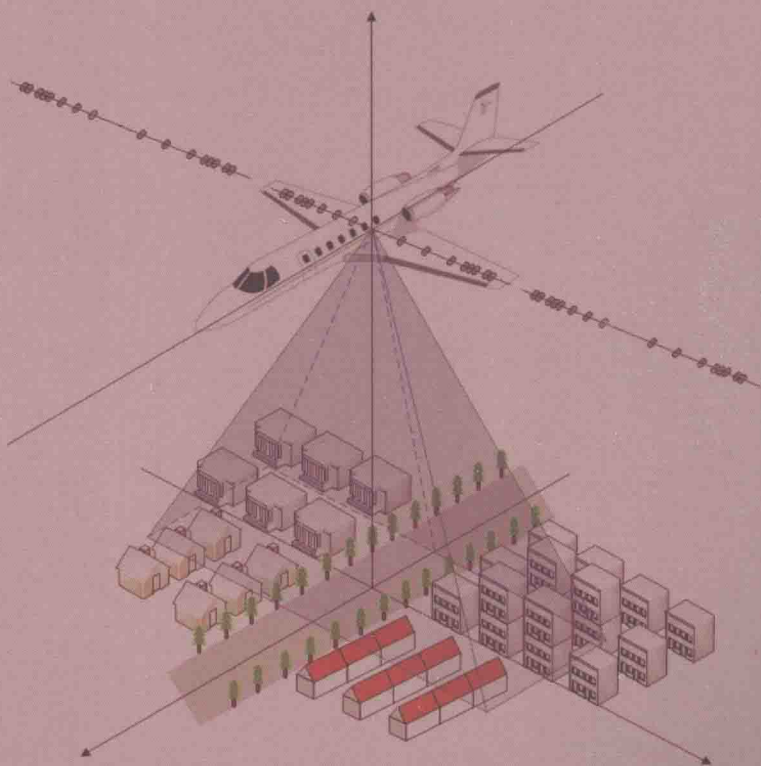


稀疏阵列天线雷达技术 及其应用

李道京 侯颖妮 滕秀敏 李烈辰 著



科学出版社

稀疏阵列天线雷达技术及其应用

李道京 侯颖妮 滕秀敏 李烈辰 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

稀疏阵列天线雷达技术是近年发展起来的一种用于对地成像和目标探测的新体制雷达技术,尤其适用于空间分辨率要求高、设备体积及质量约束条件多的工作环境。

本书共8章,首先阐述稀疏阵列天线雷达的概念,提出稀疏阵列天线优化设计和信号处理方法;然后针对机载和艇载平台,介绍稀疏阵列天线雷达在对地成像和运动目标探测方面的应用研究情况,给出部分暗室和实际数据的处理结果;最后讨论高度稀疏阵列孔径综合和对地成像处理方法。

本书适合雷达系统、雷达信号处理、微波成像和目标探测等领域科技人员参考使用,也可作为高等院校相关专业的教学和研究资料。

图书在版编目(CIP)数据

稀疏阵列天线雷达技术及其应用/李道京等著. —北京:科学出版社, 2014

ISBN 978-7-03-039418-7

I. ①稀… II. ①李… III. ①阵列雷达—研究 IV. ①TN959

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第309934号

责任编辑:牛宇锋 唐保军 / 责任校对:张凤琴

责任印制:肖 兴 / 封面设计:蓝正设计



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>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2014年6月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年6月第一次印刷 印张:13

字数:243 000

定价:80.00元

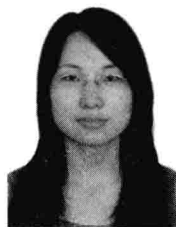
(如有印装质量问题,我社负责调换)

