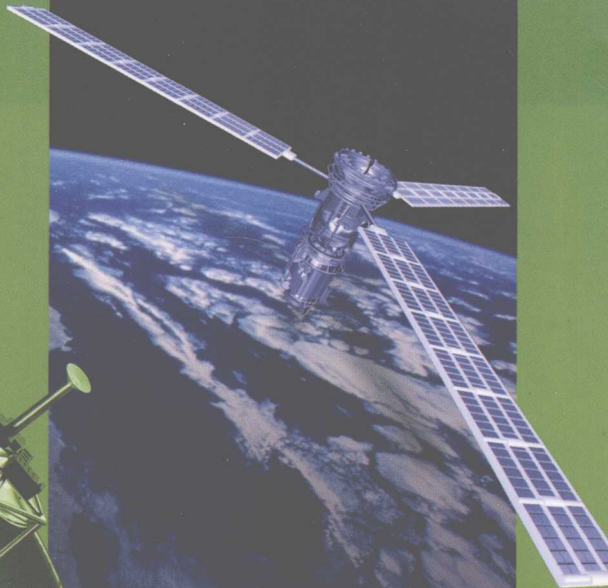
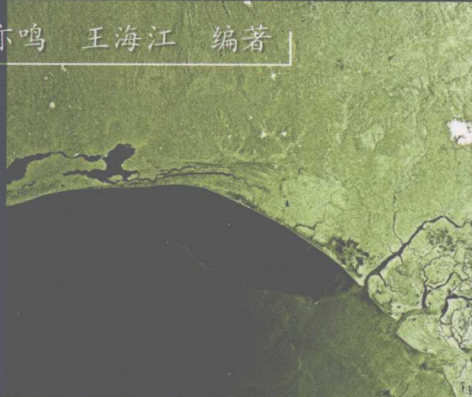


学术专著
Academic Monograph



极化雷达 图像增强理论

付毓生 杨晓波 皮亦鸣 王海江 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

极化雷达图像增强理论

付毓生 杨晓波 皮亦鸣 王海江 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

极化合成孔径雷达图像增强是合成孔径雷达图像处理的一个重要方面。由于极化 SAR 的相干成像特性,其固有的相干斑噪声严重影响了后续目标检测、分类和识别等应用,因此极化 SAR 图像增强主要是进行相干斑抑制。

本书从极化合成孔径雷达的基本原理讲起,以极化合成孔径雷达图像的相干斑抑制为主要内容,分为三大部分:第一部分为第 2 章,主要讲述了极化的概念和极化 SAR 基础理论;第二部分为第 3 章至第 4 章,包括单极化和多极化 SAR 图像的相干斑形成机理、相干斑特性和模型以及相干斑抑制的各种方法讨论;第三部分为第 5 章至第 6 章,介绍了独立分量分析(ICA)的原理及在 SAR 图像相干斑抑制和在地物分类中的应用。本书既包括极化 SAR 图像增强的基础理论和方法,也包括近年来该领域的最新发展状况。

本书可供雷达技术领域的工程技术人员和科研人员阅读参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

极化雷达图像增强理论/付毓生等编著. —北京:电子工业出版社,2008.4
ISBN 978-7-121-06137-0

I.极… II.付… III.极化(电子学)—合成孔径雷达—图像增强 IV.TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 028703

责任编辑:史 涛

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:850×1168 1/32 印张:5.5 字数:124 千字

印 次:2008 年 4 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:18.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

合成孔径雷达（SAR）是一种具有高分辨率的成像雷达，可以获得高方位分辨率的雷达图像数据。单极化 SAR 仅能获得地面场景在某一特定极化收发组合下的目标散射特性，所得到的信息是非常有限的。全极化合成孔径雷达是用来测量辐射信号极化特征的新型成像雷达，具有能够测量场景中每个分辨单元的全极化散射矩阵和产生二维高分辨率图像的两大优点，大大提高了它对地物的识别能力，因此在遥感技术研究与应用领域中起着越来越重要的作用。与光学传感器相比，SAR 具有全天时和全天候工作能力的独特优点。随着 SAR 技术的发展和提高，其分辨率越来越高，目前已接近或超过光学成像的分辨率，因而被广泛应用于地球遥感、海洋研究、资源勘探、灾情预报和军事侦察等领域。

