

极化 SAR 图像目标分解方法的研究进展

张腊梅* 段宝龙 邹斌
(哈尔滨工业大学 哈尔滨 150001)

摘 要: 极化合成孔径雷达(极化 SAR)经过近几年的迅速发展,已经成为遥感领域的一大研究热点。极化目标分解作为极化 SAR 图像分析的一种基本手段,所提取的极化信息是极化 SAR 图像目标检测和分类的基础,在极化 SAR 图像解译中起着关键作用。通过对近几年极化目标分解方法的发展作一个全面的阐述,重点介绍该领域出现的新技术,使相关研究人员能够更清晰地了解这一领域的最新进展。

关键词: 极化合成孔径雷达; 特征提取; 极化目标分解

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)12-3289-09

DOI: 10.11999/JEIT160992

Research Development on Target Decomposition Method of Polarimetric SAR Image

ZHANG Lamei DUAN Baolong ZOU Bin
(Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Polarimetric Synthetic Aperture Radar (Polarimetric SAR) has become a hot research topic in the field of remote sensing with the rapid development in recent years. Polarimetric target decomposition is a basic method for Polarimetric SAR image analysis, and plays a key role in Polarimetric SAR image interpretation, the extracted features from polarimetric target decomposition is the basis of target detection and image classification using Polarimetric SAR image. In this paper, through exposing the development of polarimetric target decomposition as well as the new technologies in recent years comprehensively, the relevant researchers can understand the latest progress in this field clearly.

Key words: Polarimetric SAR; Feature extraction; Polarimetric target decomposition

1 引言

作为主动式微波遥感成像传感器的一种,合成孔径雷达(SAR)不仅具有全天时全天候工作的能力,而且具有一定的穿透力,可以反映出地物的结构信息,已经得到了广泛的应用。极化合成孔径雷达(极化 SAR)是建立在传统 SAR 系统上的新体制 SAR 系统,它通过不同极化方式的组合对物体进行全极化测量,记录物体的物质组成、几何特征、方位指向等信息,实现对物体更为全面的描述,能够针对不同的应用场景提供所需的具体信息,已经成为 SAR 遥感领域的研究热门^[1,2]。

经过近些年的发展,大量机载和星载极化 SAR

系统被应用于遥感领域,进而越来越多的极化 SAR 图像数据被获得,但是目前极化 SAR 图像解译技术还远滞后于信息源的发展^[3,4],并且由于 SAR 图像特有的成像机理和复杂的成像环境也大大增加了图像解译的难度。如何对获得的极化 SAR 图像数据进行高效利用、快速而有效地提取出有用的信息,已成为一个亟待解决的难题。

极化目标分解是极化 SAR 图像极化特征提取的主要实现方法^[5],基于切合实际的物理约束来解译目标的散射机制,将获得的极化数据分解为若干具有实际物理意义的参数,从而方便分析目标复杂的散射过程。还可以将分解得到的参数应用于后续极化 SAR 图像目标检测和分类,因此,对极化 SAR 图像进行目标分解的研究并将其应用到图像解译中具有相当重要的意义。本文对近几年极化 SAR 图像目标分解方法进行分析 and 阐释,方便有关人员更全面地了解这一技术的最新发展。极化目标分解理论首先由 Huynen 提出,自这一独创性工作开展以来,多种分解方法相继被提出,目前,我们将极化目标

收稿日期: 2016-09-29; 改回日期: 2016-11-14; 网络出版: 2016-12-13

*通信作者: 张腊梅 lmzhang@hit.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61401124), 黑龙江省博士后科研启动基金(LBH-Q13069)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61401124), The Postdoctoral Scientific Research Developmental Foundation of Heilongjiang Province (LBH-Q13069)

分解理论分为用于描述纯目标的相干目标分解和用于描述分布式目标的非相干目标分解两大类。

2 相干目标分解

相干目标分解是一种主要用于描述纯目标的分解方法,通过对纯目标的极化散射矩阵进行加法或乘积分解,提取出一系列能够较好描述目标的极化特征。目前,相干目标分解主要包括 Pauli 分解、Krogager 分解、Cameron 分解、对 Cameron 分解的改进、无损的相干目标分解以及基于群论的独立完整目标分解等方法。

Pauli 分解是一种加性分解,在单站后向散射情况下,它将极化散射矩阵分解为各向同性奇次散射、各向同性偶次散射和 45° 旋转的各向同性偶次散射,它们分别对应平面散射、与雷达飞行方向平行的二面角和与雷达飞行方向呈 45° 的二面角。分解得到的 3 种成分之间相互正交,但是与之对应的目标特性并不相互独立,只能区分奇次散射和偶次散射,这在很大程度上限制了它的实际应用,故而 Pauli 分解结果通常用作数据有效性检验而不能用作后续处理的极化特征。

