

极化干涉合成孔径雷达图像信息提取技术的进展及未来

邹斌 张腊梅 孙德明 王伟
(哈尔滨工业大学信息工程系 哈尔滨 150001)

摘要 作为雷达成像遥感一个崭新的研究领域, 上世纪90年代末出现的极化干涉合成孔径雷达信息提取技术已日益引起广泛的关注, 在未来若干年内必将成为遥感领域的一个趋势和研究热点。该文对目前国内外该技术的进展现状及其应用领域进行了全面的阐述和分析, 并在此基础上对该技术的未来发展进行了预测。

关键词 极化干涉合成孔径雷达, PIPCO, 参数反演, 分类, ESPRIT

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)10-1979-06

Information Extraction Using Polarimetric Interferometric SAR Data: Present and Future

Zou Bin Zhang La-mei Sun De-ming Wang Wei

(Department of Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract Being a new research area in radar imaging remote sensing, information extraction using Polarimetric Interferometric SAR (Pol-In-SAR) data, which emerged in late 90's, has gained more and more attention and will become trend and hotspot in remote sensing within next several years. In this paper, research works in regard with Pol-In-SAR and their application are presented and analyzed.

Key words Polarimetric interferometric SAR, PIPCO, Parameter inversion, Classification, ESPRIT

1 引言

作为各种遥感手段中唯一具有全天候、24小时遥感成像能力的手段, 合成孔径雷达(SAR)在遥感领域具有无可替代的作用, 目前已得到了广泛应用。干涉合成孔径雷达(In-SAR)和极化合成孔径雷达(Pol-SAR)的出现大大拓宽了SAR应用领域。In-SAR和Pol-SAR是建立在传统SAR体制上的新型SAR体制。In-SAR可以提供遥感对象垂直方向的结构信息以及反映地物散射机理的物理参数, 其基本原理是利用同一地域不同视角的两幅SAR复图像建立极化干涉谱, 并在此基础上进一步提取遥感对象信息。Pol-SAR利用不同极化通道获取复图像来区分物体的细致结构、目标指向、目标均衡性以及物质组成等参数, 并进而提取地物信息。In-SAR虽然可以提供垂直方向的高度信息, 但在大多数情况下无法辨别反射体的指向及其位置; Pol-SAR虽然能够区分物体的细致结构、目标特性等参数, 但无法提供反射体高度信息。

上世纪90年代末提出的基于In-SAR和Pol-SAR的极化干涉合成孔径雷达(Pol-In-SAR)概念, 因其能够提供比单纯极化或干涉SAR更丰富的信息, 进一步拓展了SAR在成像遥感领域的应用。这一新型对地观测技术利用高精度、高标定、全极化、单视复数据(SLC), 将雷达回波信号的幅度, Doppler, 相位以及极化信息进行有机融合, 可以将被遥感对象细致的、带有空间信息的构造与定向结构直接联系起来, 从而提取出完全配准的带有纹理结构和指向的三维空间的极化干涉数字信息。这些信息在农林、水文地理学、城市基

本设施构成、火山、地震学、考古学以及军事侦察等领域具有无法估量的作用。随着机载极化SAR系统的推广以及未来两三年内星载极化SAR系统的发射, Pol-In-SAR遥感数据信息提取将会成为未来遥感领域的一个趋势和研究热点。本文对近几年Pol-In-SAR信息提取及应用技术的发展进行了全面的阐述和分析, 目的是使相关领域的研究人员能够比较全面地了解这一领域的最新进展, 以利于促进我国在未来若干年内开展相应技术的研究与应用开发。

2 现代极化SAR系统概述^[1]

Pol-In-SAR图像数据的获取依赖于可以进行精确定位的极化SAR系统。目前除美国的SIR-C/X-SAR外, 投入使用的系统均为机载系统¹⁾。应用比较广泛的系统有美国NASA/JPL的AIRSAR/TOPSAR, 德国DLR的E-SAR, 加拿大CCRS的C/X-SAR, 日本NASDA/JAXA的Pi-SAR, 丹麦的EMISAR等。出于运行成本考虑, SIR-C/X-SAR在1994年完成飞行后即取消了其具有的极化功能, 因此2002年发射的欧洲ENVISAT上所携带的C波段ASAR是目前唯一在轨运行的具有多极化工作方式的SAR系统。ASAR不是全极化SAR系统, 仅可以工作在VV+HH/VV+VH/HH+HV可选择极化方式下。计划于今年初发射的日本ALOS卫星上所携带的L波段PALSAR, 将成为第一个真正意义上的星载全极化SAR系统。随着加拿大全极化RADARSAT-2于2005年底的发射, 星载SAR系统将全面进入全极化工作阶段。

