

## 极化干涉 SAR 的研究现状与启示

吴一戎 洪文 王彦平

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家级重点实验室 北京 100080)

**摘要:** 阐述极化与干涉结合的基本考虑, 介绍极化干涉 SAR 相干最优和相干目标分解的基本思想, 总结分析极化干涉 SAR 技术、典型星载极化 SAR 系统研制和极化干涉 SAR 应用的研究现状, 以得到开展极化干涉 SAR 技术研究的启示。

**关键词:** 极化干涉 SAR; 极化 SAR; 干涉 SAR; SAR

**中图分类号:** TN958

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1009-5896(2007)05-1258-05

## The Current Status and Implications of Polarimetric SAR Interferometry

Wu Yi-rong Hong Wen Wang Yan-ping

(National Key Lab of Microwave Imaging Technology,

Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** In this paper, the basic factors of the techniques combining the polarimetric synthetic aperture radar (SAR) with interferometric SAR are considered firstly, and then the basic concepts of coherence optimization and target decomposition of polarimetric SAR interferometry are illustrated. The current status of polarimetric SAR interferometry technique, the developments of typical spaceborne polarimetric SAR systems and the applications of polarimetric SAR interferometry are summarized.

**Key words:** Polarimetric SAR Interferometry; Polarimetric SAR; Interferometric SAR; SAR

### 1 引言

经过长年的发展, 合成孔径雷达(SAR-Synthetic Aperture Radar)技术与系统从单波段、单极化已逐步发展到多波段、全极化SAR、干涉SAR 遥感<sup>[1]</sup>, 最近几年出现的极化干涉 SAR (POLINSAR-Polarimetric SAR Interferometry) 把 SAR 遥感应用推向高潮, 期望实现从高分辨率定性成像到精确高分辨率定量测量的转变。

POLINSAR 通过极化和干涉信息的有效组合, 可以同时提取观测对象的空间三维结构特征信息和散射信息, 为微波定量遥感、高精度数字高程信息和观测对象细微形变信息的提取提供了可能性。POLINSAR 系统研制、数据处理技术和应用研究已成为国外 SAR 技术研究的热点。

本文通过对 POLINSAR 技术、典型星载极化 SAR 系统研制和 POLINSAR 应用的研究现状进行总结分析, 以期得到开展 POLINSAR 技术研究的启示。

### 2 POLINSAR 简介

#### 2.1 极化与干涉结合的基本考虑

极化 SAR (POLINSAR-Polarimetric SAR) 测量可获得每一像元的全散射矩阵, 并合成包括线性极化、圆极化及椭圆极化在内的多种极化散射信息。因此与常规 SAR 相比, 在雷达目标探测<sup>[1]</sup>、识别、纹理特征的提取、目标方向、物质对称性和组分方面研究具有很大的改善。POLINSAR 对植被散射

体的形状和方向具有较强的敏感性<sup>[2]</sup>。通过测量每一像元的全极化散射矩阵, 有可能将复杂的地物散射过程分解为几种单一的散射过程<sup>[3]</sup>, 并利用地物在不同极化状态下的极化散射信息为更准确地探测目标特征提供可能。全极化数据对遥感定量测量具有很大的应用价值和潜力, 是遥感定量测量的重要研究方向。

INSAR 主要用于获取地物的空间垂直结构信息<sup>[4]</sup>。通过该技术可以获取的两个重要的参数分别为干涉相位和相干系数。对于相位, 它已广泛应用于 DEM 生成、地震/火山/冰川/地表沉降和海洋物理参数获取的研究中。近年来, INSAR 获取的另一个重要参数——相干系数已被逐步认识并开始应用于地表特征的基础性分析和地表植被高度及生物量的反演研究中, 是一个极具潜力的研究领域。SAR 干涉技术在实现过程中隐含着这样一个假设, 即假定图像中每个像素的信号回波是从固定高度的参考平面上的一个散射中心散射回来的, 因而测得的相位差就与这个参考平面的高度成正比。然而, 由于地面坡度、粗糙度等因素的存在以及地表植被和体散射的影响, 地物对电磁波散射的实际过程极为复杂, 分辨单元内往往同时存在多种散射机理, 且不同散射的相位中心亦可能位于不同高度上。这时, 两幅干涉图之间的相位差只可能反映所有散射体的平均高度而无法反映某一特定散射中心的实际高度。例如, 这种现象在有植被覆盖的区域显得尤为严重, 这是因为植被覆盖区域的后向散射主要由植被层本身和由植被覆盖下的地面所散射的两种主要信号分量组成。这两个散射中心的高度通常是不同的, 因此

