

极化SAR影像噪声抑制 理论与方法

郎丰铠 杨 杰 著



科学出版社

极化 SAR 影像噪声抑制 理论与方法

郎丰铠 杨 杰 著



科学出版社

北 京

内 容 简 介

相干斑噪声对 SAR 影像解译造成严重影响,如何抑制相干斑噪声、提高 SAR 影像解译质量,一直是该领域的一个研究难点和热点。本书从极化 SAR 基本理论出发,介绍极化 SAR 数据相干斑统计特性,然后从滤波和分割两方面分别展开论述。滤波方面,在介绍典型滤波算法的基础上,阐述自适应窗口滤波算法和广义 GBMS 滤波算法,构建滤波算法评价体系,并进行实验分析;分割方面,介绍典型的分割算法,阐述扩展的统计区域合并(SRM)分割算法、GBMS 分割算法和基于超像素的二叉树分割算法,构建基于分割尺度的分割结果评价方法,并进行实验分析。

本书可作为测绘、地理信息、遥感与对地观测、计算机图像处理等相关领域的研究生、科研人员、教师和高年级本科生的研究和参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

极化 SAR 影像噪声抑制理论与方法/郎丰铠,杨杰著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-055332-4

I. 极… II. ①郎… ②杨… III. ①遥感图象-数字图象处理-研究
IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 281174 号

责任编辑:杨光华/责任校对:郑佩佩

责任印制:彭超/封面设计:苏波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:B5(720×1000)

2018 年 3 月第 一 版 印张:10 3/4

2018 年 3 月第一次印刷 字数:217 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

应中国矿业大学环境与测绘学院郎丰铠博士和武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室杨杰教授之邀,为其撰写的专著《极化 SAR 影像噪声抑制理论与方法》作序。

全极化 SAR 系统发展 30 多年来,其理论研究和技术应用领域不断发展,在农业(农作物分类、估产)、林业(树种分类、生物量估计)、地质(岩性分类)、水文(水体提取、污染检测、土壤湿度估计、冰雪厚度估计)、海洋监测(海冰冰龄和厚度估计、舰船监测、溢油检测)、灾害评估与救援(地震、洪涝、冰雪恶劣天气)等方面均有不可替代的作用。

雷达影像中固有的相干斑噪声对雷达影像解译造成严重干扰,对雷达影像中的相干斑噪声进行抑制是雷达遥感领域长期关注的课题,也是后续进行雷达影像分类、目标检测、定量反演等理论研究和技術应用的先行基础工作,其重要性不言而喻。近几年来,这本书的作者郎丰铠博士和杨杰教授,在我的关注下,针对极化 SAR 影像相干斑噪声抑制问题进行了深入研究,取得了一定的成果。如提出的 Generalized Mean Shift(GMS)滤波算法发表于 *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing(TGRS)* 期刊上,并受欧空局 Eric Pottier 教授邀请,加入到其主导开发的 PolSARpro 开源软件中,供全世界的同行研究使用;提出的 Generalized Statistical Region Merging(GSRM)分割算法发表于 *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters(GRSL)* 期刊上,并已经集成到 863 重大项目

“面向对象的高可信 SAR 处理系统”所开发的软件平台中,用于面向对象的极化 SAR 影像分类解译。

该书系统地综述了有关极化 SAR 的基础理论,注重基本原理和方法的描述,对所提出的算法及相关典型算法进行了详细阐述,并配以实验分析,做到了图文并茂、深入浅出。全书内容形成了较为完整的体系,是近年来极化 SAR 影像相干斑噪声抑制方面从理论方法到实验评价较为完备的专著,因此,我推荐给相关研究方向的学者阅读或参考。

在目前国内 SAR 系统硬件技术飞速发展,极化 SAR 数据越来越丰富,而数据解译处理相对滞后的情况下,期望这本书的出版能够起到积极的作用,推动我国极化 SAR 影像解译方面的理论研究和数据处理水平向前发展。我殷切地希望两位青年学者能够保持积极探索的态度,在雷达测绘领域做出更大贡献。