¹⁾ 这里所指不包括各国军方的系统, 如美国的Lacrosse系统即为极化系统。

表1 极化 SAR 系统一览

系统	国别	年代	机/星载	工作波段	极化方式
AIRSAR	美国	1987	机载	P, L, C	全极化
E-SAR	德国	1989	机载	P, L, C, S, X	全极化
C/X-SAR	加拿大	1986	机载	C, X	全极化
Pi-SAR	日本	1993	机载	L, X	全极化
EMI-SAR	丹麦	1986	机载	C, L	全极化
ASAR	欧空局	2002	星载	C	选择极化
PALSAR	日本	2005	星载	L	全极化
RADARSAT-II	加拿大	2005	星载	C	全极化
TerraSAR	欧洲	2006	星载	X	全极化

表1给出了当前及未来几年内世界各国开发研制的极化 SAR 系统的概况。

目前,无论机载还是星载 SAR 系统,都已经从单极化工作方式过渡到了多极化工作方式。机载系统已经覆盖了从 S 到 X 的所有波段。由于技术原因,主要是能量问题,目前的星载系统尚均处在单频阶段。由于系统定位技术的提高,无论机载还是星载系统都可以用来生成干涉图像(ATI 和 XTI)。这些多频段、全极化、高分辨率(干涉)图像的出现必然会大大促进 Pol-In-SAR 信息提取技术的发展,使得通过传统 SAR 无法得到的某些信息的获取成为可能。

3 基于 PIPCO 的 Pol-In-SAR 信息提取

虽然国内外有关 In-SAR 与 Pol-SAR 图像信息提取研究工作已有十多年的历史,但 Pol-In-SAR 图像信息提取技术研究的提出不过最近几年。目前信息提取所采用的理论主要基于 Papathanassiou 所提出的极化干涉相位优化理论 PIPCO (Polarimetric-Interferometric Phase Coherence Optimization)。另外的一个理论分支是基于 ESPRIT 理论进行信息提取。本节主要对 PIPCO 理论的发展及研究近况进行概括和总结,利用 ESPRIT 进行信息提取的工作将在下一节进行介绍。

3.1 PIPCO 理论及发展

Pol-In-SAR 概念最早是由德国的 Papathanassiou 和 Cloude 两人在 1996 年~1998 年的一系列文章中逐渐建立的,概念成型的标志是在 IEEE 汇刊上的一篇文章^[2]。Papathanassiou 在文中将极化概念引入 In-SAR,提出利用标定的 Pol-In-SAR SLC 数据建立“极化干涉相位相关系数”这一新概念,将传统干涉相干系数进行推广,采用极化向量表示相干系数。文中在理论上给出这个系数的优化方案,并提出相应的目标分解理论,指出可以通过对该系数优化来进行地表植被信息的提取、分类以及 DEM 的生成。这个过程从物理上可以解释为在由全极化状态组合形成的空间中,寻求干涉相干性最优的极化状态组合^[3]。这个组合状态中包含有地物信息。文中利用 SIC-C/X-SAR 在 1994 年的飞行数据,采用了一个简单的三维森林覆盖下地表模型对所提理论进行了验证,实现了对地物信息的提取。这一理论在雷达遥感