由于 SAR 和极化 SAR 的相干成像特性，其固有的相干斑噪声严重影响了后续目标检测、分类和识别等应用，因此相干斑的抑制成为 SAR 和极化 SAR 图像后处理的第一步，这种噪声的抑制方法一直是极化 SAR 信号处理领域一个很值得探讨的问题。

早期的相干斑抑制方法是在 SAR 成像处理中，通过多视处理降低相干斑噪声。但是，多视处理中图像辐射分辨率的提高是以牺牲 SAR 图像的空间分辨率为代价的。随着数字图像处理技术的发展，国际上出现了一些空域滤波算法，并用于 SAR 图

像的相干斑抑制。另外，随着极化 SAR 的出现和发展，出现了专门的极化 SAR 图像相干斑抑制方法。

本书是根据作者近几年在雷达图像增强方面的研究成果，结合国内外最新发展动向编写而成的。在总结现有方法的基础上，本书提出了一些新的相干斑抑制的方法（如基于独立分量分析(ICA)基本模型和基于 ICA 稀疏编码的相干斑抑制方法），并且提出了具有去相干斑能力的基于 ICA 的全极化 SAR 图像分类方法，然后对这些方法的有效性进行了验证。

本书共分 7 章，包括绪论、极化 SAR 基础理论、单极化 SAR 图像的相干斑抑制、多极化 SAR 图像的相干斑抑制、独立分量分析、基于独立分量分析的 SAR 图像相干斑抑制。全书在编写过程中由付毓生编著，杨晓波、皮亦鸣和王海江参与了部分章节的撰写。

本书的出版得到了教育部新世纪优秀人才计划、四川省青年科技基金会（06ZQ026-006）和电子科技大学中青年学术带头人培养计划的支持，在此表示感谢。

本书直接或间接地引用了许多专家、学者的文献，从而丰富了本书的内容，作者一并致谢。由于作者学识有限，写作时间仓促，书中错误和片面之处在所难免，恳请读者批评指正。

作者 于成都

2007 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 全极化 SAR 的发展及应用	2
1.3 SAR 图像的相干斑抑制技术	8
1.4 本书主要内容	10
第 2 章 极化 SAR 基础理论	11
2.1 引言	11
2.2 极化理论	12
2.2.1 极化波概述	12
2.2.2 波的极化	12
2.2.3 Stokes 矢量表示式	14
2.2.4 部分极化波	16
2.3 散射过程的描述	17
2.3.1 散射几何	17
2.3.2 散射矩阵的表示	18
2.3.3 Mueller 矩阵的表示	20
2.4 散射截面的计算	22
2.5 极化特征的分析	25
2.5.1 部分极化波的接收	26
2.5.2 散射机理	28

2.5.3	极化特征的分析	29
2.6	小结	33
第 3 章	单极化 SAR 图像的相干斑抑制	34
3.1	引言	34
3.2	相干斑的特性分析	34
3.2.1	相干斑形成机理	35
3.2.2	相干斑噪声模型	36
3.3	空域的相干斑抑制方法	39
3.3.1	中值滤波器	40
3.3.2	Lee 的局部统计滤波器及其改进	41
3.3.3	MAP 滤波器	44
3.4	相干斑抑制技术的性能评估	46
3.5	小结	51
第 4 章	极化 SAR 图像的相干斑抑制	52
4.1	引言	52
4.2	多极化 SAR 图像的统计特性	52
4.2.1	多极化 SAR 图像的相干斑统计特性	52
4.2.2	极化域的相干斑噪声模型	54
4.2.3	改进的极化域相干斑噪声模型	56
4.3	极化白化滤波及多视极化白化滤波	57
4.4	最优加权滤波器	63
4.5	多纹理最大似然估计	65
4.6	试验结果与分析	69
4.6.1	C 波段四极化通道多视数据	69
4.6.2	L 波段二极化通道 (HH、HV) 多视数据	74
4.6.3	用各种算法滤波后的图像的视觉比较	76