Krogager 分解^[6,7]在圆极化基的基础上将极化散射矩阵分解为 3 个具有明确物理意义的相干分量之和,分别对应于球散射、二面角散射和螺旋散射(不同情况对应不同螺旋方向)。分解总共得到 6 个参数,包括 3 个角度:散射矩阵的绝对相位 φ , 球散射分量对于二面角散射分量的相移 φ_s , 取向角 θ 和 3 个分量的散射强度:球散射、二面角散射和螺旋体散射分量的散射强度 K_s , K_d 和 K_h 。由于二面角散射和螺旋散射的基互相之间不正交,目标矢量之间的正交性不再成立,故各分解参数不再是基不变的。Krogager 分解充分利用了极化 SAR 数据的内在相干性,对高分辨率的极化 SAR 数据应用效果较好。

Cameron 分解^[8,9]建立在目标的对称性和互易性基础上,首先将极化散射矩阵分解成互易分量和非互易分量,然后将互易分量进一步分解为最大对称成分和最小对称成分,再通过计算最大对称成分与典型目标的相似度来匹配典型目标。其中最大对称成分具体可分为三面体、二面体、偶极子、圆柱体、窄二面体、 $1/4$ 波振子以及左螺旋体和右螺旋体这 8 种成分。由于 Cameron 分解方法是建立在目标互易性和对称性的基础上,并且在分解之前并不进行目标的对称性检验,故在不满足对称性的雷达目标区域会产生错误。

针对 Cameron 分解中的对称目标部分,Touzi^[10]

提出了一种对称散射特征化方法(SSCM)。该方法将 Cameron 分解中的最大对称部分用表征部分相干目标散射类型的 α , 表征散射矢量方向的 η , 角 ε 及三面角和二面角通道的相位差 $\Phi_{sa} - \Phi_{sb}$ 来描述,并通过将归一化最大对称部分表示为庞加莱球角 ψ_c , χ_c 的函数,可以更完整地描述单位圆盘和典型目标的关系且减少冗余,能更加准确地将最大对称部分中的极化散射信息提取出来。在此基础上,Touzi^[11]提出了目标散射向量模型(TSVM),用目标散射角 ψ 和 4 个与方位向无关的目标参数($\tau_m, m, \alpha_s, \Phi_{as}$)来描述散射特性,这 4 个的参数含义分别如下:螺旋度、最大振幅和描述对称散射类型的两个极坐标。随后,Touzi^[12]将 TSVM 应用到 Cloude 特征分解,提出了相干目标分解 TSVM-CTD 模型,在单视和多视 SAR 数据区域都适用。

针对传统相干目标分解没有完全获取极化散射矩阵 4 个复数所包含的信息,Paladini 等人^[13,14]对当前的相干目标分解方法进行了总结,提出了一种无损目标分解方法(LSTD)。该方法充分考虑了目标对称的充分性、互易的充分性、基选择的正交性和参数提取的完整性,通过引入法拉第旋转角 Ω ^[15],并利用 6 个四阶特殊酉矩阵将极化散射矩阵分解为 8 个具有物理意义的参数,这 8 个参数分别为:散射能量 SPAN,极化指向角 θ ,奇次-偶次散射度 α ,非互易度 Nr,螺旋度 Hel,同极化-交叉极化相位差 γ ,法拉第旋转角 Ω 和绝对相位 ϕ 。无损分解方法在很大程度上减小了由于极化所带来的传播畸变,对于下一代星载全极化 SAR 有很广泛的应用前景。但是 LSTD 存在参数不满足独立性的问题,这是由于只有在对称(Hel=0)和互易(Nr=0)的情况下, α 角才能够被准确估计。

在此基础上,Zou 等人^[16]针对相干目标分解信息提取的完整性和提取参数的独立性问题,提出了基于群论的独立完整目标分解方法(ISTD)。该分解方法利用群论知识将四阶酉矩阵 SU(4)表示转换为六阶实正交矩阵 SO(6)表示,并通过分析与奇次-偶次散射度量 α ,螺旋度量 Hel,非互易度量 Nr 等参数有关的典型目标在六阶实正交矩阵中的表征,可以完整地极化散射矩阵中获取 8 个互相独立且具有明确物理意义的参数。8 个参数的物理意义与 LSTD 分解相同,且 ISTD 同时满足目标分解的独立性与完整性,可以更简单直观地将当前散射体归为典型目标,提供更多的地物细节,并且在森林区域,ISTD 提取的 α 角不会被过估计,这个特点使得它能够用来区分人造目标与森林区域。

研究人员利用 UAVSAR, EMISAR 和 ESAR 等

典型极化数据对 LSTD 分解和几种传统相干目标分解方法进行对比验证。实验结果表明, Krogager 分解模型和计算过程较为简单, 能够提取到 3 个极化特征, 但是 3 个特征的组合很难对地物进行细致的表征。与之相比, ISTD 分解可以提供精细的地物细节, 能够更多地区分地物种类, 但是由于模型的复杂度较高, 计算比 Krogager 分解复杂。Cameron 分解结果经过一个判决过程可以将每个散射体分为三面角、二面角、偶极子、圆柱体、窄极子、1/4 波振子、左螺旋和右螺旋中的一个, 由于引入了判决过程, 模型相对复杂, 与之相比, ISTD 分解在对结果进行散射体归类时相对简单, 能够直接将当前散射体归纳为某种具体散射类型。TSVM 分解和 ISTD 分解都能提取到 α 角, 但是 ISTD 提取的 α 角不会过估计, 使这得能够很好地应用于区分人造目标和森林区域。