领域得到广泛的认同,成为当前 Pol-In-SAR 的重要理论基础。

2000 年 Papathanassiou 针对前面工作中所利用模型不准确这一问题,利用了由 Treuhaft 建立并完善的 RVoG (Random Volume over Ground) 反射模型^[4,5]对 PIPCO 理论进行了研究^[6]。他证明了虽然在无地面效应条件下干涉系数与电磁波极化状态无关,但微小的地面散射即可对极化相干系数产生极大影响。这些工作进一步证明了可以通过 PIPCO 理论利用全极化干涉 SAR 图像进行地面参数的提取。这一理论推断通过利用 DLR / E-SAR 的 L 波段数据进行的反演实验所得到较好的效果得以证明。2001 年, Papathanassiou 对 RVoG 反射模型进行完善,在此基础上建立了极化相干的复平面表示法——“线性相关模型”^[7]。利用这个模型,可以通过复平面上不同散射体相干系数所代表直线的变化进行不同地物地表参数的反演。通过对 E-SAR 的 L 波段数据所进行的六维参数矩阵的反演实验,验证了该理论可适用于机载 Pol-In-SAR 数据的信息提取。Isola 利用 SIR-C / X-SAR 的 L 波段数据进一步证明了该理论的实用性^[8],将利用 RVoG 模型的 PIPCO 理论的适用范围从机载 Pol-In-SAR 数据扩展到了星载数据。文中提出的反演方法在不需要进行森林地域识别预处理的条件下,可以直接利用 Pol-In-SAR 数据完成地表植被参数反演,从而提高了反演运算效率。Cloude 于 2002 年将该理论进一步完善^[9,10]。他对线性相关模型的建立进行了更加详尽的理论推导,给出了精确的复相关公式及其复平面的直线表示法(干涉相干的极化变化直线模型),确定了如何利用该线段获取地面形状、植被高度、消光系数等参数。此外, Cloude 在文中给出了通过 3 个阶段实现参数反演的方法,使得反演过程得以进一步简化。

随着 PIPCO 理论逐步完善,该理论逐渐得到更多同行的认同并被用于实现不同的目的。目前主要的应用领域包括植被覆盖地物的参数反演、地物分类、以及目标检测等。

3.2 Pol-In-SAR 图像地表参数反演

针对森林植被覆盖条件下地面的参数反演及其应用是目前 Pol-In-SAR 信息提取最主要的研究领域。Papathanassiou^[2]在 1998 年即采用 PIPCO 理论,通过对 SIR-C/X-SAR 的 L 波段数据进行的实验,研究了使用

Pol-In-SAR数据对地面植被高度、地表相位、有效地面-散射体幅度比和体消光系数的参数进行反演的可能性。由于当时采用过于简单的地表散射模型,最初的结果的精度不高。随着Papathanassiou工作的逐渐深入^[6-10],现已证明利用L波段数据进行这些参数的反演可以得到较高的精度,并且反演方法也得到了简化。其他研究人员利用PIPICO理论对Pol-In-SAR图像信息提取的方法及应用进行了大量研究工作。

物体对不同波段电磁波的反射特性不同,因此除L波段数据外,其它波段Pol-In-SAR数据的应用也是当前这一领域研究的一个方面。现已证明利用RVoG反射模型,P波段机载Pol-In-SAR数据也可以用于热带丛林参数提取^[11,12]。提取的方法是在使用优化相干系数提取散射相位中心后,利用最小均方算法来获取地表深林厚度、体消光系数等地表参数,这种提取方法通过 χ^2 检验已得以验证。利用P波段Pol-In-SAR数据还能够恢复森林覆盖下地表数字高程图^[13]。具体实现步骤是首先利用对干涉系数的优化提取散射相位中心,然后通过相位中心进行非线性拟合提取与之相关的地表高程数据。这一算法的正确性通过巴西Tapajos国家公园的机载P波段数据所进行的实验获得了验证。

诸如表面粗糙度、表面湿度等关于植被结构和表面参数的提取也可以利用Pol-In-SAR数据进行。一种提取的方法是利用复频率相关函数建立数据与地面散射体参数之间的联系^[14],并进而进行参数提取。这种参数提取算法的不足之处在于需要精确的DEM数据进行辅助运算。另外一种提取方法是利用扩展Bragg模型^[15],在选用不同极化通道的数据构成干涉相关系数的基础上,可以证明地表粗糙度以及地面物质介电常数仅与信噪比去相关 γ_{SNR} 有关,因此可以利用 γ_{SNR} 得到地表粗糙度等参数。利用E-SAR数据所得到的实验结果表明这种参数提取方法适用于地表参数估计,尤其适用于表面粗糙度较小的情况。

Flynn在2002年给出了一种基于样本相关矩阵的植被参数最大似然估计算法^[16]。该算法利用Treuhaf建立的模型分解样本的协方差矩阵得到其对数似然函数,由于地物消光系数、植被高度等信息均包含在样本的协方差矩阵中,因此通过矩阵的最大似然值可以推导出地表参数。Flynn利用仿真数据对所提出的算法进行了实验验证。进一步研究表明^[17],这一理论对于单层散射模型及双层散射模型同样适用,并且通过迭代方法可以得到优化后的互相关矩阵。这种参数估计方法无论在估计精度还是计算复杂度方面均优于其它算法。

