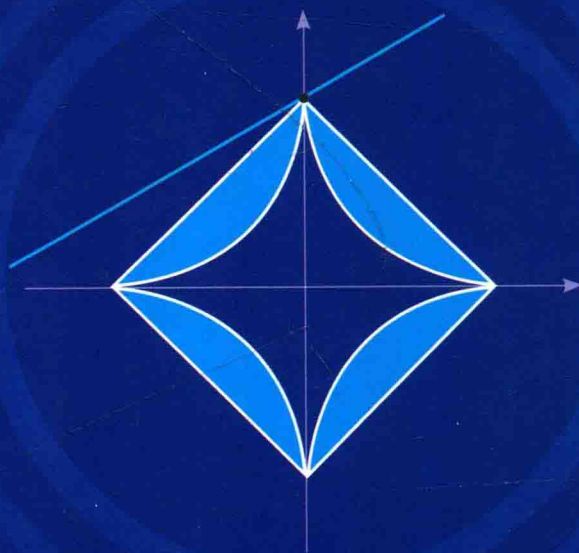




“十三五”国家重点出版物出版规划项目

稀疏微波成像导论

吴一戎 洪文 张冰尘 著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

稀疏微波成像导论

吴一戎 洪 文 张冰尘 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

稀疏微波成像是将稀疏信号处理引入微波成像并有机结合形成的新理论、新体制和新方法。本书系统地介绍其原理、方法和实验,主要包括:建立稀疏微波成像模型,介绍其稀疏表征、观测约束和性能评估;详细阐述基于成像算子的 SAR 原始数据域快速重构方法,将其应用于 ScanSAR、TOPS SAR、滑动聚束 SAR 等工作模式,并推广至基于偏置相位中心天线的一发多收 SAR 成像;给出机载原理性验证实验结果和初步星载雷达系统设计实例。

本书可供从事 SAR、稀疏信号处理等方面的科研人员使用,也可作为相关专业研究生的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

稀疏微波成像导论/吴一戎,洪文,张冰尘著. —北京:科学出版社,2018. 11

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-059203-3

I. ①稀… II. ①吴…②洪…③张… III. ①信号处理-微波成像

IV. ①TN911.7②O435.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 245850 号

责任编辑:刘宝莉 罗 娟 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 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>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张:12 3/4

字数:257 000

定价:100.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

在我国中长期对地观测计划“高分辨率对地观测系统”重大专项中,微波成像是重要的对地观测手段之一。合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是微波成像的一种重要形式,其不受日照和天气条件的限制,具有全天时、全天候观测目标或场景的能力,已成为资源勘察、环境监测和灾害评估等遥感应用不可或缺的手段。

稀疏信号处理是指从包含大量冗余信息的原始信号中提取出尽可能少的采样数据,对原始信号进行有效逼近和恢复的信号与信息处理技术。其基本思想可以追溯到 14 世纪的“奥卡姆剃刀”原理:若无必要,勿增实体。21 世纪初,数学家提出了压缩感知理论,使更多的工程技术人员认识到稀疏信号处理的潜力,促进其在工程领域的应用。

稀疏微波成像是将稀疏信号处理理论引入微波成像,且两者有机结合形成的微波成像新理论、新体制和新方法,即通过寻找被观测对象的稀疏表征域,在空间、时间、频谱或极化域稀疏采样获取被观测对象的稀疏微波信号,经信号处理和信息提取,获取被观测对象的空间位置、散射特征和运动特性等几何与物理特征。

如何将稀疏信号处理应用于 SAR 经历了长期的探索过程。早在 21 世纪初,已有学者将正则化方法应用于 SAR 信号处理,获得了特征增强的雷达图像。在压缩感知理论提出后,稀疏信号处理便很快应用于层析 SAR、逆 SAR、探地雷达等领域,其效果得到广泛的认可。由于在观测场景的稀疏表征、大场景海量数据重构的计算复杂性、系统与重构性能的评估等方面存在挑战,在初始研究阶段,将稀疏信号处理应用于 SAR 系统及其成像在国际上存在一定的争议。目前的研究结果表明,稀疏微波成像不仅具有设计更优性能指标 SAR 系统的潜力,而且可提升现有雷达系统的成像性能。

