.2	广义周期图统计特性	28
2.4.3	多个随机调制复正弦信号的参数估计	31
2.4.4	与相关处理及模糊函数的内在联系	32
2.5	基于压缩感知理论的参数估计	34
2.5.1	压缩感知中的 RIP 条件	34
2.5.2	随机调制词典的 RIP 性质	35
2.5.3	压缩感知参数估计原理	40
2.5.4	典型稀疏恢复算法	41
2.6	本章小结	42
第 3 章	基于迭代压缩感知的随机 PRI 雷达动目标检测	43
3.1	引言	43
3.2	基于迭代网格优化压缩感知 (CS-IGO) 的参数估计算法	44
3.2.1	网格失配模型	44
3.2.2	迭代网格优化算法	45
3.2.3	仿真分析	47
3.3	RPRI 雷达无模糊动目标检测技术	51
3.3.1	目标回波模型分析	51
3.3.2	基于 CS 或 CS-IGO 的多通道动目标检测	52
3.3.3	仿真分析	52
3.4	基于先验信息的随机 PRI 雷达杂波抑制技术	61
3.4.1	杂波回波信号模型	61
3.4.2	基于 CS-IGO 的杂波谱估计	62
3.4.3	基于预滤波和加权 l_1 范数最小化的杂波抑制	63
3.4.4	补充讨论	65
3.4.5	仿真分析	66
3.5	本章小结	73
第 4 章	基于序贯压缩感知的随机跳频雷达 ISAR 成像	74
4.1	引言	74
4.2	基于序贯压缩感知的高效参数估计理论	75
4.2.1	序贯压缩感知原理	75
4.2.2	停止准则	76
4.3	基于压缩感知的随机跳频雷达解耦 ISAR 成像技术	76
4.3.1	RSF 雷达 ISAR 模型	77
4.3.2	基于 CS 的解耦 ISAR 成像	81
4.3.3	CSD 算法的补充说明	84

4.3.4 仿真分析	87
4.4 基于序贯同伦的高分辨距离成像技术	95
4.4.1 基于 SCS 的 HRRP 合成	95
4.4.2 基于序贯同伦算法的 SCS 快速实现	97
4.4.3 仿真分析	100
4.5 基于序贯 SL0 的动态 ISAR 成像技术	104
4.5.1 基于二维 SCS 的 ISAR 成像算法	105
4.5.2 基于序贯 SL0 算法的二维 SCS 快速实现	106
4.5.3 仿真分析	108
4.6 本章小结	111
第 5 章 基于短时压缩感知的随机 PRI 雷达微动目标成像技术	113
5.1 引言	113
5.2 基于短时压缩感知的自适应时频分析理论	114
5.2.1 随机采样信号的短时压缩感知	114
5.2.2 自适应窗长选择	116
5.2.3 基于快速 SL0 的 STCS	117
5.2.4 仿真分析	120
5.3 基于 RPRI 雷达的微动目标特性分析	124
5.3.1 微多普勒的模糊现象	124
5.3.2 RPRI 雷达的微多普勒模型	125
5.3.3 仿真分析	125
5.4 基于 RPRI 雷达的高速旋转目标成像技术	128
5.4.1 窄带 RPRI 雷达快速旋转目标的散射点信号模型	130
5.4.2 基于 SDD-CS 的窄带 RPRI 雷达成像	131
5.4.3 仿真分析	135
5.5 本章小结	138
参考文献	139
附录 A 公式 (2.33) 的推导	157
附录 B 命题 2.1 的证明	159