以上研究主要针对森林覆盖条件下地表参数的反演,而农作物覆盖条件下地面参数的反演与其有很大的不同。主要原因是农作物高度远远小于森林高度,从而地面散射效应在Pol-In-SAR数据中所起的作用大为增强。为了有效进行地表参数的反演,人们提出可以用OVog (Oriented Volume over Ground)模型^[5,18]来描述农作物覆盖条件下地表散射情况。利用这一模型,通过采用文献^[10]中给出的线性相关模型参数

估计法,地表的差分消光系数、植被高度、本地入射角以及地-体幅度比等参数可以被有效地反演并且可以获得较高的精度^[19]。但同时有研究认为,在农作物高度较小的条件下,极化干涉相干系数在复平面内的变化不再为一条直线,而是在一个类似于三角形的区域内变化,并且由于消光系数在此区域内的变化较小,因此无法进行有效反演^[20]。这一结论与文献^[19]中所采用的结论不同。在此理论的基础上,研究人员推导了地表平均高度及其标准差的反演步骤。通过3~8GHz范围的实验SAR数据所作的实验表明这种方法可以获得很好的反演精度。

3.3 Pol-In-SAR 生物量提取技术

作为生态环境监测的一个重要方面,地表生物量提取具有其必要性。在研究参数反演方法的基础上,近两年来人们探索了利用Pol-In-SAR进行森林区域地表生物量提取的方法。

生物量提取的一种方法是建立在参数反演研究的基础之上的。其提取过程是先利用RVoG模型实现参数的反演,然后建立植被高度与生物量之间的联系^[21],再通过一系列特定的演算步骤即可提取地表生物量的信息^[22]。研究人员利用E-SAR对Fichtelgebirge地区获得的遥感数据对所提出的算法进行了实验,其结果表明利用该算法所提取的生物量与该地区真实情况相当吻合^[23]。为了进一步提高生物量估计精度,尤其是非均匀树种条件下的估计,人们提出利用“有效高度”这一参量取代传统意义上的高度用于生物量等效估计。其优点是可以直接提取高度参量,缺点在于它是非标准高度,其空间变化会对生物量描述产生影响。因此在非均匀树种条件下,生物量提取需要关于树木高度的精确模型^[24]。

另外一种生物量提取方法是建立在干涉相关系数的变化之上的。研究表明可以利用不同波段极化干涉数据构成干涉相关系数,通过不同系数的变化找出所对应的生物量^[25]。

3.4 Pol-In-SAR 地物分类技术

利用Pol-In-SAR进行地物分类是Pol-In-SAR信息提取的另一个主要研究方面,目前的研究大都基于参数反演基础之上。

Hellmann在1997年提出可以通过利用极化SAR与干涉SAR数据进行融合的方法解决分类问题^[25]。所提出算法首先利用极化SAR数据,采用极化分类中常用的Entropy/Alpha/Anisotropy算法对数据进行预分类,在此基础上,利用干涉图像的相干系数实现地物的进一步分类。文中采用了SIR-C/X-SAR的L和C波段数据对所提出的方法进行了验证,结果表明该方法可以用于建筑、水、森林、低/高度植被以及道路等地物非监督分类。

地物的分类也可以利用多频率、多极化SAR数据实现^[26]。这类方法的核心是通过不同波段、不同极化方式的数据组合计算干涉相关系数,进而利用该系数完成分类。使用印度尼西亚的热带丛林地域P, L, C波段全极化干涉数据和C, L波段部分极化数据所进行的实验表明,这种分类方法可

以对地表的原始森林、燃烧后原始森林、次生林以及红树林进行分类。

Pol-In-SAR图像的分类也可以采用最大似然分类的方法实现^[27]。这种分类算法的核心在于利用相干系数优化理论得到优化后的相关谱,然后利用该相关谱重新定义类似于传统极化SAR中所定义Entropy和Alpha这两个参数。在此基础上,结合相干矩阵Wishart分布特性定义分类器,实现自然背景的非监督分类。他们还同时提出一种基于互相关的分类器^[28]。其思想是利用互相关矩阵的条件概率密度(相对另一幅图像样本相干矩阵)为多变量复高斯分布的特性构成分类器,进而实现地物的非监督分类。通过利用DLR的L波段数据所进行的实验,证明了这两种分类器都可以用于Pol-In-SAR图像的分类。