本书作者在国家重点基础研究发展计划(973 计划)、国家自然科学基金项目、国家高技术研究发展计划(863 计划)、中国科学院重点部署项目等的支持下,对稀疏微波成像开展了系统性研究。本书是作者近十年来从事

稀疏微波成像研究积累的成果,系统介绍以 SAR 应用为代表的稀疏微波成像原理、方法和实验。有关稀疏微波成像在 3D-SAR 成像、宽角 SAR 成像、运动目标检测、图像增强等方面的应用可参考《稀疏微波成像应用》一书。

全书共 6 章。第 1 章介绍微波成像、稀疏信号处理、稀疏微波成像的概念,概述稀疏信号处理在雷达成像领域应用的研究现状。第 2 章介绍雷达成像方面的基础知识。以条带 SAR 为例分析其成像原理,推导经典雷达成像处理方法,给出 SAR 方程、星载 SAR 系统设计要素等要点。第 3 章介绍稀疏信号处理方面的基础知识。阐述信号稀疏表征形式、观测矩阵性质、稀疏重构方法等内容。第 4 章介绍稀疏微波成像原理。给出雷达图像的空域稀疏、变换域稀疏和结构稀疏等三种稀疏形式,建立稀疏微波成像模型,分析成像雷达观测矩阵的约束因素和优化潜力,简要说明稀疏微波成像重构方法,并给出稀疏微波成像中雷达系统和雷达图像两个方面的性能指标。第 5 章介绍稀疏微波成像的快速重构方法。提出 SAR 原始数据域的稀疏微波成像方法,将稀疏信号处理与 SAR 解耦方法结合,利用成像算子替代稀疏重构中观测矩阵及其共轭转置,减少内存需求,提高计算效率,使稀疏信号处理可应用于大场景 SAR 成像。该方法可应用于 Scan-SAR、TOPS SAR、滑动聚束 SAR 等工作模式的稀疏微波成像,也可应用于基于偏置相位中心天线的一发多收 SAR 成像。它不但适用于欠采样数据成像,使利用稀疏信号处理降低成像雷达系统复杂度真正成为可能,而且还适用于满采样数据成像,提升现有 SAR 系统成像质量。第 6 章介绍稀疏微波成像的实验验证,开展机载原理性验证实验的雷达设计、数据获取和结果分析,通过实际数据处理,说明利用稀疏微波成像方法提升现有雷达系统成像性能的潜力,给出星载稀疏微波成像设计框图和初步设计实例。

本书内容体现了稀疏信号处理领域和微波成像领域有机结合的最新进展。感谢徐宗本院士在稀疏信号处理正则化理论方面的突破,使得稀疏微波成像技术能够有丰富的数学方法选择。本书的形成经过了长期的科研积累。一批研究生多年来系统深入地开展了稀疏微波成像的理论、体制、方法和实验研究,本书的内容包含了他们的研究成果,包括:稀疏信号处理重构方法(全相印、曾景山、赵曜);稀疏微波成像快速重构方法原理(方健、蒋成龙、魏中浩);ScanSAR、TOPS SAR、滑动聚束 SAR 稀疏微波成像重构方法(毕辉、徐志林);一发多收 SAR 稀疏微波成像重构方法(全相

印、吴辰阳);稀疏微波成像实验验证以及初步系统设计(张柘、蒋成龙)。在撰写本书的过程中,徐志林、吴辰阳、徐仲秋、张严、杨力、杨牡丹、刘鸣谦、陈晨等研究生进行了文字整理和图表绘制工作,在此表示感谢。

稀疏信号处理在雷达成像中的应用正在不断发展,本书试图在总结前期研究的基础上,将稀疏微波成像的理论发展与实践成果进行系统化梳理。由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 微波成像简介	1
1.2 稀疏信号处理概念	3
1.3 稀疏微波成像概念	4
1.4 稀疏微波成像必要性	6
1.5 研究现状	11
1.6 本书内容	15
第 2 章 雷达成像基础	18
2.1 雷达简介	18
2.2 合成孔径雷达成像原理	19
2.2.1 方位向合成孔径原理	19
2.2.2 距离向脉冲压缩原理	22
2.2.3 典型成像工作模式	23
2.3 合成孔径雷达成像算法	24
2.3.1 距离多普勒算法	24
2.3.2 chirp scaling 算法	26
2.4 合成孔径雷达方程	27
2.5 星载合成孔径雷达设计考虑	29
2.5.1 方位模糊和距离模糊	29
2.5.2 脉冲重复频率选择	32
2.6 本章小结	33
第 3 章 稀疏信号处理基础	34
3.1 引言	34
3.2 稀疏性与稀疏表征	35