第1章 概 论

1.1 研究背景及其意义

传统雷达信号处理以匹配滤波为基础,以线性变换为手段,力求在输出信号参数空间达到最大的信噪比和较高的分辨能力。然而,受信号模糊函数不确定性原理^[1]的限制,雷达对目标的速度分辨率和距离分辨率分别受到发射信号时宽和带宽的约束。在收发分时的脉冲体制雷达中,为了克服单个大时宽大带宽脉冲带来的大盲区、高采样率、高数据量和高硬件成本等问题,利用窄带相参脉冲串信号合成大时宽与大带宽成为雷达信号设计领域重要的发展趋势之一^[2]。在诸多相参合成处理方式中,最为典型也最为实用的有两种:一种是使用相同载频的周期脉冲串信号进行脉冲多普勒处理;另一种就是利用载频线性步进的窄带脉冲串信号合成宽带信号实现高分辨率脉冲压缩。针对这两种特殊信号形式,众多机构和学者先后开展了大量的研究工作,在动目标检测 (Moving Target Detection, MTD)^[3-6]、高分辨距离像 (High Resolution Range Profile, HRRP)^[7-10]、合成孔径雷达/逆合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar/Inverse Synthetic Aperture Radar, SAR/ISAR) 成像^[11-15] 和微动 (Micro-Motion, M-M) 目标特征提取与成像^[16-18] 等方面取得了一系列重要成果。

从信号设计的角度看,上述两种相参合成方式实际上是在模糊函数平面上利用时延和多普勒的模糊和耦合换取高的时延/多普勒分辨率,而其本质是在奈奎斯特采样定理的约束下用离散信号等效连续信号,因而信号参数之间会受无混叠条件的固有约束。在传统线性信号处理框架下,只要根据实际需求综合考虑各个参数之间的合理折中,便可采用线性代数的理论和方法较好地解决目标的检测、测速和成像等相关问题。然而,随着实际应用中需求的不断增长,尤其是数据量、相参处理时间与分辨率、模糊特性之间矛盾的日益突显,传统的奈奎斯特采样定理和线性信号处理方法遭遇瓶颈,迫切需要全新的信号设计与处理技术来实现雷达信号处理理论的突破和体制的变革。在新型信号设计方面,尽管正交频分复用 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 信号^[19] 或多载频相位编码 (Multi-Carrier Phase-Coded, MCPC) 信号^[20] 可以在一定程度上解决这一矛盾,但其信号幅度包络的起伏现象严重影响了其在实际应用中的相参性能。

追本溯源,不管是时延和多普勒的模糊或耦合,还是信号参数的混叠,都属于

不确定性原理的范畴,其本质上都是由信号的确定性和周期性所导致的;另外,奈奎斯特采样定律也仅仅限于时域和频域的均匀采样信号,且对信号等价的描述仅仅停留在时限和带限信号上。要想突破传统雷达信号处理中的不确定性原理和奈奎斯特采样定律,对回波信号引入随机性和新的先验信息是两个简单而直观的手段。其中,随机性的引入可以归为信号设计范畴,而先验信息的引入则对应于新的信号处理技术。近年来,随机雷达信号设计^[21-36]和参数化谱估计方法^[37-45]的快速发展为雷达信号设计与处理指引了新的方向。长期以来,这两个方向相对独立、各有利弊,一方面,采用非参数化方法的随机雷达信号处理可以较好地解决传统确定性雷达信号中模糊/耦合和抗干扰性能差等问题,但由于不确定性原理的约束,信号中的随机性会带来高旁瓣基底的固有缺陷;另一方面,考虑到大时宽和大带宽所产生的高维回波数据中蕴含着的目标信息本质上是低维的,参数化方法利用这种稀疏先验可以实现低旁瓣和超分辨处理,从而提高检测成像性能,但其又不能解决确定性雷达信号处理中的模糊/耦合等问题,且存在噪声稳健性低和模型定阶困难两个固有缺点。事实上,如果能够结合两者的优点,同时解决模糊/耦合与高旁瓣基底的问题,必将为新体制雷达的研制提供全新的思路。

由于传统的参数化方法如 MUSIC^[46]、ESPRIT^[42]等都是针对均匀采样信号提出的,对非均匀采样信号需要复杂的数据插值或者协方差插值步骤,直接应用于随机雷达信号处理时性能会大幅度下降,因此必须借助全新的信号处理工具。近年来出现的压缩感知 (Compressed Sensing, CS) 理论^[47-49]成功突破了奈奎斯特采样定律的限制,给信号处理领域带来了一场新的变革,已经引起了国内外诸多领域学者和研究机构的极大重视。该理论表明,只要信号具有稀疏性或可压缩性,就有可能通过少量的随机观测数据对信号进行高概率精确重构。这种稳健的半参数化方法^[50]巧妙地综合了信号稀疏性和测量随机性的优势,以稀疏感知矩阵的约束等距性质 (Restricted Isometry Property, RIP) 为基础前提,以非线性优化方法为估计手段,使得低旁瓣随机雷达信号处理变成了可能。