3.5 Pol-In-SAR 目标检测技术

目标检测也是遥感领域的一个重要研究方面。随着对Pol-In-SAR信息提取技术研究的深入,人们开始着手研究利用Pol-In-SAR实现人造目标的检测。

Cloude于2004年初提出可以利用Pol-In-SAR数据对隐藏在树叶下的静止目标进行检测^[29]。检测的理论基础是随机体散射条件下干涉相干系数与波的极化无关,而当有目标存在时干涉相干系数与极化有关,并且其变化在复相干平面上是线性的。利用这一原理,Cloude指出可以利用干涉相位作为观测量进行目标检测,并设计了一个可以压制树叶回波而保持目标回波的滤波器。文中给出了检测算法的具体实现步骤。为了验证算法的有效性,Cloude给出了一种模拟树叶覆盖条件下目标回波的极化干涉数据的仿真方法,并利用L波段下的仿真数据对检测算法进行了验证。结果表明利用Pol-In-SAR实现目标检测可以得到很好的效果。

4 基于 ESPRIT 算法的信息提取

ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)算法是目前Pol-In-SAR信息提取的另一个理论基础。这一理论最初的提出是用于提取天线阵列接收到的信号的指向(DOA—Direction Of Arrival)。

利用ESPRIT算法实现Pol-In-SAR数据森林参数估计这一思想最早出现在文献[30,31]中。其算法的核心是假设数据回波中存在与森林和其覆盖地表相对应的两个相位中心。由于这两个相位中心对于干涉天线构成不同的几何关系,因此利用TLS ESPRIT算法可以从中估计出干涉相位,进而估计散射体极化信息。文中给出的算法适用于全极化或部分极化的干涉SAR数据。在理论推导的基础上,通过利用SIR-C/X-SAR的数据所进行的实验进一步验证了算法的正确性。

2003年人们提出可以利用ESPRIT/MUSIC算法完成森林及人造物体的信息提取^[32]。算法从干涉信号模型出发,利用ESPRIT/MUSIC估计的DOA提取森林或人造物体的相位信息,从中估计出一个主散射体的极化状态。通过极化状态的

不同,可以将森林与人造物体分开。基于此,研究人员将算法进一步推广到提取城镇区域信息,证明了可以利用ESPRIT/MUSIC算法提取区域内主散射体的干涉相位^[33],通过对优化相位的特性分析,人们发现可以利用它区分城镇区域内建筑与树木^[34]。进而可以对区域内的建筑和树木进行三维描述,再利用传统Pol-SAR中Wishart + H/A/ α 实现地物的非监督分类方法,建筑物及其高度可以有效地被提取出来^[35]。利用E-SAR的L波段数据所作的大量实验验证了该算法的有效性。

5 国内 Pol-In-SAR 信息提取技术的发展

近两三年来,国内在Pol-In-SAR信息提取领域的研究已逐渐开展。目前的研究单位有中国科学院遥感技术研究所、中国科学院电子学研究所、清华大学以及哈尔滨工业大学等,所进行的研究工作基本上处于追踪国外最新研究成果阶段。

国内相关研究出现于2001—2002年^[36,3],人们对极化干涉的基本原理和物理机制、极化干涉SAR的数据处理与常规InSAR的区别以及极化干涉SAR当前的热点应用和研究领域进行了阐述,也讨论了极化干涉SAR存在的问题。这标志着国外在Pol-In-SAR信息提取技术领域进行的研究工作开始引起国内同行的注意。自此国内也开展了相关领域的研究。

在基础研究方面,针对PIPICO理论只能得到目标散射矩阵的测量数据这一问题,人们提出了一种新的极化SAR干涉测量改进算法^[37]。模拟实验结果表明该算法可以进一步提高测量精度。此外,利用天山地区SIR-C/X-SAR的L波段Pol-In-SAR数据地表进行分类的结果表明极化SAR数据对高低植被的差异敏感;干涉SAR数据根据地物不同程度的去相关可以用于区分水域和森林地区;而极化干涉SAR则可以容易地同时区分水域、低矮植被和森林^[38]。