由于相干目标分解是基于散射矩阵的分解方法, 只能用于描述纯目标, 故近年来的发展并不多。表 1 总结了目前主要的相干目标分解方法。

3 非相干目标分解

Huynen^[17]首次提出了“目标信息分解”和分布式目标的概念。Huynen 分解将输入的雷达数据分解成一个平均单一散射目标分量和一个残留分量, 由于引入了分布式目标, 该方法能够从杂波环境中提取出所需目标, 适用于时变目标的提取。后来发展的许多分解方法大都以此为基础。对分布式目标的

目标分解叫做非相干目标分解, 主要分为基于 Mueller 矩阵的非相干目标分解、基于协方差矩阵 C 或相干矩阵 T 的特征值非相干目标分解和基于协方差矩阵 C 或相干矩阵 T 的非相干目标分解, 也称作基于散射模型的非相干目标分解。

3.1 基于 Mueller 矩阵的非相干目标分解

Van Zyl^[18]将目标的 Mueller 矩阵分解为奇次散射、偶次散射和漫散射的线性组合, 随后 Dong 等人^[19]在此基础上加入了交叉散射, 将任意目标的散射特性分解为奇次散射、偶次散射、布拉格散射以及交叉散射 4 种散射机制的加权和, 并用最小二乘法求取 4 种成分的最佳组合。国内的王之禹等人^[20]将 Mueller 矩阵分解为奇次散射、偶次散射、体散射以及布拉格散射 4 种散射机制。上述分解方法得到的各分量都具有明确的物理意义, 且各分量之间统计独立, 可以和真实地物对应。

虽然这种方法在理论上具有特殊意义, 但是近年来发展并不多, 没有得到广泛应用。表 2 给出了几种典型的基于 Mueller 矩阵的目标分解方法。

3.2 基于特征值分解的非相干目标分解

Cloude 等人^[12]首先开展研究了基于特征值分解的极化目标分解, 他们提出的算法通过将目标相干矩阵进行特征值分解并求取最大特征值来确定地物中的主导散射机制。对最大特征值对应的特征向量进行目标分解, 可以将目标主导散射机制归为奇次散射、偶次散射和体散射之一。在此基础上, Cloude

表 1 主要相干目标分解方法

分解方法	分解参数	适用性分析
Pauli 分解	奇次散射、偶次散射和 45° 旋转的偶次散射	实现简单, 通常用作数据的有效性检验
Krogager 分解	球散射、二面角散射和螺旋散射	能区分人造目标, 适用于高分辨率数据
Cameron 分解	非互易分量、最大对称成分和最小对称成分	适用于相干区域, 在非相干区域会产生错误
Touzi 分解	用 3 个参数和 1 个角度来表示 Cameron 分解中的最大对称成分	以较高的分辨率分割目标对称成分, 能很好地提取最大目标对称成分的信息
无损分解(LSTD)	SPAN, θ , α , Nr, Hel, γ , Ω , ϕ 8 个参数	完整利用散射矩阵的所有信息, 减少了传播畸变带来的误差, 适用于星载雷达
独立完整分解(ISTD)	SPAN, θ , α , Nr, Hel, γ , Ω , ϕ 8 个参数	同时满足独立性和完整性, 得到的地物细节信息更精细, 能够区分人造目标和森林区域

表 2 基于 Mueller 矩阵的目标分解方法

分解方法	分解参数	适用性分析
Huynen 分解	平均单一目标分量和残留分量	引入了分布式目标, 适用时变目标分析
Van Zyl 分解	奇次散射、偶次散射和漫散射	适用于满足散射对称条件的自然区域
Dong 分解	奇次散射、偶次散射、布拉格散射和交叉散射	适用于城镇、森林和海洋等不同类别。对线性极化分解精度超过 95%
王之禹分解	奇次散射、偶次散射、体散射和布拉格散射	引入体散射, 能够描述建筑物和森林区域

和 Pottier^[21]用 3 个特征向量构建出 3 种纯目标并将目标相干矩阵分解为 3 种纯目标的加权和, 特征值描述某种散射在所有散射中所占得权重, 特征向量描述不同的散射过程。由特征值和特征向量获取到 3 个参数: 极化信息熵 H , 极化散射角 α 和各向异性度 A 。 H 的大小代表了散射随机性的大小, 当 $H = 1$ 时, 极化信息为零, 目标散射完全是一个随机噪声; A 的大小反映了分解中相对较弱的 2 个散射分量之间的关系, 在实际应用中, 当 $H > 0.7$ 时, A 才会用于散射机制的识别; α 角主要用来识别目标散射机制, $\alpha = 0^\circ$ 表示目标为表面散射, $\alpha = 45^\circ$ 表示目标为偶极子散射, $\alpha = 90^\circ$ 表示目标为二面角散射。这 3 个参数都与明确的物理特性关联, 根据参数 H 和 α , Cloude 和 Pottier 提出了一种基于 2 维 H/α 平面的非监督分类方法, 其中 H/α 平面可以表征所有随机散射机制, 在极化 SAR 图像分类领域应用非常广泛。Cloude-Pottier 分解物理意义明确, 简单易用, 能够区分自然目标, 受到相关领域的广泛关注, 是一种经典的极化目标分解方法之一。2010 年, 清华大学的 An 等人^[22]提出了一种快速计算 H 和 α 的方法, 该方法通过计算它们的替代量来计算参数 H 和 α , 可以使 Cloude-Pottier 分解的计算效率得到很大程度上的提高。