作者简介



李道京 男,研究员,博士研究生导师,1964年11月出生。1986年和1991年在南京理工大学分别获通信与电子系统专业工学学士和硕士学位,2003年在西北工业大学获电路与系统专业工学博士学位。1986年参加工作后在中国兵器工业第206研究所从事地面防空雷达的研制工作,2003年进入中国科学院电子学研究所通信与信息工程专业博士后流动站工作,2006年出站后进入中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室工作。主要研究方向为雷达系统和雷达信号处理,承担过国家自然科学基金、863计划、973计划、国家重大科技专项等多个项目,已发表学术论文90余篇,曾获2002年度国防科学技术三等奖一项,2002年度中国兵器工业集团公司科学技术二等奖一项,2007年度国家科学技术进步二等奖一项。

侯颖妮 女,高级工程师,1982年3月出生。2004年在西安理工大学获电子信息工程专业工学学士学位,2007年在西北工业大学获信号与信息处理专业工学硕士学位,2010年在中国科学院电子学研究所获信号与信息处理专业工学博士学位,2010年至今在南京电子技术研究所预先研究部工作,主要从事雷达成像与目标识别研究工作。



滕秀敏 女,工程师,1987年7月出生。2009年在中国科学技术大学获电子信息工程专业工学学士学位,2012年在中国科学院电子学研究所获信号与信息处理专业工学硕士学位,主要研究方向为稀疏阵列天线雷达成像技术,同年进入数据通信科学技术研究所工作。曾参与国家自然科学基金、863计划等多个项目。

李烈辰 男,博士研究生,1988年9月出生。2010年在中国农业大学获电子信息工程专业工学学士学位,同年进入中国科学院电子学研究所攻读信号与信息处理专业博士学位,主要研究方向为基于压缩感知的阵列天线雷达成像技术,参与国家自然科学基金等项目的研究工作。



前 言

稀疏阵列天线雷达是指利用在空间稀疏布设的多个子阵天线的孔径综合,通过空-时-频多维信号处理,以较少的设备量实现对地成像和运动目标探测的雷达系统。采用稀疏阵列天线,雷达可大幅度减少大尺寸阵列天线子阵及其对应的收发单元数量,这种技术尤其适用于空间分辨率要求高、设备体积重量约束条件多的工作环境,近年来的发展已得到高度关注。

本书是作者近年来在稀疏阵列天线雷达技术及其应用领域的工作总结。考虑到目前与稀疏阵列天线雷达技术相关的书籍不多,本书在撰写过程中注意了对稀疏阵列天线雷达系统概念、稀疏阵列天线优化设计和信号处理方法的描述,以使读者能更好地了解相关技术;结合稀疏阵列天线雷达的特点,本书重点介绍了其在机载平台下视/侧视三维成像和运动目标探测、在艇载平台对地成像和运动目标探测方面的应用研究情况,以表明稀疏阵列天线雷达技术的应用潜力;考虑到雷达技术的不断发展,本书的研究工作引入了近年提出的压缩感知理论,并在艇载平台上考虑了稀疏阵列天线的共形布局问题;本书同时给出了部分暗室和实际数据的处理结果,以表明稀疏阵列天线雷达信号处理方法的有效性。

本书的主要内容 by 李道京、侯颖妮、滕秀敏、李烈辰负责撰写。李道京确定了稀疏阵列天线雷达技术的研究思路和本书内容,撰写了第 1 章和 8.2 节内容,并负责整理定稿;侯颖妮撰写了第 2、第 3、第 4、第 6 章和 5.3 节内容;滕秀敏撰写了第 5、第 7 章和 3.4 节内容;研究生李烈辰撰写了 2.9 节、7.5 节和 8.4 节内容;研究生张清娟撰写了 8.3 节内容。研究生刘波、潘舟浩协助处理了本书部分实际数据,研究生田鹤协助整理了本书文稿,为本书作出了贡献,在此表示感谢。

在本书的撰写和研究过程中,作者得到了中国科学院电子学研究所的吴一戎院士、丁亦飏研究员、洪文研究员、朱敏慧研究员、王卫延研究员、尤红建研究员、向茂生研究员、种劲松研究员,西北工业大学的张麟兮教授、李南京博士,中国科学院空间科学与应用研究中心郝莹高级工程师等领导 and 同志的指导、帮助和鼓励,在此向他们表示最诚挚的感谢!