常规干涉SAR系统此时对地形高度的估计一般包含一个植被层的偏差。

对于INSAR存在的上述问题,引入SAR极化信息是一种行之有效的解决办法<sup>[4]</sup>。电磁波的极化状态对散射体的形状、取向和介电特性非常敏感,因而极化信息的引入可以丰富目标的特征参数。利用目标散射对极化量的目标极化散射矩阵数据,可以将随机媒质的散射过程分解成若干不同的散射机理。即,根据目标的极化散射分解,通过对极化信息的统计分析或者对散射模型的分析,有助于理解目标散射机理和目标的散射过程。

POLINSAR通过干涉信息和极化信息的有效组合实现了观测空间的扩展,并使之既具有INSAR对地表植被散射体的空间分布敏感的特性,又具有POLARS对植被散射体的形状和方向敏感的特性<sup>[2]</sup>。因此,POLINSAR技术具有从数据中分解出来自不同高度的不同散射机制的特征分量,可为相位差估计确定具有最高相干性的分量,为微波遥感定量测量、高精度数字高程信息和观测对象形变信息的提取提供了可能性<sup>[5]</sup>。极化干涉的相干最优过程可以提供相位散射中心的最优分离,有效减小一个分辨单元内有效散射中心高度差引起的去相关。POLINSAR在提取地表植被垂直结构信息方面具有比单独的INSAR和POLARS更大的优越性和更高的精度。

## 2.2 POLINSAR 相干最优与相干最优目标分解

相干性对于干涉的两幅图像的极化存在着强烈的依赖,因此,探求什么样的极化状态组合以产生最大的相干性是极化干涉所要解决的本质问题。它属于一个求极大问题,即在用于干涉的两幅图像的极化状态组合形成的空间中寻求最佳的极化状态组合,以期得到最大相干性。这一极大值求解问题称为POLINSAR相干最优。极化干涉相干最优是POLINSAR数据处理的关键所在。

极化干涉相干最优过程,一般意义上可简单叙述为:在由全极化状态组合形成的空间中,寻求一种最优的极化状态组合,在这种极化状态组合下干涉相干性最高或最优。干涉相干性最高包括最高的相干系数和与该相干系数相对应的最精确的相位估计值。从数学上可以简单地理解为:在由全极化状态组合形成的空间中,寻求古典厄米特矩阵的最大特征值和与之对应的特征向量<sup>[4]</sup>。最大特征值与最高的相干系数相联系,与最大特征值相联系特征矢量对应于最优的极化状态组合。

极化干涉相干最优目标分解理论主要是基于全极化SAR目标分解理论的思想。即,利用古典的厄米特矩阵的特征值和特征向量,将目标的相干信息分解为3个以特征值作为加权的从统计上相互独立的分量的和,这3个分量可能对应于3个不同的散射机制或散射中心(一般为单向散射、双向散射和体散射机制。实际应用中,必须讨论它特定的物理意义及本质)。对于该问题的解释涉及到极化干涉相干最优的物理机制问题。当前国际上发表的一些文献对在特定假设的模式下,对它们的机制问题做了定性和半定量的解释<sup>[3]</sup>。对于

极化干涉相干最优,它的物理机制可以解释为提取一种与点散射体具有最接近关系的确定性的散射机制,为的是减少在一个分辨率单元内有效散射中心高度差引起的去相关。因此,可以有效地消除空间基线去相关中残余的体散射分量,从而大大提高相干性,这是POLINSAR优于INSAR的方面之一。同时,在时间去相干不太大的情况下,它通过极化状态的变化,可以补偿时间去相关的影响。极化状态的变化可以补偿时间去相关的影响。对于极化干涉的相干最优目标分解理论可以解释为分别在相互正交的三维、二维和一维空间中的相干最优过程。与其他分解理论的重要区别在于获得的与散射机制相关的干涉相干性是最优的。