在植被参数估计方面,研究人员提出可以利用模拟加温-退火算法完成Pol-In-SAR数据地表植被参数的反演^[39,40]。该算法利用了极化干涉测量的基本原理和相干散射模型。对植被垂直结构参数的估计的研究表明^[41],利用Pol-In-SAR对植被覆盖区有向物体的分布非常敏感这一特征,通过利用各向同性的随机有向体散射模型,在考虑地面和随机体的直接后向散射条件下,可以得到干涉交叉相关和HHHH/VVVV比对植被垂直结构参数有很高敏感性这一结论。实验结果表明该模型可以估计树木高度分布,并且估计精度与相位中心差、树木类型及极化组合有关。最近,人们研究了同时利用SIR-C L和C波段Pol-In-SAR数据提取植被高度的算法^[42]。该算法使用文献[10]中所提的算法从L波段中提取地表相位,再利用ESPRIT算法获取C波段数据中的有效相位中心,进而利用这两个相位差提取植被高度,其精度在可接受范围内。

在土地类型分类方面,研究发现,基于极化干涉测量的基本原理,在利用Cloude相干最优算法得到最优相干系数后,在对最优相干系数、后向散射系数和熵进行数据相干性分析

基础上,通过选取最优相干系数 γ_3 、熵和后向散射系数 σ_{LHN}^0 可以实现土地类型的最大似然分类^[43]。此后,人们又提出一种在 SAR 图像极化非监督 Wishart 分类的基础上,利用极化干涉信息对 SAR 图像进行非监督分类的方法^[44]。该方法主要利用一个 6×6 的极化干涉相关矩阵,从而可以同时考虑单幅图像的全极化信息以及两幅图像之间的互相关信息。这种分类方法能够很好地分辨不同类型的地物,保持地物的细节,分类结果有很大的改善。

在森林地区的检测和监测方面,研究人员引入了散射矩阵的相似性参数概念。通过对极化散射矩阵总功率、极化熵、相似性参数和极化干涉最优相关系数等极化和干涉 SAR 遥感参数进行了分析并通过加权组合,利用特征值分析方法求取最优加权系数,进而建立起两种对森林特征敏感的参数组合表达式,从而实现了对森林地区的检测和监测^[45]。

6 结束语

Pol-In-SAR 图像的信息提取技术的研究已日益得到人们的重视,在国外相关领域的工作已初具规模,从理论方面讲,目前研究最广的是 Papathanassiou 的 PIPCO 理论,利用 ESPRIT 算法进行人造目标提取的研究也逐渐开展。从应用范围角度讲,研究工作主要集中在利用这种数据进行在森林植被覆盖区域的信息提取,诸如参数反演、地物分类、DEM 生成、生物量提取等方面。国内的研究也已经开展,但目前得到重视的程度不够。

同时,应该看到 Pol-In-SAR 的研究毕竟处于起步阶段,还存在诸多问题。首先,相关理论的研究不够深入,目前研究中所使用的理论具有其局限性,最明显的表现在于理论的适用范围受到很大限制,除适用于植被覆盖地表条件之外,其它场景,诸如海上场景、冰川等的适用性尚有待研究。其次,适用于 Pol-In-SAR 数据信息提取的地表模型的研究开展不够。目前除 RVoG 和 OVoG 模型外,其它模型并没有得到广泛的认同。此外,由于以上原因,应用范围不够广泛,有待拓展。另外,信息提取过程中大都采用像素平均的方法,以致当图像分辨率较低时,细节信息容易丢失。这一点也限制了应用面的推广。

对于国内研究人员来说,由于我国尚没有极化 SAR 系统,因此 Pol-In-SAR 数据的获得是限制科研人员开展此项研究工作的一个主要问题。这一点在目前国内研究中除 SIR-C/X-SAR 数据之外,没有其它实验数据上表现得非常明显。

然而,我们应该认识到 Pol-In-SAR 数据中包含了传统 SAR 以及其它遥感手段所无法获取的信息,而这些信息无论在民用还是军用领域都具有重要的应用价值。因此我们有理由相信随着新一代极化 SAR 系统的开发及推广,Pol-In-SAR 信息提取技术的研究必将在未来若干年内得到进一步发展。

