

文章编号: 1007-4619 (2002) 06-0401-05

极化干涉雷达遥感机制及作用

郭华东, 李新武, 王长林, 李震

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 极化干涉 SAR 是目前雷达遥感的前沿领域, 它是集极化 SAR 和干涉 SAR 于一体的新型对地观测技术。通过对极化干涉的基本原理和物理机制、极化干涉 SAR 的数据处理及与常规干涉 SAR 数据处理的区别, 以及极化干涉 SAR 当前的几个热点应用研究领域进行了阐述, 对极化干涉 SAR 存在的问题也进行了讨论。

关键词: 极化干涉; 相干最优; 目标分解理论; 物理机制; 参数反演; 数字高程模型 (DEM)

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引言

继 20 世纪 70 年代末期美国海洋卫星 (Seasat) 雷达及 80 年代航天飞机成像雷达 SIR-A, SIR-B 上天之后, 90 年代以来雷达遥感进入快速发展阶段, 其中典型的成像雷达系统有日本的 JERS-1, 欧空局的 ERS-1/2, 加拿大的 RADARSAT-1, 这些都是单波段、单极化成像雷达系统。由美国、意大利、德国 3 国共同研制的 SIR-C/X-SAR 是国际上运行在地球轨道上的第一个多波段 (L, C, X) 同时成像雷达系统, 并具有极化测量和干涉测量功能。于 1994 年 4 月和 10 月两次升空, 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雷达和干涉雷达数据。并且于 2000 年 2 月进行了为期 11 天的航天飞机雷达地形测图 (SRTM) 计划的飞行, 使得在全球范围内干涉 SAR 地形形成图成为可能^[1]。这些星载的或航天雷达系统的升空对于推动雷达遥感的飞速发展具有重大的意义。欧空局在 ERS-1/2 基础上, 近期发射的 ENVISAT-1 上装有 ASAR, 它具有同极化和交叉极化两种模式。加拿大计划在 RADARSAT-1 基础上于 2004 年发射 RADARSAT-2, 它具有全极化功能。日本也将在 2004 年发射 ALOS 卫星, 其上装有 PALSAR, 具有 4 个极化功能。比较典型的机载 SAR 系统有 AIRSAR, TOPSAR, CV-580

SAR 和 E-SAR。由此可见, 国际上成像雷达系统正在向新的方向发展。从 SAR 系统发展的角度, 可以将雷达遥感的发展分为 3 个阶段: 第一阶段为单波段单极化雷达遥感; 第二阶段为多波段多极化雷达遥感; 第三阶段为极化雷达、干涉雷达和极化干涉雷达遥感。特别是极化干涉雷达是近年来雷达遥感研究的前沿领域之一, 它将极化和干涉雷达的理论、技术融为一体而发展起来的一门前沿对地观测技术, 能提供比极化和干涉雷达更丰富的信息, 具有比单纯的极化和干涉更独特的优势, 对于量化雷达遥感的研究有极为重要的意义^[2]。

2 干涉 SAR 和极化 SAR

干涉 SAR 主要用于获取地物的空间垂直结构信息。它获取的两个重要的参数为: 相位和相干系数。对于相位, 它已广泛的应用于 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^[3-5]。它们主要是基于传统干涉 SAR 和差分干涉 SAR 进行研究。近几年来, 为了克服干涉 SAR 的时间去相干、几何去相干和大气不均匀性的影响, Ferretti 等人提出了永久散射体差分干涉技术, 对于慢形变过程的研究有很大的优势, 这是干涉雷达遥感研究的前沿之一, 但是它的应用领域还需扩充^[6,7]。1999 年, Hanssen 等人将 DEM 生成或地表形

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金重点项目“新型成像雷达对地观测机理与地物识别”(49989001)及中国科学院知识创新工程重点方向项目 (KZCX2-312)。

作者简介: 郭华东 (1950—), 男, 研究员, 1981 年毕业于中国科学院研究生院, 现任中国科学院遥感应用研究所所长、遥感信息科学重点实验室主任等职, 从事雷达遥感工作 20 余年, 已发表论文 150 余篇, 出版论著 13 部。

变测量研究中认为是噪声的大气分量作为信号进行了水蒸汽成图的研究,并且提出了一个新的研究方向——干涉雷达气象学^[8,9]。2001年 Bonforte 等人利用 GPS 和局部大气模型进行了大气对雷达干涉图影响的定标工作^[10]。近年来,干涉 SAR 获取的另一个重要参数——相干系数已被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^[11-14]。