## 3 POLINSAR 技术研究概况

极化干涉SAR是在极化和干涉的理论、技术和方法有充分发展和积累的情况下通过融合而产生的一种新型的观测技术。

1994年,美国NASA JPL实验室的SIR-C/X-SAR星载L/C波段RP-POL-D-InSAR(重复轨道-极化-差分-干涉SAR)系统分别在4月和10月进行了两次飞行实验。在这两次任务中,该系统获得了对许多地区的两次或多次飞行数据,并且这些数据都是全极化的。这些全极化的相干数据为人们研究电磁波的极化在SAR干涉中的作用提供了极为宝贵的素材。

1997年,S.R.Cloude和K.P.Papathanassiou首先利用SIR-C/X-SAR数据研究了频率、极化对相干性的影响,发现了相干性对极化的强烈依赖<sup>[6]</sup>,开创了多极化SAR干涉研究的先河,这是将全极化引入到干涉的最初思想起源。之后,他们对重轨干涉中极化的影响进行了较系统的研究,并于1998年提出了极化干涉相干最优过程和基于相干最优的目标分解理论<sup>[7]</sup>,奠定了极化干涉雷达遥感的理论基础。

极化SAR干涉技术具有常规SAR无法比拟的特点,有着广阔的发展前景。自1997年以来,极化SAR干涉技术逐渐成为合成孔径雷达信息处理领域研究的新热点。

1997年德国DLR的E-SAR机载L/P波段重复轨道全极化系统、1998年NASA/JPLTOPSAR和AIRSAR机载C波段单轨道极化干涉系统分别都得到了几组相干的全极化数据。最近,日本的PiSAR机载X/L波段全极化、X波段垂直轨道单轨道干涉系统也收集到了相应的数据。

2000年2月的SRTM计划是1994年SIR-C/X-SAR任务的延续,首次在航天飞机上实现了L、C波段双天线单航迹的全极化干涉。这次任务还对部分地区进行了重复航迹的观测,获取了全球80%陆地覆盖的高精度全极化干涉数据。这些相同获得的大量全极化干涉数据,大大地推动了极化SAR干涉技术的研究。

经过几年的研究,POLINSAR数据处理算法、图像特征提取和地物分类算法正逐步被研究人员实现、测试并证实,并分别于2003年和2005年举行了全球范围的POLINSAR研讨会。

随着全相干极化数据的增多,国际上对极化干涉各种问题的讨论也越来越多。植被高度估计、相干斑的滤除、用于

干涉模拟的随机相干极化散射模型等问题的研究都有所展开。

在地表植被等高度参数的反演研究中, Cloude等将极化干涉与相干散射模型理论相结合进行了地表植被高度反演的研究。首先, 他们提出了极化干涉SAR单基线植被高度参数反演算法(SBU)<sup>[6]</sup>, 并且在对SBPI缺点进行总结的基础上, Cloude又提出了强劲的极化干涉SAR双基线参数反演算法(DBPI)<sup>[8]</sup>。Papathanassiou等利用得到的森林高度值展开了植被生物量获取的研究<sup>[9]</sup>。为了在全球尺度上进行参数估计和获得可变的基线, 他们提出了被动全极化小卫星群的概念<sup>[4]</sup>。Lopez-Sanchez等人对极化干涉提取植被高度的不同散射机制的选择进行了研究<sup>[10]</sup>。H. Yamada等人利用超高分辨率方法对森林树冠层内的散射中心进行了研究<sup>[11]</sup>。O. Stehler等人对植被层内的散射过程估计、空间分布和正演、反演问题进行了多基线极化干涉实验<sup>[12]</sup>。Tabb等人将Theuahft等提出的简单二层相干散射模型进行扩充, 得到了考虑坡度和植被结构的相干散射模型的初步结果<sup>[13]</sup>。Flynn等人对植被参数提取时的相干区域形状以及从协方差矩阵直接提取地表植被参数进行了研究<sup>[1]</sup>。

Brandfass等人利用P波段极化干涉SAR在森林地区进行了DEM提取的研究。Luciano等人利用P和X波段在森林地区进行了类似的DEM信息提取研究<sup>[3]</sup>。