参 考 文 献

- [1] 邹斌. 现代合成孔径雷达系统及应用概要. 哈尔滨工业大学内部报告, 2004 年 10 月.
- [2] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551 – 1565.
- [3] 郭华东, 李新武等. 极化干涉雷达遥感机制及应用. *遥感学报*, 2002, 6(6): 401.
- [4] Treuhaft R N, Madsen S N, Moghaddam M, Van Zyl J J. Vegetation characteristics and surface topography from interferometric radar. *Radio Sciences*, 1996, 31(7): 1449 – 1485.
- [5] Treuhaft R N. Vertical structure of vegetated land surfaces from interferometric and polarimetric radar. *Radio Sciences*, 2000, 35(1): 41 – 177.
- [6] Papathanassiou K P, Reiger A, Cloude S R. Vegetation and ground parameter estimation using polarimetric interferometry. Part I: the role of polarisation. Part II: parameter inversion and optimal polarisations. Proc. of the CEOS SAR Workshop, Toulouse, France, 26-29 Oct, 1999: 347 – 358.
- [7] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-Baseline polarimetric SAR interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(11): 2352 – 2363.
- [8] Isola M, Cloude S R. Forest height mapping using space-borne polarimetric SAR interferometry. Proc. of IGARSS'01, 9-13 July, 2001, 3: 1095 – 1097.
- [9] Cloude S R, Papathanassiou K P. A 3-Stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. European Conf. On Synthetic Aperture SAR, EUSAR 2002, Cologne, Germany, 2002: 279 – 282.
- [10] Cloude S R, Papathanassiou K P. Three-stage inversion process for polarimetric SAR interferometry. *IEE Proc. Radar Sonar Navigation*, 2003, 150(3): 125 – 134.
- [11] Brandfass M, Hofmann C, Mura J C, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry as applied to fully polarimetric rain forest data. Proc. of IGARSS'01, Vol.3, 9-13 July, 2001: 2575 – 2577.
- [12] Brandfass M, Hofmann C, Mura J C, Moreira J, Papathanassiou K P. Parameter estimation of rain forest vegetation via polarimetric radar interferometric data. Proc. of SPIE on SAR Image Analysis, Modeling and Techniques IV, 2002, 4543: 169 – 179.
- [13] Brandfass M. Generation of bold earth digital elevation models as applied to polarimetric SAR interferometry. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 3: 1014 – 1016.
- [14] Sagues L, Fabregas X, Broquetas A. Extraction of vegetation structure and surface parameters using polarimetric and interferometric SAR techniques. Proc. of IGRASS 2000, Honolulu, HI, USA, July 2002: 141 – 143.
- [15] Hajnsek I, Papathanassiou K P, Moreira A, Cloude S R. Surface parameter estimation using interferometric and polarimetric SAR. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 1: 420 – 422.
- [16] Flynn T, Tabb M, Carande R. Direction estimation of vegetation