Holm 等人^[23]也提出了一种基于特征值分解的目标分解方法, 该方法将观测目标看作一个点目标和两个噪声的叠加。Holm 分解^[23]将相干矩阵分解成 3 个部分, 其中第 1 部分看作一个对应稳态目标的部分, 散射能量较大, 认为它是该目标的主导散射成分; 第 2 部分和第 3 部分可以看作是噪声和残留项。通常, 只有第 1 部分的秩为 1, 所以只有第 1 部分可以看作一个固定目标的散射。Van Zyl 分解^[24]是基于特征值分解和对称假设的分解方法, 该方法用协方差矩阵描述方位向对称的自然媒质, 适用于土地和森林等自然目标区域。在 Van Zyl 分解中, 同极化和交叉极化的相干性被假定为 0, 分解得到的前两个特征向量对应的散射过程看作是奇次散射和偶次散射, 该分解方法是后续基于散射模型的目标分解方法的基础。Ainsworth 等人^[25]提出的基于特征向量的分解方法在圆极化基下, 通过定义一组复旋转变换, 同时保留特征向量的正交性, 将特征向量分解为 4 个有清晰物理意义的参数和 2 个去极化参数, 分解得到的这 6 个参数互相独立。

由特征分解得到的参数在极化 SAR 领域得到了非常广泛的应用, 但是由于这类方法并没有直接建立特征向量与不同散射机制之间的关系, 无法获得散射机制的功率等参数。目前基于特征值分解的

方法的发展似乎已经进入停滞, 大多应用熵和散射角来分析地物特征, 并没有新的实用分解方法或参数被提出来。表 3 给出了几种主要的基于特征值分解的目标分解方法。

表 3 基于特征值的分解方法

分解方法	分解参数	适用性分析
Cloude-Pottier 分解	信息熵 H , 散射角 α 和各项异性度 A	方法简明易用, 能够区分自然目标, 在极化 SAR 图像分类方面得到广泛应用
An 分解	通过替代量快速计算信息熵和散射角	提高了 Cloude-Pottier 分解的计算效率
Holm 分解	得到 1 个点目标和 2 个噪声	适用于静止目标的分析
Van Zyl 分解	前 2 个特征矢量对应的奇次散射和偶次散射	适用于土壤、森林等反射对称的自然区域
Ainsworth 分解	4 个有直接物理意义的参数和 2 个去极化参数	能够得到相位偏移和去极化参数

3.3 基于散射模型的非相干目标分解

Freeman 和 Durden^[26]最先提出这类基于协方差矩阵 C 或相干矩阵 T 的分解方法, 其核心思想是将协方差矩阵 C 或相干矩阵 T 分解成几种基本散射模型的叠加。Freeman-Durden 分解^[26]把极化 SAR 的协方差矩阵分解为 3 个成分的叠加, 分别是粗糙表面的 Bragg 散射、由二面角反射器得到的偶次散射和由一系列随机取向偶极子得到的体散射。Freeman-Durden 分解方法并不是完全通过数学手段来进行的, 而是充分利用雷达散射的物理特性, 分解结果的 3 种成分有着明确的物理意义。这种方法可以很好地描述自然区域, 在满足反射对称即 $\langle S_{HH}S_{HV}^* \rangle \approx \langle S_{HV}S_{VV}^* \rangle \approx 0$ 的区域得到了较好的应用。Freeman-Durden 分解是基于散射模型的非相干目标分解的基础, 但是该方法存在两个假设, 一是假设了散射中偶极子的旋转是均匀的, 这并不符合所有的散射情况; 二是假设了反射对称条件的成立。这两个假设极大地限制了该方法的通用性。

针对人造目标不满足对称性的特点, Moriyama 等人^[27]建立了 OEC 模型, 该模型将后向散射分为奇次散射、偶次散射和交叉散射 3 种成分, 其中奇次散射和偶次散射与 Freeman-Durden 分解相同, 交叉散射包含其余的散射成分并且与交叉极化响应有关。OEC 模型不仅适用于自然区域, 还在城镇区域得到了较好的应用。随后, Yamaguchi 等人^[28]在 Freeman 三成分分解的基础上, 针对人造目标的特