本书从新信号形式和新处理方法两个角度出发,旨在针对传统相参脉冲串体制雷达中存在的模糊和耦合两大瓶颈问题,设计合适的随机雷达信号,采用基于压缩感知理论的信号处理新技术实现目标的检测与成像,并就实际应用中存在的一系列难点问题提出相应的解决思路 and 手段。随机雷达信号和压缩感知理论的巧妙结合,将为新体制雷达的研制和部分现有雷达的改造提供实用性的技术支撑,对雷达信号处理学科的发展具有深远的影响和重要的科学意义。图 1.1 更为直观地给出了本书研究的背景和渊源。

1.2 节在定义随机调制雷达信号和介绍压缩感知理论内涵的基础上进一步深入挖掘压缩感知理论和随机调制雷达之间的内在联系,指出两者之间结合的必然性;1.3 节和 1.4 节分别揭示随机雷达信号的演变历程和压缩感知雷达的发展轨迹,

将已有研究成果进行分析与归类; 1.5 节总结压缩感知理论应用于随机调制雷达中的研究热点与方向, 并在此基础上梳理研究中存在的若干关键科学问题与技术问题; 1.6 节给出本书的主要研究内容和结构安排。

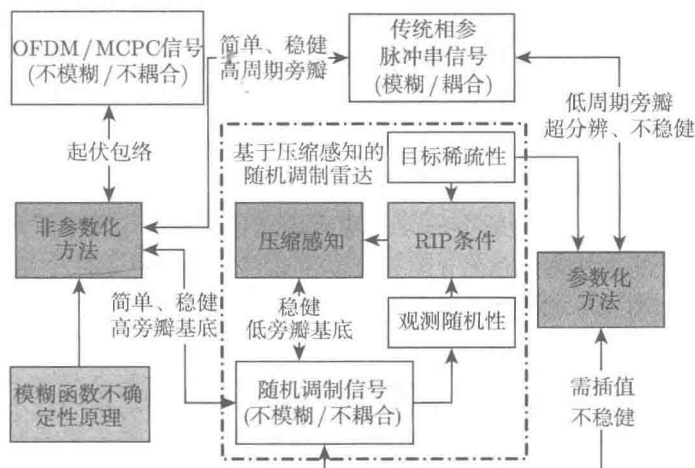


图 1.1 本书研究的背景和渊源

1.2 随机调制雷达与压缩感知理论的内在联系

1.2.1 随机调制雷达信号的定义和特点

信号与系统中调制的定义如下^[51]: 将某一个载有信息的信号嵌入另一个信号过程称为调制, 也可以理解为用一个信号去控制另一个信号的某一参量 (例如幅度、频率、相位等)。本书类比给出随机调制的概念: 将一个随机信号嵌入另一个信号的过程称为随机调制, 同样可以理解为用一个随机信号去控制另一个信号的某一参量。

雷达信号中最简单的形式就是矩形脉冲信号, 其他信号几乎都是在此基础上调制而成。如表 1.1 所示, 常见的确定性单脉冲调制信号包括高斯脉冲、线性调频脉冲、频率编码脉冲、相位编码脉冲、多载频相位编码脉冲等, 而常见的相参脉冲串信号有矩形脉冲串、线性调频脉冲串、参差重频脉冲串、频率步进脉冲串、编码步进脉冲串、调频步进脉冲串等^[2]。实质上, 这些信号都是在矩形脉冲信号的基础上通过调幅、调频和调相得到, 单脉冲和脉冲串又分别对应脉内调制和脉间调制。相应地, 如果对信号的幅度、频率和相位进行随机调制, 则会产生对应的“随机调制雷达信号”, 如: 脉内随机调制包括随机调幅脉冲、随机调频脉冲和随机调相脉冲等, 而脉间随机调制包括随机脉冲重复间隔 (Random Pulse Repetition