本书的撰写和出版,得到国家自然科学基金“稀疏阵列天线孔径综合的理论与技术”(项目批准号:61271422)项目的资助,在此表示感谢。

稀疏阵列天线雷达技术是一种新体制雷达技术,还在不断完善和发展之中,限于作者水平,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

作者

2013年9月

目 录

前言

第 1 章 概论	1
1.1 概念与内涵	1
1.2 研究意义	1
1.3 国内外研究现状	2
1.4 本书的内容安排	5
参考文献.....	6
第 2 章 稀疏阵列天线优化设计和信号处理方法	9
2.1 引言	9
2.2 阵列天线形式	9
2.2.1 均匀线列阵	9
2.2.2 二维平面阵	11
2.2.3 最小冗余线列阵	12
2.3 稀疏阵列天线设计.....	13
2.3.1 阵列天线基本概念	13
2.3.2 阵列天线稀疏化方案分析.....	16
2.3.3 基于模拟退火算法的稀疏阵列优化设计	18
2.3.4 稀疏阵列天线设计过程	21
2.4 阵列孔径综合分析.....	21
2.4.1 一维阵列孔径综合	22
2.4.2 二维阵列孔径综合	24
2.5 信号波形分析.....	27
2.5.1 线性调频信号	28
2.5.2 相位编码信号	28
2.6 成像算法.....	30
2.6.1 距离徙动算法	30
2.6.2 后向投影算法	31

2.7 杂波抑制方法	32
2.7.1 脉冲对消杂波抑制方法	32
2.7.2 STAP 杂波抑制方法	32
2.8 压缩感知理论	34
2.8.1 信号可压缩性描述	34
2.8.2 测量矩阵和信号重建算法	34
2.9 稀疏阵列天线雷达性能分析	36
2.9.1 雷达系统参数示例	36
2.9.2 信噪比分析	37
2.10 小结	39
参考文献	39
第3章 舰载稀疏阵列天线雷达对地成像和运动目标探测	41
3.1 引言	41
3.2 稀疏线阵天线雷达对地成像	41
3.2.1 收发方式设计	41
3.2.2 信号处理方法	42
3.2.3 实例分析	47
3.2.4 仿真结果	48
3.3 稀疏线阵天线雷达对运动目标成像	55
3.3.1 信号模型分析	56
3.3.2 基于压缩感知理论的成像算法	58
3.3.3 仿真分析	60
3.4 舰载共形稀疏阵列天线雷达对地成像和运动目标探测	70
3.4.1 成像模型和共形稀疏阵列天线的布阵方式	70
3.4.2 系统收发方案	73
3.4.3 对地成像	74
3.4.4 运动目标探测	75
3.4.5 仿真实验	76
3.5 小结	81
参考文献	82
第4章 码分信号在稀疏阵列天线雷达中的应用	84
4.1 引言	84

4.2 机载稀疏阵列天线雷达	84
4.2.1 收发方式设计	84
4.2.2 码分信号稀疏阵列孔径综合	85
4.2.3 子空间投影的杂波抑制算法	86
4.2.4 仿真分析	87
4.3 艇载稀疏阵列天线雷达	92
4.3.1 基于多发多收的 BP 成像算法	92
4.3.2 运动目标探测方法	93
4.3.3 仿真分析	95
4.4 小结	99
参考文献	100
第 5 章 机载稀疏阵列天线雷达下视三维成像	101
5.1 引言	101
5.2 系统描述	102
5.2.1 成像几何模型	102
5.2.2 阵列布局	103
5.3 单发多收系统成像处理	104
5.3.1 收发方式	104
5.3.2 信号处理	104
5.3.3 仿真参数	106
5.3.4 仿真结果	107
5.4 多发多收系统成像处理	111
5.4.1 收发方式	111
5.4.2 信号处理	112
5.4.3 扫描方式和仿真参数	117
5.4.4 仿真结果	119
5.5 稀疏重过航飞行成像处理	123
5.5.1 重过航飞行系统描述	123
5.5.2 重过航的采样方式	124
5.5.3 方向图分析	126
5.5.4 仿真实验	132
5.6 小结	135