3.2.1 信号的稀疏性	35
3.2.2 信号的稀疏表征	35
3.3 非相关观测	38
3.4 观测矩阵	40
3.4.1 零空间性质	40
3.4.2 约束等距性质	41
3.4.3 相关性	41
3.5 稀疏重构	42
3.5.1 稀疏重构模型	42
3.5.2 凸优化和非凸优化算法	44
3.5.3 贪婪追踪算法	46
3.5.4 贝叶斯重构算法	47
3.6 本章小结	49
第4章 稀疏微波成像原理	50
4.1 引言	50
4.2 稀疏微波成像模型	51
4.3 雷达图像稀疏表征	54
4.4 合成孔径雷达观测矩阵	58
4.4.1 影响因素	60
4.4.2 观测矩阵构建	65
4.5 稀疏微波成像重构方法	77
4.6 性能评估	79
4.6.1 系统性能	79
4.6.2 图像质量	84
4.7 本章小结	87
第5章 稀疏微波成像快速重构方法	88
5.1 基于近似观测的稀疏微波成像快速重构方法	88
5.1.1 引言	88
5.1.2 稀疏微波成像快速重构原理	89
5.1.3 基于 chirp scaling 算子快速重构方法	92

5.1.4	基于距离多普勒算子快速重构方法	98
5.1.5	基于 ω - k 算子快速重构方法	99
5.1.6	基于后向投影算子快速重构方法	101
5.1.7	小结	105
5.2	扫描成像模式	105
5.2.1	引言	105
5.2.2	ScanSAR 稀疏微波成像方法	106
5.2.3	TOPS SAR 稀疏微波成像方法	110
5.2.4	滑动聚束 SAR 稀疏微波成像方法	116
5.2.5	小结	119
5.3	DPCA 成像	120
5.3.1	引言	120
5.3.2	多通道 SAR 非均匀采样多普勒频谱重建	121
5.3.3	DPCA 稀疏微波成像方法	126
5.3.4	仿真实验	129
5.3.5	小结	134
5.4	本章小结	134
第 6 章	稀疏微波成像实验	135
6.1	引言	135
6.2	机载稀疏微波成像原理实验验证	135
6.2.1	实验目的	135
6.2.2	场景选择	136
6.2.3	采样设计	138
6.2.4	实验结果	139
6.3	提升现有雷达成像性能实验验证	158
6.3.1	分辨能力提升和旁瓣抑制	158
6.3.2	方位模糊抑制	161
6.3.3	目标背景比提升	162
6.4	星载稀疏微波成像初步设计	164
6.4.1	设计原理	164

6.4.2 设计实例	166
6.5 本章小结	169
参考文献	170
中英文对照表	187
索引	191

第 1 章 绪 论

1.1 微波成像简介

微波成像技术是以微波谱段的电磁波作为探测手段,利用微波传感器获取被观测对象散射特征和相关信息的技术。与光学成像技术相比,微波成像不受日照和天气条件的限制,具有全天时、全天候观测目标或场景的能力,已成为资源勘察、环境监测和灾害评估等遥感应用的重要手段。

固特异(Goodyear)公司的 Wiley 在 1951 年提出 SAR 概念,当时称其为多普勒波束锐化,并于 1965 年获得了专利(Wiley,1965)。美国伊利诺伊大学控制系统实验室的 Sherwin 研究团队,采用非聚焦合成孔径方法,得到了第一张 SAR 图像,从而验证了其原理的可行性(Sherwin et al.,1962)。美国密歇根大学 Willow Run 研究中心的 Cutrona 等利用其研制的 SAR 系统进行了飞行实验,并通过光学记录仪和光学相关器,获得了第一幅全聚焦的 SAR 图像(Cutrona & Hall,1962)。自此,SAR 基本原理得到了普遍的承认,SAR 系统的研制与应用在世界各国相继展开。