Interval, Random PRI, RPRI) 脉冲串、随机步进频脉冲串和随机跳频 (Random Frequency Hopping, RFH) 脉冲串等。显然, 随机调制雷达信号主要可以分为脉内随机调制信号、脉间随机调制信号及组合随机调制信号三大类。

不难看出, 这里定义的随机调制雷达信号的概念较为广泛, 几乎包含了与确定性雷达信号相对应的所有随机调制雷达信号, 既包括传统用于抗干扰的随机捷变信号 (例如随机捷变频信号、随机捷变脉冲重复频率 (Pulse Repetition Frequency, PRF) 信号和随机捷变波形信号等^[23,52,53]), 也包括广为研究的传统噪声雷达信号^[25-29,33] (等效为幅度服从瑞利分布、相位服从均匀分布的复合随机调幅调相信号), 同时还包括一些新型的改进噪声雷达信号^[54,55] (或者称为噪声调制雷达信号)。相对于确定性雷达信号, 随机调制雷达信号具有以下三个显著特点^[56]:

- (1) 具有“图钉型”模糊函数, 能够在很大程度上消除模糊/耦合效应;
- (2) 具有低截获信号的特点, 抗电子干扰性能较强;
- (3) 不同随机调制信号间具有准正交性, 适合应用于雷达组网技术中。

由于这三个特点在实际雷达系统尤其是雷达对抗中具有极为重要的作用, 因此相关学者对随机调制雷达理论和应用的研究一直没有停步。而且, 随着新型电子技术和混沌类随机学^[57,58] 等理论的发展, 随机调制雷达信号的产生逐步从理论走向实用, 从而又进一步推动了随机调制雷达理论的研究和发展。

表 1.1 确定性调制信号与随机调制雷达信号形式

确定性雷达信号	随机调制雷达信号
高斯脉冲	随机调幅脉冲
线性调频/频率编码脉冲	随机调频脉冲
相位编码脉冲	随机调相脉冲
多载频相位编码脉冲	随机多载频脉冲
周期/参差重频脉冲串	随机 PRI 脉冲串
频率步进脉冲串	随机步进频脉冲串
编码步进脉冲串	随机跳频脉冲串
确定性组合调制脉冲/脉冲串	随机组合调制脉冲/脉冲串

1.2.2 压缩感知理论的随机内涵

压缩感知 (又称压缩采样或压缩传感) 理论由 Candès、Tao 和 Donoho 于 2006 年建立^[47-49]。该理论表明对某些特定的信号可以用比传统方法少得多的采样数或测量数进行重构, 而这主要依赖于两个基本特性: 稀疏性 —— 信号本身的特性; 非相干性 —— 感知形式的特点。在调和信号分析的模型下, 他们给出了将稀疏线性回归等价转化为凸优化问题的充分条件, 该条件约束了信号稀疏度和感知矩阵之间的相关度, 大大地深化了人们对稀疏信号处理的认识。压缩感知理论一经建立,

便引起了世界范围的研究热潮,在数据压缩、编码理论、逆问题、数据获取、图像处理和雷达信号处理等众多领域得到了高度关注和广泛应用,被美国科技评论评为 2007 年度十大科技进展,并获得了“2008 年 IEEE 信息理论学会最佳论文奖”^[59]。

压缩感知理论是在已有稀疏成分分析理论^[60-65]基础上发展而来的。稀疏成分分析指出只要信号在某个词典上稀疏,即信号可以用这个词典中的某几个原子线性表示,那么通过基追踪 (Basis Pursuit, BP)^[62]、正交匹配追踪 (Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[66] 等优化方法有望对表示系数进行估计。当信号稀疏度和词典满足某种充分条件时,可以对系数进行精确估计,而当信号稀疏度与词典不满足充分条件时,通过优化算法得到的结果则存在很大的不确定性。传统的充分条件是用词典的相干性^[62]来描述的,而这个条件往往比较苛刻,在实际应用中很难得到满足,所以大多数情况下只能在不满足充分条件时得到不太确定的求解。为了进一步找到一个相对宽松的充分条件,需要新的指标来描述词典的非相干性,于是在压缩感知理论中一个被称为约束等距性质 (Restricted Isometry Property, RIP)^[67]的条件被提出用于约束信号稀疏度和词典的相关度,有效突破了传统奈奎斯特采样定理关于采样方式和点数的限制。压缩感知理论指出:

(1) 只要信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的,那么就可以用一个与变换基不相关的观测矩阵将高维信号随机投影到一个低维空间上,然后通过求解一个优化问题就可以从这些少量的投影中以高概率重构出原信号,可以证明这样的投影包含了重构信号的足够信息^[47];

(2) 进一步地,只要稀疏表示词典 (或者更确切地说是稀疏感知矩阵) 满足 RIP 条件,那么利用 BP 或者 OMP 等稀疏恢复算法就可以通过观测数据对稀疏信号进行精确的恢复^[68]。

然而,如何判断给定的稀疏感知矩阵是否具有 RIP 性质是一个组合复杂度问题^[69],Candès 等通过对观测引入随机性得到了十分有益的结论,最终奠定了整个理论体系的基础。研究指出,下列几种矩阵可以在很大概率下满足 RIP 性质:

(1) 高斯矩阵或者亚高斯随机矩阵 (例如伯努利矩阵等) 可以在很高的概率下保证 RIP 性质^[70];

(2) 对信号稀疏基的非相干域进行随机采样 (或者等价于对酉矩阵的行进行随机抽样),可以在很大概率上满足 RIP 性质^[71];

(3) 对冗余字典进行随机采样、把高斯或者亚高斯随机矩阵作用于冗余字典所构成的矩阵以及随机冗余词典本身在一定概率下也满足 RIP 性质^[70,72];

(4) 部分具有特定结构的确定性矩阵如离散线性调频词典、特普利茨矩阵等满足统计意义上的 RIP 性质^[73,74]。

这些矩阵为压缩感知理论在实际中的应用提供了参考依据和基础条件,然而,上面四种情况中对矩阵的要求和满足 RIP 条件的概率并不一致,据分析其对矩阵

所需的随机性条件依次降低,而满足 RIP 条件的概率也大致是依次降低的。前两种情况由于矩阵自身的随机性较强,因此对观测数据量的要求较低,而后面两个条件相比稀疏成分分析中词典相干性的条件并没有太多提高。由此可以看到,压缩感知理论从创建之初就与随机性有着密不可分的关系,现有结论也表明只有观测的随机性才能保证恢复结果的确定性。

1.2.3 随机调制雷达与压缩感知的结合

雷达信号处理问题归根到底是一个参数估计问题,不管是检测还是成像,其实质还是对目标相应的参数进行估计。例如,目标检测实际上是对目标距离和速度的估计,而目标成像实际上是对目标散射中心位置和强度的估计。压缩感知理论从理论上较为完备地阐述了随机性和稀疏先验在参数估计中的地位,为随机采样信号中的高精度参数估计带来了新的契机,也为随机调制雷达信号的设计与处理开启了全新的视角。

1) 随机调制雷达需要压缩感知

对于随机跳频^[34,35]或者随机 PRI^[22,24]等随机调制雷达,其目标回波通常表现为非均匀采样信号。对非均匀采样信号中的参数估计主要包括三类方法:非参数化方法、参数化方法和半参数化方法^[50]。然而,一方面,由于随机性的影响和不确定原理的限制,传统的非参数化处理方法(如时域相关方法^[34]或单频最小二乘方法^[50])会导致全局能量泄露,从而带来高旁瓣基底问题;另一方面,尽管参数化方法可以较好地克服高旁瓣问题,但基本的参数化方法(如非线性最小二乘^[50])只有在正确的模型阶数下全局收敛时才能取得较好的估计效果,这在实际应用中很难满足。另外,常用的 MUSIC^[46]、ESPRIT^[42]方法都是针对均匀采样信号提出的,对非均匀采样信号需要复杂的数据插值^[39]或者协方差插值^[75]步骤,性能及稳定性会有所下降。作为一类特殊的半参数化方法,稀疏恢复方法在信号较为稀疏时往往能够表现出更好的参数估计性能^[50,76],但由于其对精确恢复所提的充分条件较为苛刻,在实际应用中很难得到满足,因此也就无法从理论上保证精确求解的概率,需要借助压缩感知理论在精确恢复条件及恢复性能方面的最新结论。