参考文献	135
第 6 章 稀疏阵列天线暗室成像试验	137
6.1 引言	137
6.2 暗室试验系统	137
6.3 阵列误差校正方法	138
6.3.1 幅度误差校正	138
6.3.2 相位误差校正	139
6.4 试验数据处理	140
6.4.1 阵列误差估计	140
6.4.2 阵列误差校正前后成像结果	143
6.4.3 孔径综合前成像分析	145
6.4.4 基于压缩感知理论的成像结果	146
6.5 小结	149
参考文献	149
第 7 章 机载三孔径稀疏阵列毫米波 SAR 侧视三维成像	150
7.1 引言	150
7.2 系统描述	151
7.2.1 成像几何模型	151
7.2.2 交轨向孔径的结构布局	152
7.3 交轨向阵列方向图分析	153
7.4 基于波数域算法的侧视三维成像	154
7.4.1 三维成像算法	154
7.4.2 仿真实验	157
7.4.3 实际数据处理结果	160
7.5 基于压缩感知的侧视三维成像处理	161
7.5.1 三维成像算法	161
7.5.2 仿真实验及分析	165
7.5.3 实际数据处理结果	169
7.6 小结	169
参考文献	170
第 8 章 高度稀疏阵列的孔径综合和对地成像处理	172
8.1 引言	172

8.2 基于双波段信息的高度稀疏阵列天线孔径综合	172
8.2.1 高度稀疏阵列的旁瓣抑制方法	172
8.2.2 双波段稀疏阵列天线孔径综合仿真	173
8.3 基于连续场景的稀疏阵列 SAR 侧视三维成像	175
8.3.1 信号模型	175
8.3.2 信号处理	178
8.3.3 干涉 SAR 二维成像实际数据验证	179
8.3.4 阵列 SAR 侧视三维成像仿真分析	181
8.4 基于压缩感知的稀疏阵列 SAR 侧视三维成像	185
8.4.1 信号模型	185
8.4.2 稀疏性分析和处理方法	186
8.4.3 仿真实验和分析	188
8.5 小结	192
参考文献	192

第 1 章 概 论

1.1 概念与内涵

稀疏阵列天线雷达是指利用在空间稀疏布设的多个子阵天线的孔径综合,通过空-时-频多维信号处理,以较少的设备量实现对地成像和运动目标探测的雷达系统。采用稀疏阵列天线,雷达可大幅度减少大尺寸阵列天线子阵及其对应的收发单元数量,这种技术尤其适用于空间分辨率要求高、设备体积重量约束条件多的工作环境。

孔径综合是指利用在空间优化稀疏布局的多个多发多收子阵天线,获得更小间隔的空间采样点并产生新的天线相位中心,通过在空间重排处理,使稀疏阵列天线相位中心的数量和分布情况与满阵天线相同,在获取全阵高空间分辨率天线波束的同时,避免产生栅瓣和较高的旁瓣。

在系统体制上,稀疏阵列天线雷达可看作是各子阵采用正交信号实现宽波束发射,工作在宽发窄收方式下的多发多收雷达系统;其全阵高空间分辨率波束形成中的孔径综合和窄波束接收,可看作是基于子阵级接收数字波束形成处理的。在系统组成上,稀疏阵列天线雷达主要由大型稀疏阵列天线和中央电子设备两大部分组成,其中稀疏阵列天线子阵由多个可两维电扫的有源相控子阵和空间布设机构组成。在应用方向上,稀疏阵列天线雷达不仅可用于地基平台,也可用于机载和艇载平台。