飞机和卫星是常见的 SAR 运载平台。随着雷达技术的发展和实际应用需求的多样化,逐渐出现了搭载于其他平台上的 SAR 系统,如弹载 SAR、无人机载 SAR 等。星载平台在太空中指定的轨道上运行,太空环境接近于真空,星载 SAR 的成像工作对运动补偿的依赖较小,同时由于运行轨道距离地球表面较远,星载 SAR 的测绘带宽通常可以达到百公里量级。星载 SAR 的研制,可以追溯到 1964 年发射升空的 X 波段 SAR 卫星 Quill,该卫星由美国国家侦察局(National Reconnaissance Office)资助研发,因为系统指标没有达到预期的结果,所以后续计划被迫取消。1978 年,美国国家航空航天局发射了 L 波段 SAR 卫星 SEASAT。SEASAT 在太空中成功地完成了对地观测任务,获得了大量高清晰度雷达图像,SEASAT 的发射标志着星载 SAR 步入实际应用阶段。美国利用航天飞机分别于 1981 年

和 1984 年将 SEASAT 的改进型成像雷达 SIR-A 和 SIR-B 送入太空。此外,苏联也相继发射了两颗 S 波段的星载 SAR,分别是 1987 年发射的 Kosmos 和 1991 年发射的 Almaz。1995 年,加拿大航天局发射了该国第一颗商用对地观测卫星 RadarSat-1,该颗卫星工作于 C 波段,其主要创新点在于使用了扫描 SAR(ScanSAR)来实现宽测绘的雷达成像。2000 年,美国实施了航天飞机雷达地形测绘任务(shuttle radar topography mission, SRTM)计划,凭借干涉 SAR(interferometric SAR, InSAR)成像技术,完成了地球南北纬 60° 之间地形高度图像的绘制工作。德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft-und Raumfahrt, DLR)于 2007 年发射了第一颗民用的 X 波段 SAR 卫星 TerraSAR-X,该卫星具有多种工作模式,其扫描工作模式分辨率为 15m,幅宽为 100km,聚束工作模式分辨率为 1m,幅宽为 30km,且该卫星与 2010 年发射的 Tandem-X 组成了双星编队,以支持多种双站和干涉应用。同年,加拿大又发射了 RadarSat-1 的增强版 RadarSat-2 星载 SAR,该卫星在 RadarSat-1 的基础上增加了高分辨率成像、全极化成像等功能。COSMO-SkyMed 是由意大利航天局和意大利国防部共同研发的高分辨率雷达卫星星座,该星座由 4 颗 X 波段 SAR 卫星组成,而整个卫星星座的发射任务已于 2008 年年底完成。COSMO-SkyMed 使用了多极化有源相控阵天线,最高分辨率可达 1m,测绘带宽度为 10km。此外,日本、中国、以色列和韩国等国也陆续将本国研制的星载 SAR 送入太空。

相比于星载 SAR,机载 SAR 的优势主要体现在它较为灵活,能够根据客户需求对某一地表区域进行反复观测,且可实现对雷达系统接收数据的实时处理。经过数十年的不断发展,机载 SAR 的性能得到了大幅度的提升,分辨率已由最早的 15m 提高到现在的亚分米量级,并可同时具备多波段、多极化、多模式的成像功能。目前,美国、德国、法国、以色列、中国等十几个国家均拥有各自的机载 SAR 系统,其中具有代表性的机载 SAR 有 HiSAR、GeoSAR、Lynx SAR、E-SAR、F-SAR、PAMIR、RAMSES、EL/M-2055 等。

我国对 SAR 的研究工作开始于 20 世纪 70 年代。1979 年中国科学院电子学研究所率先获得了国内首幅 SAR 图像。此后中国科学院电子学研究所率先在我国实现了一系列 SAR 系统及核心关键技术,研制出第一部极化 SAR、第一部干涉 SAR、第一部多维度 SAR,机载 SAR 分辨率优于