2) 压缩感知适用于随机调制雷达

压缩感知理论在实际中的稳健应用基本需要两个条件:稀疏性和随机性。在高频区,窄带情况下同一距离门或速度门内的目标较少、宽带情况下大多数目标的主要散射中心个数也有限,这都为雷达回波信号的稀疏性提供了一定的保障;而通过设计合适的随机调制信号可以得到亚高斯随机矩阵、对稀疏基非相干域的随机采样矩阵等满足 RIP 性质的稀疏感知矩阵。因此在特定的信号形式和应用背景下,压缩感知理论适用于随机调制雷达信号的处理。另外,压缩感知理论的一个突出优势就是可以通过少量的观测数据,实现信号的恢复和参数估计。于是,对于特定的

随机调制雷达信号而言,可以用比传统时宽、带宽限制条件少得多的脉冲个数来实现,这样可以在保证分辨率不变的情况下进一步减少脉冲个数,从而用更小的运算量和更短的时间对目标进行检测和成像处理。

综上所述,将“随机调制雷达”与“压缩感知理论”相结合形成“随机调制压缩感知雷达”,有望给雷达信号处理带来全新的视角,为雷达检测成像性能的提高提供新的思路。

1.3 随机雷达信号的历史与现状

在介绍随机雷达信号的发展和现状前,需要特别说明的是,在很多文献中,“随机调制雷达”“随机信号雷达”与“噪声雷达”之间并没有严格的区分,为了使得概念不发生混淆,“随机调制雷达信号”也可以称为“广义随机雷达信号”或“广义噪声雷达信号”。另外,本书中随机调制雷达信号的分类主要是根据调制方式来确定的,因此,传统的随机捷变雷达和简单的随机调制雷达(如随机跳频、随机 PRI、随机相位编码等)可以看成属于离散随机调制雷达,而传统的噪声雷达则属于连续随机调制雷达。

1.3.1 捷变雷达的概况

雷达抗干扰主要分为四个重要的类型:发射机抗干扰、天线抗干扰、接收机和处理机抗干扰、系统抗干扰^[77]。其中发射机抗干扰理论中的一个重要分支就是捷变雷达。早在 20 世纪 60 年代,为了有效对抗敌方的有源干扰,美国先后研制出了非相干频率捷变和相干频率捷变雷达,从而奠定了捷变雷达在雷达抗干扰中的地位,也掀起了捷变雷达信号处理理论与方法的热潮。针对雷达发射机中的频率、PRI、极化方式、波形等参量,相关机构和学者分别研究了频率捷变、PRI 捷变、极化捷变和波形捷变等雷达的处理方法及抗干扰性能^[78],而随机捷变是最常见也是最实用的一种形式。

频率捷变^[79]是研究最为广泛的雷达捷变类型,主要是指在脉冲或者脉冲串间使用不同的载频发射脉冲信号,捷变的频率与脉冲的带宽相当或者略大于脉冲带宽。这种雷达可以有效对抗窄带瞄准式有源干扰,而且还具有加大探测距离、提高测角精度和抑制海杂波等优点。目前,绝大多数军用雷达都采用频率捷变体制,且正在向自适应捷变方式发展,将频率捷变与自适应旁瓣对消技术相结合,以便同时具备对抗自备式干扰机和掩护式干扰机的能力。然而,传统的频率捷变范围往往较小,也没有考虑脉冲间的合成带宽处理,因此始终停留在窄带雷达的范畴内,且当脉间存在频率捷变时无法通过多普勒滤波进行杂波的抑制。

PRI 捷变雷达^[80,81]也是一种常见的捷变雷达,通过改变脉冲串内的 PRI 或脉