4.6.4	试验结果分析	80
4.7	小结	81
第 5 章	独立分量分析制	82
5.1	引言	82
5.2	独立分量分析基础	83
5.2.1	随机变量的高阶统计特性	83
5.2.2	信息论基础	87
5.2.3	统计独立性	90
5.3	主分量分析	91
5.4	独立分量分析	94
5.4.1	ICA 的模型描述及约束条件	95
5.4.2	ICA 的预处理	98
5.4.3	ICA 的结构	100
5.5	独立分量分析算法研究	101
5.5.1	独立分量分析目标 (对照) 函数	101
5.5.2	独立分量分析优化算法	108
5.6	独立分量分析的典型应用	115
5.6.1	语音分离实验	115
5.6.2	图像分离实验	117
5.7	小结	119
第 6 章	基于独立分量分析的 SAR 图像相干斑抑制	120
6.1	引言	120
6.2	独立分量分析降低极化 SAR 图像相干斑噪声	121
6.3	实验数据	123
6.4	实验内容和实验结果分析	125
6.4.1	现有一些相干斑抑制方法的实验	125

6.4.2	ICA 方法的实验	130
6.4.3	实验结果比较分析	139
6.5	独立分量分析稀疏编码 (SCS) 降低极化 SAR 图像 相干斑噪声	141
6.5.1	独立分量稀疏编码及去噪原理	141
6.5.2	基于 ICA-SCS 的实验	144
6.6	小结	151
第 7 章	结语	154
参考文献	157

第 1 章 绪 论

1.1 引言

极化合成孔径雷达 (SAR) 系统是目前遥感技术研究与应用的一个重要领域, 由于极化合成孔径雷达能够获得多通道极化图像的优越性, 使得极化 SAR 在采集地表或地面覆盖物的物理和电磁结构信息的应用中起着越来越重要的作用。自从 20 世纪 80 年代中期人们能够获取真实的极化 SAR 数据以来, 极化 SAR 数据的使用已经证明能够大大改进 SAR 图像的质量和拓展新的应用功能。

传统的单通道单极化 SAR 仅能获得地面场景在某一特定极化收发组合下的目标散射特性, 所得到的信息是非常有限的。若想对地物的地理和电磁特性作进一步的分析与研究, 我们需要了解地物目标在不同收发极化组合下的回波特性, 即所谓的雷达多极化信息。这种能够获取地物目标极化散射特性的 SAR 系统称为多极化 SAR 系统。

多极化 SAR 通过测量地面每个分辨单元内的散射回波, 进而获得其极化散射矩阵以及 Stokes 矩阵。这些极化测量矩阵可以用来完全描述目标散射回波的幅度和相位特性。利用极化合成方法, 可以由目标回波的 Stokes 矩阵计算出天线在任意收发极化组合下所接收到的回波功率值。这也就是说, 我们只需获得四种基本极化组合回波, 即 HH、HV、VV 和 VH 就

可以准确地计算出天线在所有可能的极化状态下的接收功率值。总之，多极化 SAR 通过调整收发电磁波的极化方式可以获得场景目标的极化散射矩阵，为更加深入地研究目标的散射特性提供了重要的依据，极大地增强了成像雷达对目标信息的获取能力。

由于 SAR 和极化 SAR 的相干成像特性，其固有的相干斑噪声严重影响了后续目标检测、分类和识别等应用，因此相干斑的抑制成为 SAR 和极化 SAR 图像后处理的第一步，这种噪声的抑制方法一直是极化 SAR 信号处理领域一个很值得探讨的问题。到目前为止，学者们提出了许多抑制相干斑噪声的方法，它们在一定程度上抑制了相干斑噪声，一些算法也考虑到目标特征的保持，为相干斑抑制的研究起到了很大的推动作用。