1.2 研究意义

具有三维成像能力的雷达系统在国家基础测绘和战场侦察领域具有广阔的应用前景。常用的干涉合成孔径雷达(interferometric synthetic aperture radar, InSAR)通过交轨方向上两幅复图像的干涉相位来反演地物的高程,可生成三维数字高程模型(digital elevation model, DEM),但不具备地物高程上的分辨能力,只能称为 2.5 维成像系统。

在 2004 年的欧洲雷达年会上,Giret 等^[1]提出了机载下视毫米波三维合成孔径雷达(three-dimensional synthetic aperture radar, 3D-SAR)概念,它采用宽波束天线发射宽带信号,在交轨方向利用机翼上的多个连续均匀布设的子天线实施接收,在顺轨方向以合成孔径方式接收,其高程分辨率由发射信号带宽决定,顺轨方

向分辨率由合成孔径长度决定, 交轨方向分辨率由多个子天线构成的阵列天线的长度决定。由于 3D-SAR 的天线垂直指向地面, 这种系统不仅可避开地物阴影的影响, 小的人射角使合成孔径雷达 (synthetic aperture radar, SAR) 的发射功率也可较小, 在城市基础测绘方面具有很好的应用前景。为此, 2006 年德国 FGAN-FHR 即开展了低空无人机载毫米波下视三维成像雷达——三维成像和天底观测机载雷达 (airborne radar for three-dimensional imaging and nadir observation, ARTINO) (3D-SAR) 的研究工作^[2,3]。

3D-SAR 的交轨分辨率都是由交轨天线的长度决定的, 在高空作业中, 为了获得足够高的交轨分辨率, 就需要较长的交轨天线, 由此会产生大量的子天线和接收通道, 这使得其应用受到限制。为此, 迫切需要采用稀疏阵列天线来降低系统的复杂性^[4]。

平流层飞艇拥有巨大的空间和超长续航能力, 可作为区域预警的重要平台。采用平流层飞艇为平台的雷达系统具有作用距离远、覆盖区域大的特点, 可以实现全天候、长时间、稳定的大面积对地观测和运动目标探测。合成孔径雷达是利用雷达运动产生的空间虚拟孔径合成等效大孔径天线, 实现较高的空间分辨率。飞艇悬浮驻留的特点, 使其利用合成孔径雷达原理实现对地成像存在困难, 但其巨大的体积, 又为利用大尺寸天线雷达实现实孔径对地成像和运动目标探测提供了可能。

大尺寸的雷达天线为实现实孔径高分辨率成像创造了条件, 但与之对应的大量天线单元和接收通道, 使雷达系统的体积重量及复杂度增加。为覆盖足够的观测范围, 天线波束需扫描或天线应具有同时多波束处理能力, 这使得系统变得更为复杂。解决上述问题的一个途径就是考虑采用具有稀疏特点的阵列天线。

本书介绍的稀疏阵列天线雷达技术主要应用方向为机载/艇载稀疏阵列天线雷达对地成像和运动目标高分辨率探测, 相关的研究工作对现代雷达技术的发展具有重要意义。

1.3 国内外研究现状

目前, 稀疏阵列天线及其孔径综合技术在射电天文望远镜、地基/星载/机载成像辐射计和地基对空观测雷达^[5~11]中已获得了广泛的应用。

稀疏阵列天线最为典型的应用是在综合孔径射电天文望远镜和综合孔径微波辐射计中, 第二次世界大战后, 大批退役雷达的军转民用, 促进了射电天文技术的最初起步和发展。从 20 世纪 80 年代开始, 射电天文望远镜中的孔径综合技术被引入到了对地观测的微波辐射计中, 促使了综合孔径微波辐射计的诞生, 有效地解决了天线尺寸和分辨率之间的矛盾, 给微波辐射计带来了变革性的发展。比较具有代表性的是美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration,