点, 引入螺旋散射成分, 建立了四成分分解模型, 该模型能够应用到具有城镇或者复杂地形的区域, 相比三成分分解, 其适用范围更加广泛。后来他们又提出基于相干矩阵的四成分分解方法, 结果与基于协方差矩阵的分解相同, 优点在于可以用散射矩阵元素明确地表达 4 种成分, 定量地进行极化 SAR 图像解译。在四成分分解基础上, Zhang 等人^[29]针对建筑物边缘区域引入了线散射, 提出了多成分分解模型(MCSM), 该模型将协方差矩阵分解为奇次散射、偶次散射、体散射、螺旋散射和线散射这 5 种基本散射机制的加权和, 构建了更加普适的散射模型, 在人造目标检测方面获得了较好的效果。多成分分解相比于其他分解能够更加细致地描述地物特征, 对城镇的识别度更高, 但是同时计算过程也变得相对复杂。随后 Yamaguchi 在论文中给出了基于散射模型目标分解的实现流程, 极大地简化了计算过程。

研究人员利用 EMISAR 和 ESAR 等典型极化数据对典型的基于散射模型的分解方法进行了实验验证和对比分析, 实验结果表明, Freeman 分解和 OEC 分解模型都是提取到 3 个极化特征, 模型复杂度较低且二者计算效率几乎相当, 但是 Freeman 分解将大部分城镇区域识别错误, 而 OEC 分解则能够相对较好地表征城镇区域。四成分分解结果能够得到 4 个极化特征, 相比于 Freeman 分解更好地识别出城镇区域, 但是该模型复杂度和计算效率相比于 Freeman 分解稍差。

表 4 给出了几种主要的基于散射模型的分解方法。这类方法能够获得不同散射机制的功率等参数, 物理意义更加明确, 具有更高的实用价值。但是这类方法同样存在一些问题, 目前仍在解决中。

3.4 基于散射模型的目标分解存在的问题及解决

非相干目标分解方法主要是将协方差矩阵和相干矩阵进行分解, 近年来得到了迅速发展和广泛应用, 但这些方法大多基于 Cloude 特征值分解和 Freeman 三成分分解, 其应用都有一定的局限性。

2011 年, Lee 等人^[30]对当前基于模型的目标分解方法进行总结并指出了这类目标分解方法存在的几个问题: (1) 散射模型选择尤其是体散射模型选择困难的问题; (2) 存在负功率问题; (3) 体散射过估计或极化指向角补偿问题。其中第 1 个问题是因为传统目标分解方法的体散射模型有限, 而实际体散射过程复杂, 模型并不能总是满足实际情况。第 2 个问题是由于在传统基于模型的目标分解中没有加入功率限制, 从而导致负功率的产生。第 3 个问题是由于具有旋转的偶次散射在传统基于模型的目标分解方法结果中表现为体散射为主, 必须经过极化指向角补偿才能够保证分解结果的正确性。第 3 个问题是这几个问题中影响最为严重的一个。针对以上 3 个问题, 国内外学者提出了大量的改进方法。

针对体散射模型选择困难问题, Antropov 等人^[31]在分析森林中散射体不完全满足方位向对称性的特点, 通过对实际的体散射建模得到通用的体散射模型。Antropov 等人提出的体散射模型足够通用, 能够对目前大量的体散射建模, 并兼容之前提出的多种体散射模型, 将其应用到 ALOS-PALSAR 图像森林应用中。Arii 等人^[32]认为之前的基于模型的目标分解方法对体散射模型存在部分假设, 导致体散射模型的数量不足以满足所有的体散射情况, 同时基于模型的目标分解方法在全幅图像中利用完全一样的体散射模型或者仅仅利用很少几种体散射模型, 不符合实际情况, 因此 Arii 认为应该对图像中不同区域采用不同的体散射模型。Arii 通过计算图像中每个像素的极化指向角和体散射不均匀度来构建一个自适应的体散射模型, 而且目标分解中不需要体散射反射对称假设, 使得这种体散射更符合实际情况, 通过最小化残余量的方式自适应选择模型以达到目标分解的目的。

针对负功率问题, Van Zyl 等人^[33]提到基于模型的目标分解方法中存在负功率问题的起因, 提出一种非负特征值的方法解决负功率问题。Van Zyl 等人提出的基于非负特征值分解(NNED)的四成分分

表 4 基于散射模型的非相干目标分解

分解方法	分解参数	适用性分析
Freeman 分解(三成分分解)	奇次散射、偶次散射和体散射	适用于满足反射对称的自然目标, 但不能区分自然区域和人造目标
OEC 分解	奇次散射、偶次散射和交叉散射	不仅适用于自然区域, 还适用于建筑物的特征提取
Yamaguchi 分解(四成分分解)	奇次散射、偶次散射、体散射和螺旋散射	适用于非对称目标区域, 能够对城镇等人造目标有较好的表征
多成分分解	奇次散射、偶次散射、体散射、螺旋散射和线散射	考虑了更多的散射机制, 是一个更全面的模型, 能更好地表征自然区域和人造目标