1.2 全极化 SAR 的发展及应用

电磁波是向量波，即要完整描述一个电磁波，除了要指明它的幅度、相位和频率外，还要指明它的矢量方向，在雷达领域一般用极化描述电磁波的矢量方向。目标对入射波的调制效应，不仅是对幅度、相位和频率的调制，还要对入射波的极化状态进行调制，因此，雷达回波信号不仅包含幅度信息、相位信息、频率和视角信息，还包含极化信息。要了解目标完全的散射特性，就必须进行极化测量。极化测量和多频率测量、多视角测量一样可以获得更加丰富的目标信息，它是微波遥感领域的一个重要研究方向^{[1]~[8]}。

1950 年，美国的 Sinclair^[9]在对椭圆极化波发射与接收的研究中，率先在天线理论中引入了散射矩阵测量的概念。接着，

Kennaugh 于 1951 年把这一概念应用到雷达遥感领域，完成了对雷达回波极化特性的初步研究。基于 Sinclair、Kennaugh 等人对目标散射矩阵的研究，人们建立了使用极化技术的理论基础。20 世纪 50 年代和 60 年代，美国和英国利用雷达进行了大量的多极化测量。所有这些努力对极化理论的发展有一定的作用，但主要还是对设备和测量技术的发展作出了贡献。这一阶段，为产生某种特定的极化方式的电磁波要重新配置雷达信号发射机的硬件设备，因此，难以分析同一场景的目标在不同极化方式下回波信号的区别及其产生机制。

经过这一时期，人们对极化技术研究的兴趣减弱了。使研究人员感到沮丧的原因主要有以下几个方面。

长期以来，人们不能完全理解极化和目标的关系。

由于多极化测量技术要求对天线的极化状态进行控制，发射要灵活，接收要双通道接收，雷达系统的复杂性明显增加。

Huynen 为雷达极化理论的发展提供了动力^{[10]~[12]}，他提出了一些散射矩阵的测量方法，包括间接法和直接法，其中的直接法被现在的极化 SAR 广泛采用；特别是 1970 年在其博士论文中提出了“雷达目标现象学理论”，该理论充分利用散射矩阵提供的信息研究了适合所有目标的雷达目标的一般特性（包括极化特性），较好地解释了雷达目标的散射机理。由于这一重要理论的发展，也由于水平的提高，20 世纪 70 年代，开始了新一轮极化研究和实验，直到现在，极化研究仍是雷达领域中的一个研究热点。

Poelman 对多极化技术的应用作出了重要贡献，特别是在自适应极化滤波领域。1981 年，Poelman 根据矢量合成原理提

出一种新的方法：极化合成，即在成像处理后，利用已获得的目标散射矩阵重新生成任意特定极化方式的雷达遥感图像。极化合成理论的提出，使得多极化雷达系统的复杂度大为下降，目前的多极化雷达几乎无一例外地采用这一技术。

Boener 对目标散射的极化特性进行了进一步的研究^[13, 14]，他将极化合成技术应用到逆散射和目标识别问题中。佐治亚（Georgia）技术学院研制并应用了波形极化编码技术。1985年是极化技术发展史上具有重要意义的一年，美国 JPL 实验室研制了第一部实际的机载全极化合成孔径雷达 CV-990 机载 SAR 系统，该雷达获得了一批极化 SAR 数据，遗憾的是它当年在一次事故中被毁坏。尽管如此，CV-990 作为之后建造的其他极化合成孔径雷达的原型，具有重要的价值和影响。

美国 NASA 的 SIR-C/XSAR 系统，是第一部星载极化合成孔径雷达。它装载在航天飞机上。在 1991—1994 年的飞行实验中，记录了大批量的 L 波段和 C 波段的全极化合成孔径雷达原始数据，经过地面成像处理，得到了大量的全极化图像，为遥感应用方面的科学家对地球各方面情况的研究提供了丰富的资料。