极化 SAR 测量是每一像元的全散射矩阵,可合成包括线性极化、圆极化及椭圆极化在内的多种极化散射信息。因此与常规的单极化和多极化 SAR 相比,在雷达目标探测、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。这些巨大的进步需要归因于协方差矩阵最优过程的引入。这当中基于信息分离的目标特征分解理论、H- α -A 分解理论对于通过模型定量提取一些地面参数具有重要的理论指导意义和应用价值,尤其对极化 SAR 定量研究有重要的价值^[15,16]。同时,近年对雷达去极化信息和螺旋性的研究均是极化雷达机制研究的内容之一^[17,18]。

3 极化干涉 SAR

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对地观测技术。将全极化引入到干涉的最初思想起源是 Papathanassiou 等人首先利用 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^[19]。随之的问题是:在何种极化状态组合下,干涉相干性达到最高或最优,这是极化干涉 SAR 要解决的关键问题。在此之后,他们对重轨干涉中极化的影响进行了较系统的研究^[20],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,从而奠定了极化干涉雷达遥感的理论基础^[21]。

对于极化干涉相干最优过程,一般意义上可简单地叙述为: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。如果从数学上来解释,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。最大特征值与最高的相干系数相联系。而与最大特征

值相联系特征矢量对应于最优的极化状态组合。而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。从数学上可以简单的叙述为: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。上面仅仅从数学意义上对极化干涉相干最优的基本原理进行了一些简单的阐述。而在实际应用中,我们必须讨论它特定的物理意义,即它的物理本质。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型下,对它们的机制问题做了定性和半定量的解释。此处,我们只对具有普遍意义的物理机制进行解释。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,它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。这是极化干涉 SAR 优于常规干涉 SAR 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。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。

从极化干涉的基本理论提出到现在,很多学者对该理论进行了较深入的研究。主要有以下一些方面:由于 Cloude 极化干涉相干最优存在一个显式的拉格朗日最优过程,因此,他们引入了 Contraction 和 Hadamard 积,避免了显式的拉格朗日最优过程^[22]。相对于 Cloude 的全局相干最优,Sagues 等人提出了子空间相干最优理论^[23]。为了更好地对极化干涉的物理机制进行解释和提高量化应用的能力,Theuahft 和 Cloude 等提出了极化干涉相干散射模型理论^[24]。

4 极化干涉 SAR 处理

极化干涉 SAR 的数据处理与常规干涉的数据处理的基本思路大致相同。在此主要就与常规干涉 SAR 数据处理的区别进行阐述。

4.1 极化干涉相位定标

在常规干涉中,可以忽略相位定标处理,但是极化干涉数据必须经过相位定标处理。不仅同一个散射矩阵各元素之间的相位很重要,而且用于干涉的同一个分辨率单元的两个散射矩阵之间的相对相位也很重要,因此极化干涉中的相位定标比极化中的相位定标更严格。因此极化干涉相位定标是实现极化干涉 SAR 的难点之一^[25]。

4.2 相干最优估计和最优干涉图生成

该步骤是极化干涉与常规干涉数据处理的最大区别所在,并且有两个关键问题需要解决:

(1) 当散射机制或散射中心数小于 3 时,需用奇异值分解的方法来解决相干最优过程的计算问题。(2) 必须进行相位角因子校正。不然会得出相干系数比常规干涉有很大的改善,但是干涉图的质量却比常规干涉的干涉图差的自相矛盾的结论^[21]。

4.3 初始基线估计

在植被覆盖较丰富的区域,由于相干最优化处理可以大大消除了植被引起的去相干的影响,因此,在用基于图像数据的方法进行初始基线估计时,用最优干涉图估计的初始基线应具有比常规干涉更高的精度。这是极化干涉相对于常规干涉的优势之一。

5 极化干涉 SAR 的应用

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 生成等方面的应用潜力进行了较广泛的研究。

极化干涉雷达既具有干涉雷达对地表植被散射体的空间分布和高度很敏感的特性,又具有极化雷达对植被散射体的形状和方向很敏感的特性。同时,由于极化干涉相干最优过程提供了相位散射中心的最优分离,因此极化干涉雷达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。因此极化干涉 SAR 应用的热点领域之一是:地表植被(如森林)高度参数的反演。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(SBPI)^[26],并且在 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)^[27]。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^[28]。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^[29]。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^[30]。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^[31]。O. Stebler 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^[32]。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^[33]。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^[34]。