NASA)在1988年研制的首个机载一维综合孔径辐射计——电扫稀布阵辐射计(electronically scanned thinned array radiometer, ESTAR),以及欧洲航天局土壤湿度和海洋盐度计划(Soil Moisture and Ocean Salinity, SMOS)的二维综合孔径辐射计——合成孔径微波成像辐射计(microwave imaging radiometer using aperture synthesis, MIRAS)。国内主要有中国科学院空间科学与应用研究中心研制并已投入使用的机载和星载微波辐射计。一维综合孔径射电天文望远镜和一维综合孔径微波辐射计都采用最小冗余线列阵,作为接收阵列,其空间分辨率由整个阵列尺寸决定,而且不存在稀疏阵旁瓣和积分旁瓣比较高的问题。这两者都采用干涉相关处理技术,要求目标信号空域不相关,这种情况下只适用于被动接收来自天体和地物的电磁辐射。

在地基空中运动目标探测雷达方面,20世纪70年代末,法国国家航天局提出将综合脉冲与孔径雷达(synthetic impulse and aperture radar, SIAR)的概念用于米波地基对空观测雷达中,该雷达采用全向天线单元,发射和接收相互正交的信号,在接收端通过匹配滤波处理,综合形成窄脉冲和发射波束,采用数字波束形成(digital beam forming, DBF)技术实现多波束接收。为了提高测角分辨率,发射和接收阵列采用了稀疏阵,但阵列稀疏化同时带来旁瓣高的问题,需要采用综合处理的方式加以解决。国内西安电子科技大学在这方面做了较多的研究工作^[7,8]。

在地基对空中运动目标成像的雷达中,文献[9]将阵列天线引入L型三天线干涉成像系统中,以改善三天线干涉对位于同一距离-多普勒单元散射点的分辨情况。将L型线阵扩展到面阵,并采用稀疏的二维面阵进行三维成像,在解决使用相互垂直天线阵列成像出现的散射点坐标配准问题的同时,可进一步提高成像性能。

在机载预警雷达地面运动目标探测方面,针对由于杂波谱在空域和时域存在耦合,用多普勒频移区分目标和杂波困难的问题,1973年Brennan等在自适应阵列信号处理基础上提出了最优空时自适应处理(space time adapting processing, STAP)方法,该方法根据杂波的协方差矩阵构造空时二维滤波器,能够有效抑制杂波。相比满阵天线,稀疏阵列在获得相同空间分辨率情况下,具有降低系统代价的优势,但是稀疏阵列旁瓣较高的特性,使得基于稀疏阵列的空时自适应处理的性能低于使用满阵的性能。Ward^[10]指出,进行杂波抑制所需的自由度由阵列配置方式决定,并给出了稀疏阵列杂波秩的上限和下限表达式。

在稀疏阵列天线雷达对地成像方面,德国提出的ARTINO(3D-SAR)系统采用稀疏布置的阵列天线实现机载下视三维成像,其发射单元位于机翼交轨阵列两端,接收单元位于阵列中间,采用时分工作方式获得的虚拟满阵天线单元位于发射和接收单元位置中间,获得的相位中心数目为发射单元和接收单元的乘积。ARTINO系统采用稀疏阵列实现数据获取,但是在成像时使用的还是虚拟满阵天线接收的数据。

由于稀疏阵列天线雷达一般采用正交信号(码分和频分信号)实现多发多收,故其也可归类为多输入输出(multi-input multi-output, MIMO)体制雷达^[8]。为缓解稀疏阵列对成像的影响,2008年 Klare 也探讨了频率分集和波形分集技术方案^[5]。

2006年,Donoho 提出了压缩感知(compressed sensing, CS)理论^[12],该理论表明,当信号具有稀疏性时可以通过远少于传统方法的采样数据对信号进行恢复。采用压缩感知理论,可以改变传统的数据获取方式,在数据获取时可以稀疏采样方式直接实现压缩。压缩感知理论一经提出,就在图像处理、雷达成像、无线通信等领域受到了高度关注^[13,14],国内外许多科研机构都针对其理论和应用开展了广泛的研究。