李德仁

2017 年 12 月于珞珈山

前 言

极化合成孔径雷达(polarimetric synthetic aperture radar, PolSAR)相比于单极化 SAR 系统能获取地面目标散射回波中包含的全极化信息,在分析、提取和反演目标极化散射特性上有单极化 SAR 无可比拟的优势。目前,国内外研制的机载和星载极化 SAR 系统越来越多,所获取的极化 SAR 数据越来越丰富。然而,相对于硬件系统的快速发展,极化 SAR 影像处理分析和自动解译等方面的研究还相对滞后。一方面是因为地球表面场景的极端复杂性使人们在短期内难以对所有地物目标的极化散射机理研究透彻,极化雷达理论中还有许多方面有待进一步研究;另一方面则是因为极化 SAR 系统的相干成像机制造成影像中不可避免地存在相干斑噪声,对极化 SAR 影像中地物的真实信息造成严重干扰,大大增加了极化 SAR 影像的解译难度。

极化 SAR 影像滤波和分割是极化 SAR 影像相干斑噪声抑制的重要手段。作为基于像素的和面向对象的极化 SAR 影像解译方法的重要预处理步骤,极化 SAR 影像滤波和分割对精确、快速地解译极化 SAR 影像有重要意义。本书以精确还原极化 SAR 影像中的真实信息为目标,在极化 SAR 影像滤波和分割方面进行深入研究。

在极化 SAR 影像滤波方面,本书系统总结现有的极化 SAR 影像滤波算法,按照所使用的技术将这些算法分为基于同质量度量的滤波、基于概率分布假设的滤波、基于片匹配的滤波和基于其他技术的滤波四大类,并指出这四大类滤波算法中存

在的问题,为后续的深入研究奠定基础;总结极化 SAR 影像滤波的基本原则和基本方法,在此基础上提出自适应窗口滤波和广义 Balloon mean shift(GBMS)滤波两种新的滤波算法;系统总结现有的各种定性和定量极化 SAR 影像滤波效果评价方法,将其分为有参考图评价法和无参考图评价法两大类,提出基于边缘保持系数的定量评价方法和基于极化目标分解的定量评价方法,构建较为完善的评价体系;通过利用模拟和真实极化 SAR 数据对现有算法和本书提出的两种新算法进行对比实验,证明本书提出的极化 SAR 滤波算法的有效性。

在极化 SAR 影像分割方面,针对现有的极化 SAR 影像分割算法在分割结果的形式上有较大差异、但是其名称却比较笼统的问题,本书将极化 SAR 影像分割算法按分割结果的不同分为常规分割、超像素分割和层次分割三大类,并明确阐述三大类分割方法之间的区别与联系,为后续的研究理清思路;针对统计区域合并(statistical region merging, SRM)算法只能用于光学图像的问题,对其进行改进,提出扩展的 SRM(GSRM)算法,并将其用于极化 SAR 影像常规分割和超像素分割;将本书提出的 GBMS 算法进一步延伸,用于极化 SAR 影像超像素分割;将超像素分割方法和层次分割方法结合,提出基于超像素的二叉树分割算法;总结现有的极化 SAR 影像分割结果评价方法,针对“分割尺度”这一重要概念目前还没有确切的数学定义的问题,给出分割尺度的数学定义,并进一步提出基于分割尺度的分割结果评价方法;利用真实的极化 SAR 数据对现有的和本书提出的极化 SAR 影像分割算法进行对比分析,证明本书提出的极化 SAR 影像分割算法的有效性。

本书主要内容由郎丰铠撰写,杨杰对全稿进行技术性指导并提出修改意见。本书研究和写作过程中得到了李德仁院士的指导并提出修改意见,中科院李震研究员,测科院黄国满研究员和张永红研究员,武汉大学巫兆聪教授、王密教授、郭丙轩教授、张良培教授和沈焕锋教授,中南大学李志伟教授也对本书提出宝贵的意见和建议,武汉大学赵伶俐对全稿进行校对,科学出版社的领导和编辑对本书提出形式和结构上的修改意见,并为本书的出版付出辛勤的劳动,在此对以上人员表示衷心的感谢!