极化干涉 SAR 应用的第二个重要领域是高精度 DEM 生成。由于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关的影响,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,由极化干涉 SAR 生成的 DEM 精度较常规干涉 SAR 将得到显著的改善。李新武等首先用 1994 年的 SIR-C/X-SAR L 波段数据在地表植被覆盖丰富区域进行了一些研究,得到了较好的效果^[35]。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^[36]。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^[37]。

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^[38];Sagues 等人利用极化干涉 SAR 进行了地雷探测的实验室研究^[39]。总之,极化干涉的应用领域有很大潜力,这还有待于更充足数据源的获取等等。

6 存在的问题

到目前为止,很多研究者对极化干涉进行了较深入的研究,但是,还有许多未解决的课题:(1) 大多数研究限于机载数据源,并且理想数据的获取较困难;(2) 对于时间去相干的影响基本没有考虑;

(3) 散射机制确定和解释的定量化;(4) 极化干涉在山地区域地表植被参数提取潜力的研究;(5) 一个更复杂的反映真实地表植被结构的相干散射模型的建立;(6) 极化干涉应用领域的扩充等等。

虽然极化干涉 SAR 的出现代表了当前雷达遥感技术发展的最新成就,在极化干涉 SAR 的理论和技術基础上,还可以实现更为复杂和先进的极化层析成像雷达(POL-TOMO-SAR)^[40]以及极化全息雷达(POL-HOLO-SAR)^[2]系统。它们将把雷达遥感推向新的高潮。

参 考 文 献 (References)

- [1] Guo Huadong *et al.* Theory and Application of Radar Earth Observation [M]. Beijing: Science Press, 2000. [郭华东等. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [2] Boerner W M, Cloude S R, *et al.* Advances in Extra Wide-Band Multi-modal Air/Space-borne Radar Polarimetry, Pol-IN-SAR Imaging and its Application [A]. IGARSS2002. [C]. 2002.
- [3] Massonnet D, M Rossi, C Carmona, *et al.* The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry [J]. *Nature*, 1993, **34**(6433): 138—142.
- [4] Goldstein R M, H Engelhardt, B Kamb, *et al.* Satellite Radar Interferometry for Monitoring Ice Sheet Motion: Application to an Antarctic Ice Stream [J], *Science*, 1993, **262**: 1525—1530.
- [5] Carande R. Estimating Ocean Coherence Time Using Dual-Baseline Interferometric Synthetic Aperture Radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(4): 846—854.
- [6] Ferretti A, C Prati, F Rocca. Permanent Scatterers in SAR Interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000, **38**: 2202—2212.
- [7] Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**: 8—20.
- [8] Hanssen R F, Weckwerth T M, Zebker H A, *et al.* High-Resolution Water Vapor Mapping from Interferometric Radar Measurement [J]. *Science*, 1999, **283**: 1297—1299.
- [9] Hassen R F. Radar Interferometry-Data Interpretation and Error Analysis [M], Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [10] Bonforte A, Ferretti A, Prati C, *et al.* Calibration of Atmospheric Effects on SAR Interferograms by GPS and Local Atmosphere Models: First Results [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**: 1343—1357.
- [11] Koskinen J T, Pulliainen J T, Hyyppä J M, *et al.* The Seasonal Behavior of Interferometric Coherence in Boreal Forest [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2001, **39**(4): 820—829.
- [12] Maurizio Santoro, Jan Askne, Gary Smith, *et al.* Stem Volume Retrieval in Boreal Forests from ERS-1/2 Interferometry [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**: 19—35.
- [13] Engdahl M F, Borgeaud M, Rast M. The Use of ERS-1/2 Tandem Interferometric Coherence in the Estimation of Agricultural Crop Heights [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2001, **39**(8): 1799—1806.
- [14] Guneriusson T, Hogda K A, Johnsen H, *et al.* InSAR for Estimation of Changes in Snow Water Equivalent of Dry Snow [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**(10): 2101—2108.
- [15] Cloude S R. A Review of Target Decomposition Theorem in Radar Polarimetry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1996, **34**(2): 498—518.
- [16] Ferro-Famil L, Pottier E, Lee J S. Unsupervised Classification of Multifrequency and Fully Polarimetric SAR Images Based on the H/A/Alpha-Wishart Classifier [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**(11): 2332—2341.
- [17] Cloude S R. A New Method for Characterizing Depolarization Effects in Radar and Optical Remote Sensing [A]. IGARSS'01 [C]. 2001.
- [18] Cloude S R. Helicity in Radar Remote Sensing [A]. Proceedings of IGARSS'02 [C]. 2002.
- [19] Papathanassiou K P, Moreira J R. Interferometric Analysis of Multifrequency and Multipolarization SAR Data [A]. IGARSS'96 [C]. 1996.
- [20] Papathanassiou K P, Cloude S R. Polarimetric Effects in Repeat-Pass SAR Interferometry [A]. IGARSS'97 [C]. 1997.
- [21] Cloude S R, Papathanassiou K P. Polarimetric SAR interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1998, **36**: 1551—1565.
- [22] Luneburg F, Cloude S R. Contractions, Hadamard Products and Their Application to Polarimetric Radar Interferometry [A]. IGARSS'99 [C]. 1999.
- [23] Sagues I, Lopez-Sanchez J M, *et al.* Indoor Experiments on Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2000, **38**(2): 671—684.
- [24] Treuhaft R N, Siqueira P R. The Vertical Structure of Vegetated Land Surfaces from Interferometric and Polarimetric Radar [J]. *Radio Sci.*, 2000, **35**(1): 141—177.
- [25] Kim Y J, Van Zyl J J. Polarimetric and Interferometric SAR Calibration Verification Methods [A]. IGARSS'01 [C]. 2001.
- [26] Papathanassiou K P, Cloude S R. Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 2001, **39**(11): 2352—2363.
- [27] Cloude S R. Robust Parameter Estimation Using Dual Baseline Polarimetric SAR Interferometry [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [28] Mette T, Papathanassiou K P, Hajnsek I, *et al.* Forest Biomass Estimation Using Polarimetric SAR Interferometry [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [29] Papathanassiou K P., Hajnsek I, Moreira A, *et al.* Forest Parameter Estimation Using a Passive Polarimetric Microsatellite Concept [A], IGARSS'02 [C]. 2002.
- [30] Lopez-Sanchez J M, Fortuny J A, Sieber J, *et al.* Experimental Comparison of Differential Scattering Mechanism Selections for Vegetation Height Retrieval by POLINT [A]. IGARSS'00 [C]. 2000.
- [31] Yamada H, Yamaguchi Y, Rodriguez E, *et al.* Polarimetric SAR Interferometry for Forest Canopy Analysis by Using the Super-Resolution Method [A], IGARSS'01 [C]. 2001.