另外, Papathanassiou等将现有的极化面和体散射模型与极化干涉相结合进行了地表参数敏感性模拟和参数提取的潜力研究; Sagueses等人利用POLINSAR进行了地雷探测<sup>[2]</sup>的实验室研究。

利用POLINSAR进行地物参数反演是近年来POLINSAR技术研究的热点, Juan Lopez-Sanchez等人分析了反演植被参数的两模型: 地面覆盖了随机体散射层和地面上覆盖了有方向的体散射层模型。Rafael Schneider则对散射体的朝向角估计的不同方法进行了比较, 给出估计的具体步骤并证实了结果的唯一性。Thomas Nagler等人研究机载SAR对阿尔卑斯山L、X两波段数据积雪参数的反演, 给出了L、X两波段的后项散射系数统计结果, 并解释了部分散射系数的变化是由于冰雪融化后的水层造成的。Florian Kugler等人主要分析频率对森林高度反演模型的影响, 并利用X、P、L波段的试验结果证实。Fifame Koudogbo为了解决单基线参数反演中地面散射模糊的问题需要利用双基线数据, 并利用仿真和实际试验数据分析了双基线反演参数的结果。地物参数反演已成为POLINSAR技术研究的热点。

国内尚没有研制机载/星载POLINSAR系统, 对POLINSAR技术的研究主要通过仿真或借助国外POLINSAR数据进行, 由于获取的国外数据一般为几年前的数据, 无法获取地面真实数据对研究结果进行地面真实情况验证, 其研究的深度和广度均有待加强。

#### 4 典型星载极化 SAR 系统与启示

国际上雷达遥感在蓬勃发展。继70年代末期美国海洋卫

星雷达及80年代航天飞机成像雷达上天之后, 90年代以来, 前苏联的金金刚石雷达卫星、日本的地球资源卫星、欧空局的欧洲遥感卫星及加拿大雷达卫星相继进入太空, 这些航天成像雷达都是单波段、单极化雷达系统<sup>[5]</sup>。已发射的星载极化SAR系统有美国的SIR-C/X-SAR、加拿大的Envisat ASAR和日本的ALOS PalSAR, 及即将发射的德国的TerraSAR和加拿大的Radarsat-2。

由美国、意大利和德国共同研制的SIR-C/X-SAR是2000年以前国际上最先进的、运行在地球轨道高度上的第一个多波段(L、C、X)同时成像雷达系统, 是在地球轨道高度上的第一个多极化(HH、HV、VH、VV)同时成像雷达系统, 并具有极化测量和干涉测量功能。已于1994年4月和10月装载在美国航天飞机“奋进号”两次飞行, 获取了全球许多地区不同成像模式的数据, 还获取了部分地区的极化数据和干涉数据, 并于1999年进行称作航天飞机雷达地形测图(SRTM)计划的第三次飞行。为了克服重复轨道的问题, 美国宇航局开展了SRTM计划, 对原来的SIR-C/X-SAR系统进行了改进, 加装了一个天线和一个60米的可伸缩长臂, 实现单通过干涉数据获取。SRTM计划在2000年2月的飞行实验中获得成功, 用11天的时间对北纬60度和南纬56度之间区域进行了多波段干涉成像测绘, 地域面积超过全球面积的80%, 干涉测量的高程精度为15米。这是迄今唯一的由航天飞机运载的双天线SAR干涉测量系统。

欧空局在ERS SAR基础上, 在2003年发射的Envisat-1卫星上装载ASAR, 它有同极化和交叉极化两种极化模式。

在Radarsat-1卫星基础上, 加拿大计划发射的Radarsat-2具有全极化测量能力。

日本于今年初发射的ALOS卫星PalSAR, 可覆盖南北60°角的范围, 系统采用乒乓模式, 工作在L波段, 采用全极化方式进行数据采集。

德国TerraSAR-X计划于今年下半年发射, 使用寿命为5年, 系统工作在X波段, 可以实现条带(测绘带30千米, 分辨率从3米到6米)、聚束(10×10千米, 分辨率1~2米)、扫描(100千米, 分辨率为16米)等多种成像方式, 可以提供全极化数据、重轨干涉数据、重轨极化干涉数据, 同时还可以采集顺轨干涉数据; TerraSAR-L工作在L波段, 工作模式有条带模式(单极化、双极化和全极化)、宽幅扫描模式(单极化、双极化)等。