0.1m。在星载 SAR 方面,中国科学院电子学研究所于 1997 年完成了 L 波段星载 SAR 工程样机的研制工作,于 2012 年成功研制了首颗民用 SAR 卫星环境一号 C 星的有效载荷,于 2017 年成功研制了 SAR 卫星高分三号的有效载荷。

SAR 的性能由两个基本因素决定:微波成像理论与电子学器件的性能。在摩尔定律的驱动下,电子学器件的性能在近几十年一直飞速发展,支撑了半个世纪以来 SAR 系统性能的持续提升,将 SAR 从傅里叶光学处理时代一直带入数字信号处理时代,将 SAR 系统的分辨率从数十米一直提升到厘米级。另外,微波成像理论自 20 世纪中期提出后(Sherwin et al., 1962; Cutrona & Hall, 1962),指标性能不断提升,但其原理没有发生根本性的变化。随着电子学器件的制程达到纳米量级,摩尔定律开始面临瓶颈。进一步挖掘电子学器件的性能空间,将会导致系统复杂度、功耗与成本急剧提升,使得达到某一极限后,在现有架构下进一步提升电子学器件的性能将不再经济。

SAR 系统的复杂度由两大基本定律决定:雷达分辨理论(Woodward, 1953)和奈奎斯特采样定理(Nyquist, 1928; Shannon, 1949)。雷达分辨理论指出,分辨率提升需要增加雷达发射信号带宽和多普勒带宽;而奈奎斯特采样定理指出,随着信号带宽的增加,必须相应增加回波采样率和脉冲重复频率(pulse repetition frequency, PRF)。分辨率和测绘带宽提升使观测数据量呈线性甚至平方尺度增长,系统实现复杂度越来越高。电子学器件性能的提升潜力在现有架构下是有限的, SAR 系统性能的发展将面临瓶颈,与不断提升的应用需求产生矛盾。雷达分辨理论和奈奎斯特采样定理是普适的、不能违背的,要解决这个矛盾,只能利用 SAR 应用中的特殊性,其中一种可行的途径就是利用雷达成像中的稀疏性,将稀疏信号处理理论引入微波成像中。

1.2 稀疏信号处理概念

稀疏信号处理是指从包含大量冗余信息的原始信号中提取出尽可能少的采样数据,对原始信号进行有效逼近和恢复的信号与信息处理技术。其作为近年来数学界与工程界的研究热点,至今仍在不断发展、完善。稀

疏信号处理和若干数学分支存在密切联系,包括逼近理论、泛函分析、高维几何、概率论以及优化算法等,在编码与信息论、机器学习、贝叶斯推断、医疗影像、模拟信号采样、雷达信号处理等诸多方面存在巨大的应用潜力。

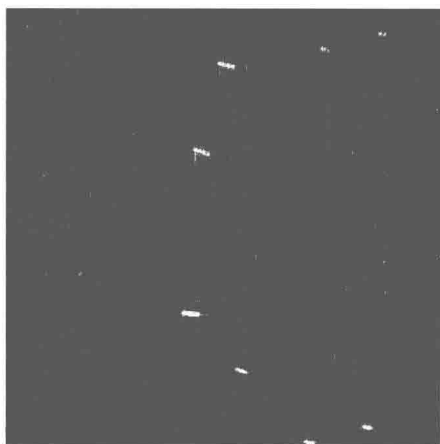
稀疏信号处理的基本思想可以追溯到14世纪的“奥卡姆剃刀”原理:若 unnecessary,勿增实体(Russell, 1949)。稀疏信号处理的研究目标是从原始信号中尽可能少地提取观测数据,同时能最大限度地保留原始信号中所包含的信息,对原始信号进行有效的逼近和恢复。由稀疏信号处理理论可知,若一个信号在某种变换域中是稀疏的,则这个信号可以用一组数据量远小于原信号量的观测值加以描述。Candès、Donoho、Baraniuk等提出的压缩感知(compressive sensing, CS)理论(Candès et al., 2006a; Donoho & Stodden, 2006; Candès & Wakin, 2008; Baraniuk, 2011)是稀疏信号处理领域的一个重要进展。作为稀疏信号处理领域的一个重要理论突破,压缩感知中信号重构的本质是求解欠定方程。一般来讲,如果一个方程中未知数的个数大于方程的个数,则方程有无穷多个解。然而,根据压缩感知理论可知,当方程解的非零元个数很少,即方程解具有稀疏特性,并且其观测方程满足某种条件时,该方程可以使用稀疏重构的方法来求解。如果信号是稀疏的,那么这个信号可以由远低于奈奎斯特采样定理要求的采样率进行采样并实现完美重构。被观测信号的相关性越强,信息冗余度越大,其稀疏性越强,在恢复时所需的观测数据越少。