- [32] Stebler O, Meier E, Nuesch D. Forward and Inverse Modeling of Multi-baseline L-band Pol-InSAR E-SAR data [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [33] Tabb Mark, Flynn T, Carande R. An Extended Model for Characterizing Vegetation Canopies Using Polarimetric SAR Interferometry [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [34] Flynn T, Tabb Mark, Carande R. Direct Estimation of Vegetation Parameters from Covariance Data in Polarimetric SAR Interferometry [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [35] Li Xinwu, Guo Huadong, Wang Changlin, *et al.* DEM Generation and Error Analysis Using Polarimetric SAR Interferometry [J]. *High Technology Letter*, (Accepted)[李新武,郭华东,王长林等.极化干涉 SAR 数据提取 DEM 和误差分析[J].高技术通讯,(已接收)]
- [36] Brandfass M. Generation of Bald Earth Digital Elevation Models as Applied to Polarimetric SAR Interferometry [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [37] Luciano V D, Marcos T E, *et al.* Assessment of Digital Elevation Models Obtained in Brazilian Amazon Based on P and X band Airborne Interferometric Data [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [38] Hajnsek I, Papathanassiou K P, Moreira A, *et al.* Surface Parameter Estimation Using Interferometric and Polarimetric SAR [A]. IGARSS'02 [C]. 2002.
- [39] Sagues I, Lopez-Sanchez J M, Fortuny J, *et al.* Polarimetric Radar Interferometry for Improved Mine Detection and Surface Clutter Rejection [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*. 2001, **39**(6): 1271—1278.
- [40] Reigber A, Moreira A. First Demonstration of Airborne SAR Tomography Using Multibaseline L-band Data [J]. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2000, **38**(5):2142—2152.

The Mechanism and Role of Polarimetric SAR Interferometry

GUO Hua-dong, LI Xin-wu, WANG Chang-lin, LI Zhen

(LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Polarimetric SAR Interferometry (Pol-InSAR) represents the current culmination in microwave remote sensing technology, it is a new earth observation technology that integrated the Polarimetric SAR and Interferometric SAR. In this paper, the basic principal and physical mechanism of Pol-InSAR, data processing and the difference between conventional InSAR and Pol-InSAR, and several hot application scopes are discussed in detail. At last, the existing problems and prospective of Pol-InSAR are also discussed.

Key words: polarimetric SAR interferometry; coherent optimization; target decomposition theory; mechanism; parameter inversion, DEM