综上所述, 世界上发达国家多数均在发展星载极化SAR系统, 而且正在考虑将现有的或研制中的星载极化SAR系统升级改造为星载POLINSAR系统, 可以得到如下启示:

极化干涉技术具有很强的生命力, 正成为推动极化、干涉、极化干涉技术发展的强大动力;

POLINSAR数据已经在星载的SIR-C/X-SAR系统以及多个机载平台(如德国DLR的E-SAR、丹麦DCRS的EMISAR、日本的PiSAR和美国NASA JPL的AIRSAR)上获取到; 欧洲、美国和加拿大已经开始了星载POLINSAR系统

的初步研究,收发分置星载POLINSAR系统的可行性已经被证实。星载POLINSAR系统正成为POLINSAR系统研制的热点;

美国的SIR-C/X-SAR、加拿大的Envisat ASAR、日本的ALOS PaSAR和德国的TerraSAR是星载极化SAR系统的代表,具备多波段干涉、多时相干涉、全/多极化数据获取能力,可以实现顺轨干涉和跨轨干涉,涵盖了INSAR地形高程信息提取和变化信息检测的重要应用领域,代表了POLINSAR技术和星载SAR系统的发展方向;

目前的星载SAR系统仍未实现常规运行模式的全极化干涉数据获取,国外仍处在星载POLINSAR系统的研究过程中,适时开展星载POLINSAR体制研究,能够紧跟国际研究。

## 5 POLINSAR 应用

从极化干涉SAR理论的提出到现在,不同的研究者对它在植被参数反演、高精度DEM生成等方面的应用进行了较广泛的研究。主要有以下几方面:

### 5.1 地表植被高度估计

POLINSAR在提取地表植被垂直结构信息方面具有比单独的干涉和极化雷达更大的优越性和更高的精度。POLINSAR应用的热点领域之一是地表植被(如森林)高度参数的反演。从目前的发展状况看,POLINSAR涉技术主要被用于分析多层形态(树冠-枝杈-树干-地面)特征的植被覆盖区域的竖直结构。植被具有不同形态特征的各个部分会显示出不同的散射特性,如果这些部分分别位于植被中的不同高度,则它们的有效相位中心也位于不同的高度。由于极化可以辨别出不同的散射行为,因此可以利用极化来形成对应于某个特定散射机理的干涉图。这样,这些干涉图之间的相位差就直接与场景中植被覆盖的高度联系起来,从而得到植被高度分布图。

### 5.2 高精度 DEM 提取

POLINSAR应用的第二个重要领域是高精度DEM生成。极化干涉相干最优过程可以有效地减小一个分辨率单元内有效散射中心高度差引起的去相关,特别是在地表植被覆盖丰富的区域,这种去相关更加严重,即极化干涉相干最优过程可以有效地消除空间基线去相关中残余的体散射分量引起的去相干的影响,从而大大提高相干性。并且,在时间去相干不太大的情况下,它通过极化状态的变化,可以补偿时间去相关的影响。因此,由POLINSAR生成的DEM精度较INSAR将得到显著的改善。在INSAR中,基线的选择会在很大程度上影响测高精度。基线较短时,两幅图像间的相干性大,但干涉条纹稀疏,有关地形高度的信息也较少;基线较长时,干涉条纹密集,对地形高度变化的反映也多一些,但图像间的相干性变得很差。利用POLINSAR进行了最优极化处理后,可以有效改善干涉相关系数,从而提高测高精度。

### 5.3 地物分类和参数反演

地物的电磁散射特性主要由电气参数和几何参数进行描述,电气参数包括散射体的介电特性、传导率和后向散射

系数等,几何参数包括散射体的位置、取向、地物起伏、地形坡度等。极化电磁波对散射体的电气参数敏感,而干涉方式可以获取地物散射特性的几何参数,POLINSAR技术实现了极化和干涉技术的有效组合,既对地物散射体的空间分布和高度敏感,又对植被散射体的形状和方向敏感。同时,极化干涉相干最优过程提供了相位散射中心的最优分离,POLINSAR在地物参数反演方面具有比单独的干涉和极化雷达更大的优越性和更高的精度。