本书出版由以下项目资助:国家自然科学基金青年科学基金项目(全极化 SAR 影像分割及评价方法研究,61601465),江苏省自然科学基金青年基金项目(基于超像素的极化 SAR 影像多尺度分割方法研究,BK20160244)。

由于作者水平有限,加上极化 SAR 领域的研究和应用日新月异,新技术、新方法不断涌现,书中难免存在疏漏、局限和不足之处,敬请读者不吝指教。

郎丰铠

2017 年 10 月于徐州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 概述	1
1.1.1 极化 SAR 系统的发展	1
1.1.2 极化 SAR 理论及应用	3
1.2 极化 SAR 影像滤波及分割研究进展	5
1.2.1 极化 SAR 影像滤波	6
1.2.2 极化 SAR 影像分割	8
1.3 本书研究内容及组织结构	10
1.3.1 研究内容	10
1.3.2 组织结构	13
第 2 章 极化 SAR 基本理论	14
2.1 电磁波的极化及其表征	14
2.1.1 极化椭圆	16
2.1.2 Jones 矢量	17
2.1.3 Stokes 矢量	17
2.1.4 Poincare 极化球	18
2.2 极化 SAR 数据的矩阵描述	19
2.2.1 Sinclair 矩阵与散射矢量	19
2.2.2 协方差矩阵与相干矩阵	21
2.2.3 Mueller 矩阵与 Kennaugh 矩阵	22
2.3 极化合成	24

2.3.1 基本理论	24
2.3.2 典型目标的极化响应	25
第3章 极化 SAR 数据相干斑统计特性	29
3.1 单极化 SAR 影像的统计特性	30
3.1.1 低分辨率 SAR 影像	30
3.1.2 高分辨率 SAR 影像	31
3.2 全极化 SAR 影像的统计特性	32
3.2.1 高斯模型	32
3.2.2 非高斯模型	33
3.3 等效视数	34
3.3.1 单极化 SAR 的等效视数	35
3.3.2 全极化 SAR 的等效视数	35
第4章 极化 SAR 影像滤波	37
4.1 极化 SAR 影像滤波基础	37
4.1.1 滤波的基本原则	37
4.1.2 滤波的基本方法	38
4.2 典型的滤波算法	40
4.2.1 精制极化 Lee 滤波	40
4.2.2 基于散射模型的滤波	41
4.2.3 改进的 Sigma 滤波	42
4.2.4 Nonlocal 滤波	44
4.3 自适应窗口滤波	45
4.3.1 极化同质度量度	46
4.3.2 形状自适应窗口	53
4.3.3 大小自适应窗口	54
4.3.4 新的滤波算法	55
4.4 Mean Shift 滤波	56
4.4.1 常规 Mean Shift 算法介绍	57
4.4.2 自适应非对称可变带宽 Mean Shift	61
4.4.3 极化 SAR Mean Shift 滤波器	64
4.4.4 参数设置对滤波结果的影响分析	65
4.5 滤波效果评价	72
4.5.1 有参考图评价法	73

4.5.2 无参考图评价法	75
4.6 滤波实验	77
4.6.1 实验数据介绍	77
4.6.2 实验结果及分析	79
4.6.3 实验结论	97
第5章 极化 SAR 影像分割	99
5.1 典型的分割算法	99
5.1.1 Ncut 分割	99
5.1.2 二叉树分割	102
5.1.3 PolSLIC 分割	104
5.2 SRM 分割	108
5.2.1 原始的 SRM 分割算法	108
5.2.2 扩展的 SRM 分割算法	112
5.3 Mean Shift 分割	118
5.3.1 合并准则	119
5.3.2 合并顺序	120
5.3.3 后处理	121
5.3.4 GBMS 超像素分割算法	121
5.3.5 分割算法稳定性与分割效果、分割效率之间的关系	122
5.4 基于超像素的二叉树分割	124
5.4.1 可选的超像素分割算法	126
5.4.2 S-BPT 分割算法	126
5.5 分割效果评价	127
5.5.1 比值法	127
5.5.2 分割尺度	127
5.6 分割实验	128
5.6.1 实验数据介绍	128
5.6.2 实验结果及分析	130
5.6.3 实验结论	144
参考文献	145