基于运动目标信号在空间域的稀疏性,国内的西安电子科技大学将压缩感知理论用于逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)对运动目标的超分辨成像,验证了其技术上的可行性并取得了显著的研究成果^[15~19]。

雷达系统的阵列天线可看成是雷达实现空间采样的一种设备,当观测对象信号具有稀疏性时,稀疏阵列天线雷达在原理上应可使用压缩感知理论,此时其信号的稀疏性不仅可定义在空间域,也可定义在频域或变换域。

当稀疏阵列天线雷达用于运动目标探测时,由于静止杂波对消后,运动目标场景已具有稀疏性,这给基于压缩感知理论利用稀疏阵列实现运动目标高分辨率探测创造了有利条件。由此可见,研究压缩感知理论在稀疏阵列天线雷达中的应用问题具有重要意义。

近年来,中国科学院电子学研究所在对稀疏阵列进行优化设计的基础上,采用码分和频分正交信号,较为系统地研究了机载/艇载稀疏阵列天线雷达对地成像和运动目标高分辨率探测中的重要问题,已取得了一定的研究成果^[20~43],其研究工作的基本思路如下:

在对地观测成像时,一方面利用稀疏阵多相位中心孔径综合,使综合后的相位中心数量和分布情况与满阵天线的相同,从而避免了稀疏阵栅瓣和旁瓣较高的问题,满足对地观测成像的使用要求;另一方面通过多孔径稀疏阵列的信号重构,使连续变化地物场景信号在频域具有窄带特性或变换域具有稀疏性,通过频域滤波处理或引入压缩感知理论直接使用稀疏阵列实现对地成像。

在运动目标探测成像时,一方面是将稀疏阵换成满阵利用空时自适应处理抑制杂波实现运动目标探测;另一方面是利用运动目标显示(moving target indication, MTI)处理抑制杂波,使观测场景中的运动目标信号具有稀疏性,将压缩感知理论引入稀疏阵列信号处理过程,根据稀疏阵列构型和脉冲压缩后的信号形式,构造基矩阵,并进一步实现运动目标探测成像。

1.4 本书的内容安排

本书是作者近年来在稀疏阵列天线雷达技术及其应用领域的研究工作总结,共 8 章,各章具体内容安排如下:

第 1 章为概论,主要介绍了稀疏阵列天线雷达的概念、研究意义、应用方向和研究现状。

第 2 章为稀疏阵列天线优化设计和信号处理方法,主要包括阵列天线形式、稀疏阵列天线设计、阵列孔径综合分析、信号波形分析、成像算法、杂波抑制方法、压缩感知理论、稀疏阵列天线雷达性能分析等内容,是本书的基础部分。

第 3 章为艇载稀疏阵列天线雷达对地成像和运动目标探测,艇载阵列天线构型包括稀疏线阵和共形稀疏阵列两种形式,采用多频正交信号形成多发多收的工作模式,在对地成像时给出了等效相位中心相位补偿和阵列误差补偿方法;在运动目标探测时,引入了压缩感知理论。

第 4 章为码分信号在稀疏阵列天线雷达中的应用,主要包括基于空时自适应处理(space time adapting processing, STAP)技术的机载顺轨稀疏阵列天线雷达运动目标探测,以及基于后向投影(back projection, BP)成像算法的艇载稀疏阵列天线雷达对静止目标成像和运动目标探测两部分内容。采用同频正交编码信号,实现多发多收,顺轨稀疏阵列天线雷达可以同时获得等效满阵的相位中心,有利于运动目标探测。

第 5 章为机载稀疏阵列天线雷达下视三维成像,主要包括单发多收系统成像处理、多发多收系统成像处理、稀疏重过航飞行成像处理三部分内容,系统地给出了实现下视三维成像的技术路线。