干涉对不同的去相关源敏感,而极化对目标的形状、取向和介电特性以及不同的散射过程敏感。POLINSAR系统的研制将极大地推动有监督和无监督图像特征分类和识别算法的发展。这些技术包括对土壤含水量、起伏等参数的估计,利用POLINSAR数据估计的结果远优于单/多极化幅度SAR和(或)被动的激光传感系统得到的结果。INSAR只能提供平均高度信息,它不能区分树冠和下层树干高度,也不能分辨出陆地是植被覆盖还是多层分布的。与二维观测对象特征(不同尺度、不同传感器获取图像信息融合后)提取不同,极化干涉数据可以用于三维观测对象特征的提取。极化和干涉技术的有效结合可以对地物进行更细致精确的分类。根据干涉相关系数随时间的变化可以检测出观测对象随时间的变化情况,然后从极化数据中提取出关于散射过程的有用信息,进而确定产生这些变化的原因。

### 5.4 区域变化检测

近期和将来的环境压力遥感要求遥感从区域检测发展到大范围的安全冲突侦查,要求监控技术达到接近物理可实现的极限,以对大范围区域实施全天时全天候三维陆地监测,提供全天时的紧张区域变化和安全冲突信息。不仅目前非常需要这些重要的信息,而且将来为了使地球免于遭受日益严峻的人口爆炸问题以及随之而来的更多的由环境压力和政治安全造成的冲突,对这些信息的需求会更加迫切。

生物量估计是环境压力遥感的重要研究内容。在有特定限制的应用中,多幅复幅度(HH极化、HH与VV极化、HH与HV极化、VV与VH极化组合)部分POLINSAR可以提供比仅有幅度信息的SAR更好的特定的与场景相关的植被层信息<sup>[15]</sup>,但这不足以准确估计出植被密集分布地区尤其是林区的生物量。为了更加准确的估计陆地生物量,需要获取树冠到下层树干高度、有植被覆盖的陆地高度和有较大区别各层的高度,这些参数只有多波段的单飞或者重复飞行的POLINSAR或者极化层析SAR能得到。

POLINSAR是满足监控技术达到接近物理可实现极限要求的良好选择。星载POLINSAR是实现全球生物量估计、大范围的区域变化检测的有效工具,尤其是收发分置星载POLINSAR系统的研制将为实现全天时大范围三维监测铺平道路<sup>[14]</sup>。

### 5.5 探地应用

随着雷达工作频段的不断增加,将极化干涉扩展到宽带系统、尤其是地面穿透成像应用,也得到了密切的关注。随着极化干涉技术的迅速发展,相信它必将在越来越多的领域得

到更为广泛的应用。这是目前开展POLINSAR应用探索性研究的内容之一。

## 6 结束语

POLINSAR技术具有很强的生命力,正成为推动极化、干涉、极化干涉技术发展的强大动力。空间信息、频谱信息、极化信息、时间信息与宽带传感器的结合代表了POLINSAR技术当前乃至未来一段时间发展的方向。

国外已成功研制成多部机载POLINSAR系统,其获取的丰富数据资源极大地推动了POLINSAR技术研究,POLINSAR数据处理算法、图像特征提取和地物分类算法正逐步被研究人员实现、测试并证实,已掀起POLINSAR技术应用研究的热潮。星载POLINSAR系统研制正成为国外POLINSAR系统研制的热点,正在部署或开展星载POLINSAR运行性系统的设计和研制。近年来,我国SAR系统和数据处理技术的研究取得了很大进展,但是在目标信息获取手段、目标信息反演理论、特别是POLINSAR技术研究方面还远远落后于国外。我国尚无POLINSAR系统,数据资源的缺乏极大地限制了POLINSAR技术研究的深度和广度,对这一技术的研究尚停留在零星的理论与数据处理方面的探索研究的初期阶段。在我国,POLINSAR技术深入研究的开展,迫切需要解决数据资源缺乏这一限制条件。