目前已研制出或者正在研制多部极化合成孔径雷达，如美国 JPL 的机载 DC-8 合成孔径雷达系统，加拿大遥感中心（CCRS）的 CV580-SAR 系统，密歇根环境研究院（ERIM）的 P-3 SAR，Kansas 大学的 KU-SAR，荷兰的 PHARUS，丹麦的 EMI-SAR 等。准备于 21 世纪初发射的长期观测极化 SAR 卫星包括美国的 EOS 系统和加拿大 Radarsat-II，它们都将采用全极化方式。

在国内，中国科学院电子学研究所和电子科技大学都在开

展双频多极化星载 SAR 的研究工作。电子科技大学在与意大利宇航局的合作研究中,开展了多极化 SAR 的图像分类和散射机理研究工作,获得了大量成果^{[15]~[20]}。

目前关于极化 SAR 的研究可以分为三大类:极化 SAR 系统研究、目标极化散射特性的研究和极化 SAR 图像的应用及分析。极化 SAR 系统研究包括设计新的极化 SAR 系统,特别是星载极化 SAR 系统、开发极化 SAR 的新功能,如极化 SAR 干涉、极化 SAR 定标、极化 SAR 系统模拟、极化 SAR 误差分析等;目标极化散射特性的研究包括完善目标散射理论,特别是部分极化散射和双基地散射问题、建立新的散射模型等;极化 SAR 图像的应用及分析,包括开发新的应用领域、目标分类、增强和识别、极化滤波、图像统计特性分析、极化数据融合、目标散射机理分析等。

多极化 SAR 的意义是非常重大的,至少体现在以下几个方面。

1. 提供更加丰富的目标信息

雷达发射的电磁波在目标感应电流而进行再辐射,从而产生散射电磁波,散射波的性质不同于入射波的性质,这是由于目标对入射波的调制效应所致。这种调制效应由目标本身的物理结构特性决定,不同目标对相同入射波具有不同的调制特性。也就是说,散射波含有关于目标的信息,它是目标信息的载体。

电磁波可由幅度、相位、频率以及极化等参量作完整的表达,分别描述它的能量特性、相位特性、振荡特性和它的矢量特性,而目标对电磁波的调制效应,就体现在调制其幅度、相

位、频率以及极化等参量上。散射波的幅度特性、相位特性、频率特性和极化特性与入射波相应参量之间的差异，就成为获得目标信息乃至进一步提取目标分类识别特征的重要依据。极化测量能够提供目标的极化特性。因此相对于非极化测量，极化测量能够提供更加丰富的目标信息。

2. 有利于确定和理解散射机理

极化 SAR 观测可以获得目标的散射矩阵，通过对散射矩阵的分析，特别是通过基于散射机理的目标分解，就可以确定目标的散射和成像机理。为了确定相关的散射和成像机理，就要用极化 SAR 进行测量。

3. 有利于提高目标检测、辨别和分类能力

对于同一目标，在其他条件不变的情况下，使用水平极化波观测和使用垂直极化波观测，会得到不同的散射信息，这一点已广为人知，使用不同的线性极化波照射，回波的强度可以相差 15 dB 甚至更多。如图 1-1 所示，是 SIR-C 所获得的我国长城地区的多极化 SAR 图像，包括 HH、HV 两种极化和 L、C 两种波段，显然，不同的频段和不同的极化方式所获得的图像有比较大的区别。多极化的特点导致了目标识别上的不确定性，因为由于目标方向角（垂直于视线方向，绕视线转动的角）的影响，同一种目标的有效散射截面并不一定相同。要想解释目标的回波，就需要得到每一种线性极化波的回波。进行极化测量，获得散射矩阵后，可以得到任意极化的回波，就能够消除这种不确定性。实践证明，极化 SAR 在许多应用领域都有利于提高目标检测、辨别和分类能力。