解方法保证分解后的协方差矩阵的特征值都是非负的,联合提出的非负特征值分解去解决当前四成分目标分解中部分参数假设的问题,实验结果表明基于非负特征值分解的四成分分解方法不仅在负功率问题上得到了很好的解决,同时通过实验证明了其能够有效地控制体散射过估计的问题。刘高峰等人^[34]针对现有的四成分分解存在相干矩阵不满足非负特征值约束(NER)的问题,提出了一种基于层次NER的四成分模型。由于NER问题主要来自于散射功率的过估计,只需解决余项相干矩阵的NER问题就可以解决所有相干矩阵的NER问题。该模型依次建立了抑制散射功率过估计的第1层至第4层NER方法,其中后层的NER方法需要分层次的执行前层NER方法,最后解决了余项相干矩阵的NER问题。针对NNED存在的问题,Wang等人^[35]提出了一个“不基于RSA的NNED”,将传统NNED拓展到反射不对称情况,能够将相干矩阵的元素全部利用到。经过实验验证,该方法的结果在某些情况下,有效地提高了奇次散射功率和偶次散射功率,降低了体散射功率。并且由于该方法不基于RSA,所以无论是解方程还是特征分解的过程计算量都很可观。蔡永俊等人^[36]提出了一种自适应三分量分解模型,该模型考虑了像素中不同旋转角的两个面或偶次散射目标,然后利用Alpha角决定除体散射外的其他主导机制,这使面或偶次散射得到了更充分的保持。同时他们提出了一种针对负功率的优化措施,使用非负特征值的替代方法,大大降低了负功率的出现,实验结果表明,负功率像素比例从66.2%降低到了2.4%。

针对体散射过估计或极化指向角补偿问题,目前出现了大量的改进方法。An等人^[37]分析了负功率产生的原因和Freeman三成分目标分解中体散射过估计的原因,通过引入极化指向角补偿,对Freeman三成分分解进行改进,该方法虽然是在解决负功率的问题,然而实质也是对体散射过估计的问题进行改进,ESAR实验结果表明该方法在旋转建筑物区域能够有效地反应出建筑物该有的散射特性。Yamaguchi等人^[38]在四成分目标分解基础上,通过对相干矩阵进行旋转,解决极化指向角带来的体散射过估计的问题^[39],与An分解不同的是指向角推导的过程不同,然而指向角提取的最后公式是一致的,同时旋转的Yamaguchi分解是四成分分解,比An分解多一个螺旋散射分量,使得该方法能够更好地用于人造目标区域,目前已成为广泛使用的目标分解方法之一。Chen等人^[40]认为体散射过估计的原因是由于极化指向角补偿无效导致的,Yamaguchi

和An在极化角估计时利用最小化交叉极化项来完成,然而Chen等人认为这种估计方法无法保证偶次散射和奇次散射能够同时被补偿,因此旋转建筑物会出现体散射过估计的问题。Chen分解通过建立通用偶次散射和奇次散射模型来满足所有可能出现的情况,进而提出了一种通用的基于模型的目标分解方法,他们利用非线性最优求解方法搜索最优的分解结果,实验结果验证了其在具有旋转的建筑物区域的有效性。Bhattacharya等人^[41]通过定义随机距离解决体散射过估计的问题,Bhattacharya等人在提取极化指向角方面也与Yamaguchi和An不同,通过最大化旋转前和旋转后的相干矩阵中的两个元素的Hellinger距离来获取极化指向角,经过该极化指向角补偿后,旋转建筑物区域的体散射过估计的问题得到了有效的抑制,同时负功率的问题也得到了的解决。阎丽丽等人^[42]提出一种适合旋转建筑物的四分量目标分解方法,同样在一定程度上解决了体散射过估计的问题,可以用来区分旋转建筑物和植被,该目标分解方法对方向补偿后的相干矩阵进行相位旋转,然后构造了一种修正的体散射模型既包含纯体散射模型又包含旋转二面角散射模型,同时加入能量限制防止负功率的产生,实验结果验证了该方法能够有效区分具有旋转的建筑物。Zhang等人^[43]结合基于模型的目标分解方法和特征值分解的方法,对Freeman三成分分解方法体散射过估计问题也进行了改进,该目标分解方法将两个较大的特征值作为表面散射和二次散射模型,并不需要假设反射对称条件,同时由于散射能量的计算是一个线性组合问题,因此其具有旋转不变特性,由于加入了散射能量约束使得其解决了负功率问题。车美琴等人^[44]提出一种利用目标散射矢量模型(TSVM)生成的选择不变极化参数组合提取城市区域建筑、道路、桥梁等典型人造目标的方法,该方法利用目标散射矢量模型分解和Relief特征选择算法提取出描述对称性的旋转不变极化参数和描述散射机制的散射角旋转不变极化参数,然后将得到的特征进一步利用。结果证明,该方法的检测精度比利用生物物理组合指数(BCI)方法提升了10%以上。范庆辉等人^[45]通过引入极化相似度量,在数据驱动基础上自适应地对基本散射机制的最优匹配模型进行选择,以各阶次剩余矩阵能量非负为约束,根据极化相似度量来决定基本散射机制散射能量提取的顺序,极大地改善了体散射能量过估计的问题。殷君君等人^[46]对Lee提出的3个问题都进行了分析,提出了一种改进的四成分分解方法,先通过极化指向角进行提取,利用极化指向角减小随机取向对各