第 6 章为稀疏阵列天线暗室成像试验,主要包括阵列误差校正方法、孔径综合的成像结果和基于压缩感知理论的成像结果三部分内容。暗室数据的成像处理结果,表明了稀疏阵列天线雷达成像的可行性。

第 7 章为机载三孔径稀疏阵列毫米波 SAR 侧视三维成像,主要包括系统描述、交轨向阵列方向图分析、基于波数域算法的侧视三维成像和基于压缩感知的侧视三维成像处理。观测场景在高程方向具有稀疏性的特点,使压缩感知理论的应用成为可能。三孔径稀疏阵列是阵列天线的最小结构,三孔径稀疏阵列侧视 SAR 实际数据的处理结果,表明了稀疏阵列天线雷达的应用潜力。

第 8 章为高度稀疏阵列的孔径综合和对地成像处理,主要包括基于双波段信息的高度稀疏阵列天线孔径综合、基于连续场景的稀疏阵列 SAR 侧视三维成像和基于压缩感知的稀疏阵列 SAR 侧视三维成像。这部分研究工作表明,当观测场景连续变化,通过多孔径稀疏阵列的信号重构使信号具有稀疏性时,采用稀疏阵列天

线有可能直接实现对地成像。

参 考 文 献

- [1] Giret R, Jeuland H, Enert P. A study of 3D-SAR concept for a millimeter wave imaging radar onboard an UAV [C]. European Radar Conference, Amsterdam, 2004: 201-204.
- [2] Wei M, Ender J, Peters O, et al. An airborne radar for three dimensional imaging and observation-technical realisation and status of ARTINO [C]. EUSAR, Dresden, Germany, 2006.
- [3] Klare J, Wei M, Peters O, et al. ARTINO: A new high resolution 3D imaging radar system on an autonomous airborne platform[C]. IGARSS, Colorado, USA, 2006:3842-3845.
- [4] Klare J, Cerutti-maori D, Brenner A, et al. Image quality analysis of the vibrating sparse MIMO antenna array of the airborne 3D imaging radar ARTINO[C]. IGARSS, Boston, USA, 2008:5310-5314.
- [5] Klare J. Digital beamforming for a 3D MIMO SAR-improvements through frequency and waveform diversity[C]. IGARSS, 2008: 17-20.
- [6] Markus P, Helmut S, Stephan D, et al. Imaging technologies and applications of microwave radiometry[C]. European Radar Conference 2004, Amsterdam, 2004:269-273.
- [7] 保铮,张庆文. 一种新型的米波雷达——综合脉冲与孔径雷达[J]. 现代雷达,1995,2:1-13.
- [8] Chen D F, Chen B X, Zhang S H. Muti-input muti-output radar and sparse array synthetic impulse and aperture radar. International Conference on Radar[C]. Shanghai, China, 2006: 28-31.
- [9] Ma C, Yeo T S, Tan H S, et al. Three-dimensional isar imaging using a two-dimensional sparse antenna array[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(3): 378-382.
- [10] Ward J. Space-time adaptive processing with sparse antenna arrays[C]. The Thirty-Second Asilomar Conference on Signals, Systems & Computers, 1998: 1537-1541.
- [11] 何子述,韩春林,刘波. MIMO 雷达及其技术特点分析[J]. 电子学报, 2005, 33(12A): 2241-2245.
- [12] Donoho D L. Compressed sensing [J]. Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [13] Baraniuk R, Steeghs P. Compressive radar imaging[J]. IEEE Radar Conference, 2007, 5(2):128-133.
- [14] Candès E J, Wakin M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008,25(2):21-30.
- [15] Xu G, Xing M D, Zhang L, et al. Bayesian inverse synthetic aperture radar imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(6): 1150-1154.
- [16] Zhang L, Xing M D, Qiu C W, et al. Resolution enhancement for inversed synthetic aperture radar imaging under low SNR via improved compressive sensing[J]. IEEE Transac-