1.3 稀疏微波成像概念

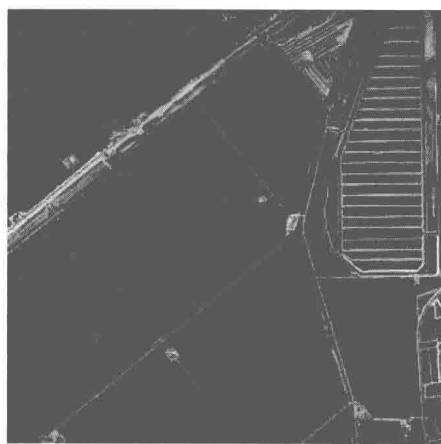
稀疏微波成像是将稀疏信号处理理论引入微波成像并有机结合形成的微波成像新理论、新体制和新方法,即通过寻找被观测对象的稀疏表征域,在空间、时间、频谱或极化域稀疏采样获取被观测对象的稀疏微波信号,经信号处理和信息提取,获取被观测对象的空间位置、散射特征和运动特性等几何与物理特征(吴一戎等, 2011a)。

直观上看,微波成像的稀疏性可以直接体现在微波图像或图像的变换域中,这是因为被观测的场景本身往往具有较强的相关性。微波图像是特定微波观测条件下,场景回波数据经相干合成处理后电磁散射特性的表征。作为被观测场景的不同观测数据集(微波成像原始数据、经部分成像处理的数据、微波图像或者其变换域)具有稀疏化表征的可能性。例如,

图 1.3.1(a)所示的 RadarSat-1 图像海面舰船场景是明显稀疏的,图 1.3.1(b)所示的场景是部分稀疏的,图 1.3.1(c)的稀疏性不太明显,但在某些变换域是稀疏的,图 1.3.1(d) 为图 1.3.1(c)的离散余弦变换域;图 1.3.1(e)是SAR 原始数据,不具有明显的稀疏性,但如图 1.3.1(f)所示,数据在距离压缩后具有一定的稀疏性。注意到微波成像数据的稀疏特性,以及微波成像过程的线性算子特性和观测对象信息的冗余性,可以将稀疏信号处理理论应用于微波成像。