第 1 章 绪 论

1.1 概 述

1.1.1 极化 SAR 系统的发展

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种主动式微波遥感系统,是目前唯一可行的、实用的成像雷达技术^[1]。SAR 采用了脉冲压缩和孔径合成技术来提高距离向和方位向上的分辨能力,可获得高分辨率的雷达遥感影像;SAR 信号是由 SAR 系统自身提供的,而 SAR 系统不受光照条件的限制,可全天时工作;SAR 工作在微波波段, SAR 信号可穿透云层,从而不受气候条件的限制,可全天候工作。高分辨率、全天时、全天候的巨大优势使 SAR 系统一经问世便备受青睐。目前, SAR 遥感技术已经广泛应用在测绘、海洋、地质、农业、林业、考古以及城市规划、灾害监测等多个领域^[2,3]。

然而,传统 SAR 系统仅能在特定极化方式的天线下发射和接收电磁波,由于地物目标对不同极化方式的电磁波具有不同的散射特性,传统 SAR 系统在相当大的程度上丢失了雷达回波中包含的极化信息。全极化合成孔径雷达(polarimetric synthetic aperture radar, PolSAR)正是为了克服传统 SAR 系

统的这种缺陷而研制的。全极化 SAR 系统的发展始于 20 世纪 80 年代。1985 年,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)研制成功第一台机载 L 波段 PolSAR 系统 AIRSAR,该系统装载在 Convair CV990 型飞机上,在 1985 年 5~7 月进行了飞行试验。虽然由于飞行事故,该系统于当年 7 月便遭毁坏,但它标志着极化 SAR 系统进入实用阶段。1987 年,美国喷气推进实验室对 AIRSAR 系统进行了重建及升级,使之成为多波段机载极化雷达系统,并装载于 DC-8 型飞机上。新的 AIRSAR 系统能同时获取 P、L、C 三个波段的极化雷达影像,分辨率优于 10 m。在之后的将近 20 年里,AIRSAR 成为 NASA 主要的机载极化雷达系统,其在许多国家和地区获取的山脉、海洋、农作物、森林等多种地物数据成为早期极化 SAR 遥感理论分析和应用的主要数据来源^[1,4,5]。AIRSAR 系统获取的数据使人们意识到全极化 SAR 相对于单极化 SAR 的巨大优势,大大刺激了极化 SAR 系统的研制及极化 SAR 遥感理论的研究。之后,德国宇航局(Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt, DLR)、日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)以及加拿大、法国、丹麦等国家的相关机构相继推出了自己研制的机载极化 SAR 系统。

随着机载极化 SAR 系统的日益成熟,20 世纪 90 年代以后,极化 SAR 系统开始装载在航天飞机平台上。1994 年,NASA 和德国宇航局及意大利航天局(Agenzia Spaziale Italiana, ASI)共同进行了航天飞机成像雷达 SIR-C/X-SAR 的飞行任务。SIR-C 由 NASA/JPL 建造,为 L、C 双频全极化 SAR 系统,SIR-X 由德国宇航局和意大利航天局共同建造,为 X 波段 VV 单极化 SAR 系统。SIR-C/X-SAR 首次实现了利用多频、多极化 SAR 从太空对地球进行观测,显示出极化 SAR 系统全球成像的能力。SIR-C/X-SAR 的成功刺激了星载极化 SAR 系统的研究。2006 年,日本发射了世界上首颗全极化 SAR 卫星 ALOS,其携带的 PALSAR 系统可获取 L 波段全极化 SAR 数据,实现对地球环境和灾害的监测。之后,欧洲空间局(European Space Agency, ESA)以及德国、加拿大等国家和地区也相继成功发射星载全极化 SAR 系统。本书总结了从 1987 年至今部分国外研究机构研制的机载和星载 PolSAR 系统^[1,6-12],见表 1.1。

表 1.1 部分国外机载和星载 PolSAR 系统一览表

	PolSAR 系统	所属国家	启用时间/年	描述
机 载	AIRSAR	美国	1987	P、L、C 多频全极化
	ESAR	联邦德国	1988	P、L、C、X 极化、干涉、极化干涉
	FSAR	德国	2006	X、C、S、L、P 全极化
	Convair 580 C/X-SAR	加拿大		C、X 双极化、C 波段极化、干涉
	PISAR	日本	1996	L、X 全极化
	EMISAR	丹麦	1997	L、C 全极化
	UAVSAR	美国	2006	L 全极化
	AirMOSS	美国	2012	P 全极化
星 载	SIR-C/X-SAR (由航天飞机搭载)	美国	1994	L、C 全极化、X 单极化
	PALSAR	日本	2006	L 波段全极化
	PALSAR-2	日本	2014	L 波段全极化
	RADARSAT-2	加拿大	2007	C 波段全极化
	TerraSAR-X	德国	2007	X 波段全极化、双极化、单极化
	TanDEM X	德国	2010	与 TerraSAR X 构成干涉对