## 参考文献

- [1] Thomas Flynn, Mark Tabb, and Richard Carande. Direct estimation of vegetation parameters from covariance data in polarimetric SAR Interferometry. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, June 24-28, 2002, Toronto Canada. IGARSS '2002, (3): 1908-1910.
- [2] Lluís Sagués, Juan Manuel Lopez-Sanchez, Joaquim Fortuny, Xavier Fabregas, Antoni Broquetas, and Alois J. Sieber. Polarimetric Radar Interferometry for Improved Mine Detection and Surface Clutter Rejection. *IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing*, 2001, 39(6): 1271-1278.
- [3] 郭华东, 李新武, 王长林, 李霞. 极化干涉雷达遥感机制及作用. *遥感学报*, 2002, 6(6): 401-405.
- [4] Papathanassiou K P, Hajnsek L, Moreira A, and Cloude S R. Interferometric SAR polarimetry using a passive polarimetric microsatellite concept. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, June 24-28, 2002, Toronto Canada. IGARSS '2002, (2): 826-828.
- [5] 李新武, 郭华东. POLINSAR信息提取方法及其应用研究. [博士论文], 北京: 中科院遥感应用研究所, 2002.6.
- [6] Papathanassiou K P and Cloude S R. Polarimetric effects in repeat-pass SAR interferometry. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, August 03-08, 1997, Singapore. IGARSS '1997, (4): 1926-1928.
- [7] Shane Robert Cloude and Konstantinos P. Papathanassiou. Polarimetric SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 1998, 36(5): 1551-1565.
- [8] Cloude S R. Robust parameter estimation using dual baseline polarimetric SAR interferometry. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, June 24-28, 2002, Toronto Canada. IGARSS '2002, (2): 838-840.
- [9] Mette T, Papathanassiou K P, Hajnsek I, and Zimmermann R. Forest biomass estimation using polarimetric SAR interferometry. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, June 24-28, 2002, Toronto Canada. IGARSS '2002, (2): 817-819.
- [10] Lopez-Sanchez J M, Fortuny J, Sieber A J, L. Sagués M. Bara X, F`abregas, and Broquetas A. Experimental Comparison of Different Scattering Mechanism Selections for Vegetation Height Retrieval by POLINT. 2000 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 24-28, 2000, Hawaii. IGARSS '2000, from CD ROM.
- [11] Yamada H, Yanaguchi Y, Rodriguez E, Kim Y, and Boerner W M. Polarimetric SAR Interferometry for Forest canopy analysis by using the super-resolution method. 2001 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 09-13, 2001, Sydney, Australia. IGARSS '2001, from CD ROM.
- [12] Steble O, Meier E, and Nuesch D. Forward and Inverse Modeling of Multi-baseline L-band Pol-InSAR E-SAR data. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, June 24-28, 2002, Toronto Canada. IGARSS '2002, from CD ROM.
- [13] Mark Tabb, Thomas Flynn, and Richard Carande. An extended Model for Characterizing Vegetation Canopies Using Polarimetric SAR Interferometry. 2002 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium and the 24<sup>th</sup> Canadian Symposium on Remote Sensing, June 24-28, 2002, Toronto Canada. IGARSS '2002, from CD ROM.
- [14] Boerner W M, Moreira A, Papathanassiou K P, Hajnsek I, Pottier E, Ferro-Famil L, Reigber A, Cloude S R, Sato M, Yamaguchi Y, Yamada H, Lee J S, Ainsworth T L, Schuler D L, Touzi R, and Lukowski T. Need for Developing Multi-band Single and Multiple Pass PolInSAR Monitoring Platforms in Air and Space. 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, June 21-25, 2003, Toulouse, France. IGARSS '2003, from CD ROM.
- [15] Mette T, Papathanassiou K, and Hajnsek I. Biomass Estimation from Polarimetric SAR Interferometry over Heterogeneous Forest Terrain. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, September 20-24, 2004, Anchorage, Alaska. IGARSS '2004, from CD ROM.

吴一戎: 男, 1963年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为合成孔径雷达系统与数据处理。

洪文: 1968年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为极化、极化干涉合成孔径雷达数据处理及应用。

王彦平: 1976年生, 副研究员, 研究方向为干涉、极化干涉合成孔径雷达数据处理及应用。