- parameters from covariance data in polarimetric SAR interferometry. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 3: 1908 – 1910.
- [17] Tabb M, Flynn T, Carande R. Full maximum likelihood inversion of Pol-In-SAR scattering models. Proc. of IGRASS2004, Sep. 2004, Alaska, USA:1232 – 1235.
- [18] Treuhaft R N, Cloude S R. The structure of oriented vegetation from polarimetric interferometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1999, 37(6): 2620 – 2624.
- [19] Hajnsek I, Cloude S R. Pol-In-SAR for agricultural vegetation parameter estimation. Proc. of IGRASS2004, Sep 2004, Alaska, USA:1224 – 1227.
- [20] Ballester Berman J David, Lopez Sanchez Juan M, Guasch J F. Retrieval of height and topography of corn field by polarimetric SAR interferometry. Proc. of IGRASS2004, Sep. 2004, Alaska, USA:1228 – 1231.
- [21] Mette T, Papathanassiou K P, Hajnsek I, Zimmermann R. Forest biomass estimation using polarimetric SAR interferometry. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 2: 817 – 819.
- [22] Mette T, Papathanassiou K P, Hajnsek I, Zimmermann R. Forest biomass estimation using polarimetric SAR interferometry. Proc. of Pol-In-SAR 2003, Roma, May 2003.
- [23] Papathanassiou K P, Mette T, Hajnsek I. Model based forest height estimation from single baseline Pol-InSAR data: The fichtelgebirge test case. Proc. of Pol-In-SAR 2003, Roma, May 2003.
- [24] Mette T, Papathanassiou K P, Hajnsek I. Biomass estimation from polarimetric SAR interferometry over heterogeneous forest terrain. Proc. of IGRASS2004, Sep. 2004, Alaska, USA: 511 – 514.
- [25] Hellmann M, Cloude S R, Papathanassiou K P. Classification using polarimetric and interferometric SAR-data. Proc. of IGRASS97, Aug. 1997: 1411 – 1413.
- [26] Prakoso K U. Tropical forest mapping using multiband polarimetric interferometric SAR data. Proc. of Pol-In-SAR 2003, Roma, May 2003.
- [27] Ferro-Famil L, Pottier E, Lee J S. Unsupervised classification and analysis of natural scenes from polarimetric interferometric SAR data. Proc. of IGRASS2001, July 2002: 2715 – 2717.
- [28] Ferro-Famil L, Pottier E, Lee J S. Classification and interpretation of polarimetric interferometric SAR data. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 1: 635 – 637.
- [29] Cloude S R, Corr D G, Williams M L. Target detection beneath foliage using polarimetric synthetic aperture radar interferometry. *Waves in Random Media*. 2004, 14: S393 – S414.
- [30] Yamada H, Yamaguchi Y, Rodriguez E, Kim Y, Boerner W M. Polarimetric SAR interferometry for forest canopy analysis by using the super-resolution method. Proc of IGRASS, 2001, 9-13July, 2001, 3: 1101 – 1103.
- [31] Yamada H, *et al.*. Polarimetric SAR interferometry for forest analysis based on the esprit algorithm. *IEICE Trans. Electron.*, 2001, E84-C(12): 1917 – 1924.
- [32] Guillaso S, Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E. Polarimetric interferometric SAR data analysis based on ESPRIT/MUSIC methods. Proc. of Pol-In-SAR 2003, Roma, May 2003.
- [33] Guillaso S, Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E. Urban area analysis based on ESPRIT/MUSIC methods using polarimetric interferometric SAR. Proc. of 2nd GRSS/ISPRS joint Workshop on “Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas” Technical University of Berlin, May 22-23, 2003: 77 – 81.
- [34] Guillaso S, Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E. Analysis of built-up areas from polarimetric interferometric SAR images. Proc. of IGRASS03, Toulouse, France, 2003:1727 – 1729.
- [35] Guillaso S, Ferro-Famil L, Reigber A, Pottier E. Building characterisation using polarimetric interferometric SAR data. Proc. of EUSAR'04, 2004: 407 – 410.
- [36] 杨震, 杨汝良. 极化合成孔径雷达干涉技术. *遥感技术与应用*, 2001, 16(3): 139 – 143.
- [37] 陈小英, 洪峻. 极化 SAR 干涉测量模拟研究. *遥感学报*, 2002, 6(6): 475 – 480.
- [38] Yang Z, Yang R L. Application of polarimetric synthetic aperture radar interferometry for land cover classification. Proc. of IEEE on Radar Conference. 22-25 April, 2002: 459 – 463.
- [39] Li X, Guo H. Generation and error analysis of DEM using spaceborne polarimetric SAR interferometry data. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 5: 2705 – 2707.
- [40] 李新武, 郭华东等. 航天飞机极化干涉雷达数据反演地表植被参数. *遥感学报*, 2002, 6(6): 424 – 429.
- [41] Zhang H, Wang C, Liu Z. Polarimetric SAR interferometry for vegetable vertical structure parameters extraction. Proc. of IGRASS'02, 24-28 June, 2002, 5: 2611 – 2613.
- [42] Li X, Guo H, Li Z, Wang L. Inversion of vegetation height using SIR-C dual frequency polarimetric SAR interferometry data. Proc. of IGRASS2004, Sep. 2004, Alaska, USA: 3132 – 3135.
- [43] 李新武, 郭华东等. 极化干涉 SAR 数据地表土地类型分类. *遥感学报*, 2002, 6(6): 507 – 510.
- [44] 杨震, 杨汝良. SAR 图像的极化干涉非监督 Wishart 分类方法和实验研究. *电子与信息学报*, 2004, 26(5): 752 – 759.
- [45] 董贵威, 杨健, 彭应宁, 王超, 张红. 极化 SAR 遥感中森林特征探测. *清华大学学报*, 2003, 43(7): 953 – 956.
- 邹 斌: 男, 1968 年生, 副教授, 博士, 从事极化 SAR、干涉 SAR 和极化干涉 SAR 领域的研究.
- 张腊梅: 女, 1980 年生, 硕士生, 从事极化干涉 SAR 图像处理研究.
- 孙德明: 男, 1981 年生, 硕士生, 从事极化 SAR 图像参数反演方法研究.
- 王 伟: 男, 1982 年生, 硕士生, 从事干涉 SAR 图像处理研究.