(a) 明显稀疏的微波图像



(b) 部分稀疏的微波图像



(c) 不明显稀疏的微波图像



(d) 图像(c)的离散余弦变换域

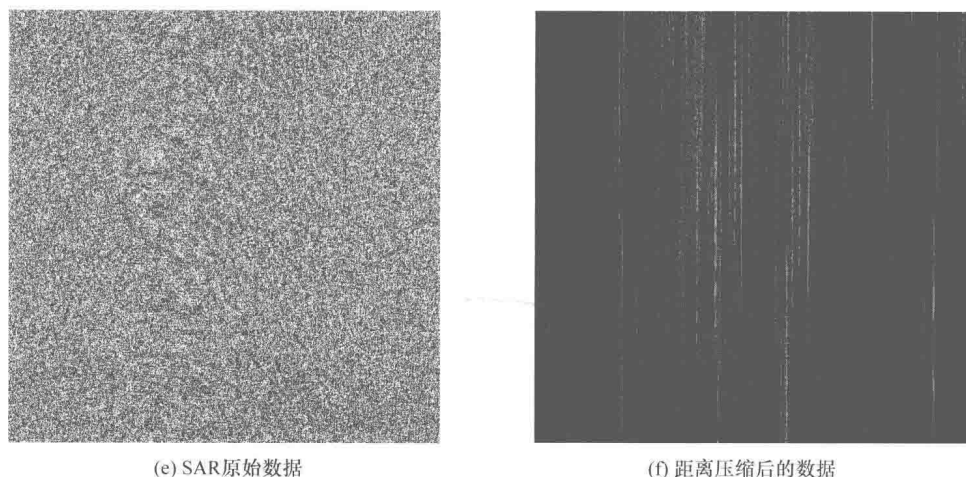


图 1.3.1 微波成像数据的稀疏性示例

1.4 稀疏微波成像必要性

稀疏微波成像系统在降低数据率、降低系统复杂度并提升系统成像性能等方面具有潜在的优势,也是近年来微波成像理论界的一个研究前沿与热点。下面从国家重大需求、微波成像技术自身持续发展的需要和我国微波遥感系统规划的需要三个方面阐述开展稀疏微波成像研究的必要性和迫切性。

1. 国家重大需求

获取地球表面与表层的大范围、高精度、多层次空间信息,掌握资源与环境态势,以应对自然资源紧缺、环境恶化、灾害频发等一系列重大问题,对国民经济建设和国家安全具有重大作用。以 SAR 为代表的微波成像是 20 世纪 50 年代发展起来的,它具有高分辨率、全天候、全天时的工作能力,已成为对地观测的重要手段,可以用来对热点地区进行全天候、全天时的动态侦察和测绘,提高热点地区的态势掌控能力,同时也可用来进行国土资源勘测、灾害评估以及海洋研究与环境监测,为国民经济提供服务,已成为当今世界高速发展和激烈竞争的技术领域(张澄波,1989;杨汝良,2013)。

高精度测绘与资源调查、自然灾害与环境监测、侦察监视与预警等国

家重大需求都急需高效获取大量高分辨率、高精度的微波成像数据。鉴于高分辨率对地观测对国家经济建设和国家安全的重大作用,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》已将“高分辨率对地观测系统”列为国家16个重大专项之一。

我国幅员辽阔,要满足高精度测绘与资源调查、自然灾害与环境监测、侦察监视与预警等国家重大需求,需要微波成像系统具有高分辨率、宽测绘带、高重访频率、多极化和多通道观测能力。例如,我国东部沿海至第二岛链的西太平洋海域面积约为 $3000\text{km} \times 6000\text{km}$,要对如此广阔的海域实现监视,具备大成像幅宽($\geq 500\text{km}$)、高重访频率的能力显得尤为重要,成像幅宽的增大、重访频率的提高可以提高时间分辨率、增强大范围快速观测能力。分辨率的提高能够获得更多的目标信息,增强微波图像的目标识别能力,因此是衡量微波成像探测目标能力的重要指标。据统计,识别驱逐舰等大型海面目标至少需要 1.0m 的图像分辨率。除分辨率和成像幅宽两个指标以外,极化信息的加入将进一步增强对观测对象不同散射机制的区分和目标识别,显著提高地物分类和目标识别精度,进而提高基础测绘、重大自然灾害监测、资源调查与环境监测的精度。据统计,利用L波段双极化(HH极化和VV极化)功率图像可达到50%以上的分类精度,而采用全极化数据后分类精度可达到80%以上。另外,多通道的微波成像可以实现对观测区域的高分辨宽测绘带成像、地面静止目标的二维/三维成像、地面运动目标(含海面上的各种目标、洋流等)的检测与成像等。高分辨率、宽测绘带、高重访频率、多极化和多通道等多维度微波成像数据能够高效地获取和处理是满足上述需求的必要条件。

理论上,微波成像的分辨率仅与系统的信号带宽和多普勒带宽有关,随着频谱宽度的增大,系统分辨率可以提高;观测带宽度仅与系统波束宽度有关,波束宽度越大,观测区域越宽。但是若要获取高分辨率和宽测绘带微波图像,则在实际系统实现中与硬件设计能力、系统功率要求、数据传输能力等息息相关。受集成电路、高功率器件等发展水平的限制,基于现有体制的微波成像系统规模庞大、数据海量,存在数据存储/传输难以实现、成像处理方法复杂且效率受限、信息冗余但特征提取困难等问题。针对国家重大需求,在现有条件下,要满足高分辨率对地观测系统重大专项中规划的微波成像载荷将面临许多挑战。首先,在数据获取方面,对于机载 3km 测绘带宽下实现 0.05m 分辨率的观测,如直接采用单通道成像要