散射分量的影响, 进而通过构建新的体散射模型对目标进行四成分分解, 能够有效提高地物的分类结果。

4 结束语

极化 SAR 技术利用获取到的全极化信息来分析目标的物质组成、几何结构等特性, 它的出现大大拓宽了 SAR 的应用领域。目前, 各国对极化 SAR 系统的发展都投入了大量的人力和物力, 获取到的遥感图像数据也越来越多, 如何快速有效地对极化 SAR 图像进行解译是一个重要的研究方向。目标分解技术作为极化 SAR 图像解译的基本手段, 后续的分类和目标检测都是以分解结果作为输入, 对其进行研究有很大的必要性。但是从实际应用的角度出发, 尚存在一些问题, 而对这些问题的解决则代表了这一领域的发展趋势^[47]。

不论是相干目标分解和非相干目标分解, 都或多或少存在问题, 只能在一定条件下适用。由于相干目标分解只能描述纯目标, 这使得关于它的发展并不是很多, 但是随着高分辨率极化 SAR 系统的应用, 图像中同一分辨单元内不同散射体个数会明显减少, 使得在低分辨率极化 SAR 图像中表现为分布式目标的散射体有可能在高分辨率极化 SAR 图像中表现为纯目标, 此时若继续采用基于统计平均的非相干目标分解来进行特征提取有可能导致目标细节信息的丢失。故随着极化 SAR 图像分辨率的提升, 为了更加准确地从高分辨率极化 SAR 图像中提取特征, 对相干目标分解的深入研究有着重要意义。对于分布式目标, 可以用非相干目标分解来描述其特性。近年来, 大量的非相干目标分解方法涌现出来, 它们大都是针对 Cloude 特征值分解和 Freeman 分解存在的问题进行改进, 这些方法取得了一定的效果, 尤其是在人造目标区域得到了较多应用。然而, 对极化方位角偏移、散射类型复杂多样以及弱后向散射地物区分困难等问题仍然很难处理, 如何解决这些问题, 找到一种快速而有效的目标分解方法, 将是未来工作的重点。

目前, 目标分解技术对极化 SAR 数据中的信息挖掘还不够充分, 特别是针对多频段数据的研究较少。多频段极化 SAR 系统中测量数据包含了丰富的信息, 针对同一目标, 在不同频段极化 SAR 图像中表现出不同的散射行为, 而且目标的纹理等几何特征也与雷达波长有关^[48]。而不同目标在不同波段的散射行为也是不同的。因此, 针对多频段极化 SAR 数据的目标分解可以提取出更多有用的极化信息, 具有研究价值。现有的目标分解多是针对单波段进

行研究, 如何建立一种能够描述多个频段的散射模型将是未来发展的方向之一。此外, 利用极化干涉 SAR 数据不仅能够获得目标物理几何特性, 还能够获得目标高程信息, 而提取特征的准确度直接影响了对目标高度的估计结果。随着极化干涉 SAR 的发展, 利用目标分解技术对其数据进行特征提取也备受关注。Ballester-Berman 和 Lpoez-Sanchez^[49]首先将 Freeman 三分量分解引入到极化干涉 SAR 中, 随后的 Minh 等人^[50]都对此问题进行了有意义的尝试, 提出了一些基于极化目标分解进行目标高程信息提取的方法。因此适用于极化干涉 SAR 图像的目标分解方法也是未来的发展需求。

参考文献

- [1] 王振力, 钟海. 国外先进星载 SAR 卫星的发展现状及应用[J]. 国防科技, 2016, 37(1): 19-24. doi: 10.13943/j.issn1671-4547.2016.01.06.
WANG Zhenli and ZHONG Hai. The nowadays development and application of oversea advanced space borne SARs[J]. *National Defense Science & Technology*, 2016, 37(1): 19-24. doi: 10.13943/j.issn1671-4547.2016.01.06.
- [2] CHEN F, LASAPONARA R, and MASINI N. An overview of satellite synthetic aperture radar remote sensing in archaeology: From site detection to monitoring[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2015, 2015: 1-7. doi: 10.1016/j.culher.2015.05.003.
- [3] YANG J, YAMAGUCHI Y, LEE J S, et al. Applications of polarimetric SAR[J]. *Journal of Sensors*, 2015, 2015: 1-2. doi: 10.1155/2015/316391.
- [4] 陈曦, 吴涛, 陶利, 等. 极化 SAR 发展需求及其目标识别关键技术[J]. 科技视界, 2015, (16): 21-22.
CHEN Xi, WU Tao, TAO Li, et al. Development needs of polarimetric SAR and key technology of target recognition[J]. *Science & Technology Vision*, 2015, (16): 21-22.
- [5] JAWAK S D, BIDAWE T G, and LUIS A J. A review on applications of imaging synthetic aperture radar with a special focus on cryospheric studies[J]. *Advances in Remote Sensing*, 2015, 4(2): 163-175. doi: 10.4236/ars.2015.42014.
- [6] KROGAGER E. Aspects of polarimetric radar imaging[D]. [Ph.D. dissertation], TUD, Lyngby, Denmark, 1993.
- [7] KROGAGER E and CZYZ Z H. Properties of the sphere, diplane, helix decomposition[C]. Proceedings of JIPR'95, Nantes, France, 1995: 106-114.
- [8] CAMERON W L and LEUNG L K. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition[C]. IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, 1990: 549-557.
- [9] CAMERON W L, YOUSSEF N N, and LEUNG L K. Simulated polarimetric signatures of primitive geometrical shapes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(3): 793-803.