1.1.2 极化 SAR 理论及应用

电磁波极化理论的研究从 19 世纪中叶就已经开始,这段时期,以 Faraday、Stokes、Maxwell、Poincare 等为代表的一批学者的研究工作奠定了极化理论的基础。将极化理论应用于雷达是从 20 世纪 50 年代开始的。1950 年, Sinclair 在研究极化波的发射和接收时,提出了极化散射矩阵的概念,用来表示地物目标的极化散射特性^[13]。1952 年, Kennaugh 针对单静态条件下天线互易及相干情况提出了最优极化的概念^[14]。之后, Graves 在此基础上提出了目标的 Graves 功率矩阵^[15],为极化雷达目标特性分析做出了重要贡献。但是,在此后的很长一段时期内,由于极化波与目标的相互作用机理始终没有搞清楚,加之设备条件的限制,使得雷达极化领域的研究一度处于低迷状态。直到 1970 年, Huynen 在其博士论文

中提出了著名的雷达目标现象学理论^[16],才掀起了极化雷达理论研究的新高潮。Huynen 对雷达目标的极化散射特性进行了细致地分析,极大地丰富了极化雷达理论,对极化雷达的发展产生了深远的影响^[17]。此后,随着极化雷达技术的发展,极化雷达遥感理论和应用研究成果日益丰富,成为雷达领域的一个热点研究方向。

到目前为止,极化 SAR 理论方面的研究主要有如下几个方面^[18-20]。

(1) 极化数据的矩阵表达及转化。包括散射矩阵 S 、协方差矩阵 C 、相干矩阵 T 等及各矩阵表达形式之间的转换关系等内容。这部分内容主要由 Sinclair、Kennaugh、Graves、Huynen、Boerner、Lüneburg 等完成^[13-30]。在 20 世纪 90 年代已经形成完整的理论体系。

(2) 极化目标最优化。根据极化理论,雷达发射和接收天线的极化状态会影响目标接收功率,因此目标最优化问题就是求解什么样的极化状态下目标的接收功率达到最大值、最小值。这部分内容主要由 Kennaugh、Huynen、Boerner、Zyl^[31-33]、Yang^[34-36] 等完成,在 20 世纪末已较为完善。

(3) 相干斑统计特性及相干斑抑制。由于 SAR 的相干成像机制,SAR 影像中的相干斑如影随形,不可避免。为了能有效地进行 SAR 影像解译,必须清楚相干斑的统计特性,并在此基础上对相干斑进行抑制。根据图像分辨率及同质度的不同,相干斑统计模型可分为高斯模型和非高斯模型两大类,其中,高斯模型用于描述低分辨率、同质区域的统计特性^[37-44],而非高斯模型则用于描述高分辨率、纹理区域的统计特性^[1,37,45,46]。根据输出结果的不同,相干斑抑制方法可分为滤波和分割两种。其中,滤波结果主要用于基于像素的常规分析方法,而分割结果则用于面向对象的分析方法。由于相干斑统计特性与图像类型、视数、分辨率、场景同质度等多个因素都有关系,而相干斑抑制总与细节信息保持相矛盾,因此这部分内容到目前为止仍未得到很好的解决,并且在今后相当长的一段时期内都将会是一个研究热点。

(4) 极化方位角估计。长期以来,极化方位角估计一直被忽视,因为在极化数据分析过程中,为了使模型简化,往往假设雷达目标满足反射对称性。直到 Schuler 等^[47]发现由单幅极化 SAR 数据估计出极化方位角可进行地形测量,才引发了人们对极化方位角的关注。研究表明,极化方位角除可用于地形测量外,还可通过对极化 SAR 数据进行方位角补偿提高地球物理参数的估计精度及极化目标分解准确度^[48-55]。