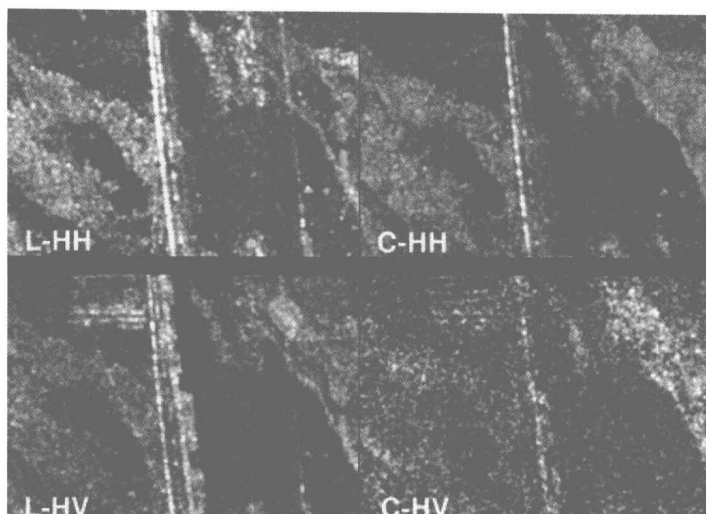


图 1-1 长城地区的 SIR-C 多极化图像

4. 有利于扩大 SAR 系统的应用范围

众所周知，不同的观察对象，要用相应的频率、视角和极化的电磁波才能得到最好的观察效果，因此，一部针对某一类目标设计的优秀 SAR 系统，对于另一类目标来讲可能就是一部很差的系统。这样单极化测量 SAR 系统的应用范围就会受到极化的限制。由于全极化 SAR 系统可以得到任意极化状态的 SAR 图像，其应用范围就得到了极大的扩展。

5. 有利于抑制杂波，提高抗干扰能力

杂波可能是人为的干扰信号，也可能是不感兴趣的目标的回波信号，极化 SAR 使得我们可以寻找一种极化状态，在该状态下有用信号与无用信号的强弱对比最强，从而提高了杂波抑制和抗干扰能力（尤其是对于单极化的干扰信号）。

1.3 SAR 图像的相干斑抑制技术

SAR 图像中的相干斑噪声与数字图像处理中所遇到的噪声有本质的不同,这是因为它们形成的物理过程有本质上的差别。SAR 图像中的相干斑噪声是在雷达回波信号中产生的,是包括 SAR 系统在内所有基于相干原理的成像系统所固有的原理性缺点;而数字图像处理中的椒盐噪声和高斯噪声等是在对照片进行采样、量化、压缩、传输和解码等数字化过程中,以及照片本身在保存过程中的退化所引起的,是直接作用到图像上的。

形象地讲,一块均匀场景的 SAR 图像中,相邻的像素点之间的灰度会围绕着某一均值随机地起伏变化,这种现象称为相干斑现象,这种严重影响 SAR 图像质量的噪声称为相干斑噪声。

为了减少相干斑噪声,早期的方法是在 SAR 成像处理中,通过降低处理器带宽形成多视子图像,然后对多视子图像进行非相干叠加来降低相干斑噪声。这种非相干叠加的方法称为多视处理。但是,多视处理中图像辐射分辨率的提高是以牺牲 SAR 图像的空间分辨率为代价的,与空间高分辨率的要求相互矛盾。随着数字图像处理技术的发展,国际上出现了一些空域滤波算法,并用于 SAR 图像的相干斑抑制。

许多学者研究了抑制相干斑噪声方法,Victor S. Frost 等人针对合成孔径雷达图像提出了一种抑制噪声方法^[21],D.T.Kuan 等人推导了抑制加性噪声和乘性噪声的滤波器^[22],Jong-Sen Lee 提出了适合加性和乘性噪声的滤波器^[23],Armand Lopes 根据 SAR 图像的统计分布特点^[24, 25],提出了 MAP(最大后验概率)滤波器。上述这些传统 SAR 相干斑噪声抑制方法适合于均