(5) 极化目标分解。极化测量的一个重要目的就是提取地物目标的极化散射信息,而这正是极化目标分解所要解决的问题。极化目标分解的研究始于 Huynen 提出的雷达目标现象学理论^[16],之后,相继提出了很多极化目标分解算

法。按针对的目标类型,可分为相干目标分解^[56-62]和非相干目标分解。非相干目标分解又可分为基于 Kennaugh 矩阵二分的方法^[16,63,64]、基于特征矢量的方法^[65-69]和基于散射模型的方法^[70-78]。极化目标分解有助于理解地物目标的极化散射特性,是极化 SAR 遥感应用的基础。

(6) 极化目标分类。地物目标分类是遥感图像解译的重要研究内容,通过分类既可验证许多基础理论算法的正确性,又可用于变化监测、目标识别等其他应用,因此分类是遥感图像处理理论到应用的关键步骤。极化 SAR 图像分类的研究始于 1988 年,Kong 等利用最大似然分类器对极化 SAR 图像进行监督分类^[79]。之后,以 Zyl^[80,81]、Pottier^[82-85]、Cloude^[68,83,84]、Lee^[41,85-88]为代表的学者提出了很多经典的极化 SAR 分类算法,引发了极化 SAR 分类研究的热潮。到目前为止,虽然出现的极化 SAR 分类算法已经非常多^[9,89-94],但是由于地物类型的多样性以及遥感图像分类中常遇到的“同谱异物”及“同物异谱”现象,在今后的相当长时间内,极化目标分类仍将是一个研究热点。

(7) 地表参数估计。由于雷达信号对地物的介电性质和几何结构比较敏感,因其可用于包括表面粗糙度及土壤湿度估计等在内的许多地形地表参数估计^[95-101]。

(8) 极化干涉。极化干涉技术是雷达极化和雷达干涉技术的融合,通过利用极化信息对散射中心的敏感性和干涉技术对高度的测量能力,极化干涉技术可提取更加丰富的地形信息。由于实验数据的限制,该方面的研究于 1995 年才开始^[18],之后,该技术得到了迅速的发展。到目前为止,其应用包括地表覆盖分类^[88,102-107]、地形地表参数反演及植被结构反演^[108-122]等方面。

1.2 极化 SAR 影像滤波及分割研究进展

相干斑噪声抑制是极化 SAR 影像解译过程中的一个重要预处理步骤^[123]。极化 SAR 影像相干斑噪声抑制主要分两种方法:滤波和分割^[124]。前者是图像降噪的常规手段,为了在滤波的同时保留图像中的细节信息,滤波时需要在噪声抑制和细节保持两个矛盾之间求得平衡,因此滤波只能一定程度上抑制噪声,并不能完全消除噪声;后者是在面向对象的图像分析方法的基础上发展起来的一类方法,通过分割将图像划分为一个个连通区域,分割后不同区域内的像素差别较大,同一区域内的像素比较相似。由于分割后可以将区域内所有的像素作为一个整体进行处理,因此分割区域内的噪声被完全掩盖,从而达到抑制噪声的目的。另外,分割后

除像素值外区域的大小、形状、纹理等信息成为辅助解译的重要信息。因此,与基于像素的图像解译方法相比,它既能克服噪声影响,又能利用更多的辅助信息,从而提高图像解译精度。

作为极化 SAR 影像解译的重要研究内容,极化 SAR 影像滤波和分割的研究均有十多年历史,到目前为止已经有很多经典的算法相继出现。因此本节将从上述两方面对国内外研究进展进行阐述,并分析目前研究中存在的问题。

1.2.1 极化 SAR 影像滤波

到目前为止,比较典型的极化 SAR 影像滤波方法可大致分为四大类:基于同质度量度的滤波、基于概率分布假设的滤波、基于片匹配的滤波和基于其他技术的滤波。

1. 基于同质度量度的滤波

基于同质度量度的滤波方法的基本思路是首先定义一组同质度量度及其对应的阈值,将图像中的目标分为点、线、边缘、同质区域和纹理区域,然后针对不同类型的目标设计不同的模板,并按照模板进行局部统计滤波。Lopes 等^[125]提出利用变差系数(coefficient of variation, CoV)来描述场景的异质性,并据此将目标分为三类:同质区域、异质区域和点目标。其中,对同质区域内的像素直接进行取平均,对异质区域内的像素则用模板进行滤波,对点目标则保持不变。之后, Lopes 等^[126]又构建了一个自适应结构保持滤波器,利用变差系数和均值比(ratio of average, RoA)边缘检测器来划分同质区域、边缘、线和点等目标。Wu 等^[127]提出一种最大同质区域滤波器,利用自适应定制窗口在滤波的同时保持边缘等细节。此算法利用局部标准差 σ_g 来检测窗口同质度,但是 σ_g 不适于具有高动态像素值的 SAR 影像,对此, Nicolas 等^[128]提出用变差系数代替 σ_g 。Ju 等^[129]提出利用最强边缘裁剪的 RoA 边缘检测器来改进 Lee 滤波器。Touzi^[130]提出联合均值比和变差系数来检测点、线、边缘、同质区域和纹理区域。Serkan 等^[131]提出边缘图导向的自适应均值滤波器,利用交叉边缘检测图来寻找最大同质区域,使同质区域能获得尽可能的噪声抑制效果。Chen 等^[132]提出利用算术与几何均值比来检测同质度,但实际检测效果并不好。Shamsoddini 等^[133]提出利用边缘图的标准差和变差系数来检测点、边缘和纹理区域、同质区域。该算法效果较之前的同类算法效果改进不大。为了避免同质度阈值设置问题, Lee 等^[134]提出对所有像素用非方形边缘梯度窗口进行滤波。然而,此方法又会带来新的问题:扇贝效应。

2. 基于概率分布假设的滤波

单视及多视情况下 SAR 强度和幅度图像的概率密度函数(probability density functions, PDF)已经被推导出来,因此可以以此作为先验知识来设计滤波器。Lopes 等^[135]在多视 K 分布的假设下构建了 Gamma 相干斑模型和 Gamma 反射模型,并在此基础上通过最大化 Bayes 准则获得了一个单点最大后验(maximum a posteriori, MAP)滤波器。Lee 等^[136, 137]基于相干斑的理论概率分布模型提出了改进的 Sigma 滤波器。该算法健壮性好、细节保持能力强,但为了保持强点目标而未对强点目标进行任何处理,造成滤波结果有时会有强的斑点存在。Vasile 等^[138]利用区域增长思想提出了基于强度图像的强度驱动自适应邻域(intensity-driven adaptive-neighborhood, IDAN)滤波器。该算法首先设置初始种子点,然后以此为中心进行 2 倍 Sigma 扩展,从而构成自适应邻域。由于此算法设计时未考虑中高分辨率数据的概率分布,因此在对这些数据进行滤波时会导致滤波结果产生偏差。为解决此问题,Vasile 等^[45]又对 IDAN 算法进行了若干改进,并最终提出新的功率驱动自适应邻域(span-driven adaptive-neighborhood, SDAN)滤波器。改进后的算法允许使用针对高分辨率的异质场景模型,如球不变随机矢量(spherically invariant random vectors, SIRV)模型^[46],从而更适合于高分辨率异质场景数据的滤波。但是其输入只能是单视散射矩阵,因此多视数据无法使用此算法,这大大限制了算法的使用范围。

以上两种方法思路简单直观,易于理解,并且对单极化、多极化、极化干涉数据均可使用,算法执行效率往往也很高,因此,无论在研究还是应用方面均很受欢迎。但是,这两种方法都有其难以克服的缺陷。第一种方法中同质度的选择和对应阈值的设置直接影响最终的滤波效果。目前常用的是变差系数和边缘检测图,这两种同质度量度对同质区和非同质区的区分不够明显,阈值较难设定。第二种方法中假定的数据概率密度函数和真实数据概率密度分布是否一致对滤波结果有很大影响。众所周知,SAR 强度和幅度数据、单视和多视数据、单极化和全极化数据都有不同的 PDF,甚至不同分辨率下 SAR 数据的 PDF 也不同,因此,必须对不同类型的数据设计不同的滤波器。

3. 基于片匹配的滤波

基于片匹配的滤波方法是近几年才发展起来的一种优异的滤波算法。其基本思想是将待处理像素及其邻域像素作为一个“片”,然后在较大的范围内比较以其他像素为中心的片与待处理像素为中心的片的相似度,并以此相似度为权重进行