- [10] TOUZI R. Characterization of target symmetric scattering using polarimetric SARs[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(11): 2507–2516.
- [11] TOUZI R. Target scattering decomposition of one-look and multi-look SAR data using a new coherent scattering model: The TSVM[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Alaska, USA, 2004: 2491–2494.
- [12] CLOUDE S R and POTTIER E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 498–518.
- [13] PALADINI R, MARTORELLA M, and BERIZZI F. Classification of man-made targets via invariant coherency-matrix eigenvector decomposition of polarimetric SAR/ISAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(8): 3022–3034. doi: 10.1109/TGRS.2011.2116121.
- [14] PALADINI R, FERRO F L, POTTIER E, *et al.* Lossless and sufficient-invariant decomposition of random reciprocal target[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(9): 3487–3501. doi: 10.1109/TGRS.2011.2181397.
- [15] FREEMAN A. Calibration of linearly polarized polarimetric SAR data subject to faraday rotation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(8): 1617–1624. doi: 10.1109/TGRS.2004.830161.
- [16] ZOU B, LU D, ZHANG L, *et al.* Eigen-decomposition-based four-component decomposition for PolSAR data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(3): 1286–1296. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2513161.
- [17] HUYNEN J R. Phenomenological theory of radar targets[D]. [Ph.D. dissertation], University of Technology, 1970.
- [18] VAN ZYL J J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(1): 36–45.
- [19] DONG Y, FROSTER B C, and TICEHURST C. A new decomposition of radar polarization signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(3): 933–939.
- [20] 王之禹, 朱敏惠, 白有天. 基于散射模型的极化 SAR 数据分解[J]. *电子与信息学报*, 2001, 23(10): 954–961.
WANG Zhiyu, ZHU Minhui, and BAI Youtian. Decomposition of Polarimetric SAR data model[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2001, 23(10): 954–961.
- [21] CLOUDE S R and POTTIER E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 68–78.
- [22] AN W, CUI Y, YANG J, *et al.* Fast alternatives to H/alpha for polarimetric SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2010, 7(2): 343–347. doi: 10.1109/LGRS.2009.2035135.
- [23] HOLM W A and BAMES R M. On radar polarization mixed target state decomposition techniques[C]. *Proceedings of the IEEE National Radar Conference*, Dallas, Texas, USA, 1988: 249–254.
- [24] VAN ZYL J J. Application of Cloude's target decomposition theorem to polarimetric imaging radar data[C]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, San Diego, CA, USA, 1993: 184–191.
- [25] AINSWORTH T L, CLOUDE S R, and LEE J S. Eigenvector analysis of polarimetric SAR data[C]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, Canada, 2002, Vol.1: 626–628.
- [26] FREEMAN A and DURDEN S. A Three-component scattering model to describe polarimetric SAR data[C]. *Proceedings SPZE Conference on Radar Polarimetry*, San Diego, CA, USA, 1993: 213–224.
- [27] MORIYAMA T, URATSUKA S, UMEHARA T, *et al.* Polarimetric SAR image analysis using model fit for urban structures[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2005, 88(3): 1234–1243.
- [28] YAMAGUCHI Y, MORIYAMA T, ISHIDO M, *et al.* Four-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(8): 1699–1706. doi: 10.1109/TGRS.2005.852084.
- [29] ZHANG L, ZOU B, CAI H, *et al.* Multiple-component scattering model for polarimetric SAR image decomposition [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(4): 603–607. doi: 10.1109/LGRS.2008.2000795.
- [30] LEE J S, AINSWORTH T L, and WANG Y. Recent advances in scattering model-based decompositions: An overview[C]. *IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium (IGARSS'11)*, Vancouver, BC, Canada, 2011: 9–12.
- [31] ANTROPOV O, RAUSTE Y, and HAME T. Volume scattering modeling in PolSAR decompositions: Study of ALOS PALSAR data over boreal forest[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(10): 3838–3848. doi: 10.1109/TGRS.2011.2138146.
- [32] ARII M, VAN ZYL J J, and KIM Y. Adaptive model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(3): 1104–1113. doi: 10.1109/TGRS.2010.2076285.
- [33] VAN ZYL J J, ARII M, and KIM Y. Model-based decomposition of polarimetric SAR covariance matrices constrained for nonnegative eigenvalues[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3452–3459. doi: 10.1109/TGRS.2011.2128325.
- [34] 刘高峰, 李明, 王亚军, 等. 基于层次非负特征值约束的

- Yamaguchi 分解[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(11): 2678-2685. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01381.
- LIU Gaofeng, LI Ming, WANG Yajun, *et al.* Yamaguchi decomposition based on hierarchical nonnegative eigenvalue restriction[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2013, 35(11): 2678-2685. doi: 10.3724/SP.J.1146.2012.01381.
- [35] WANG C, YU W, WANG R, *et al.* Comparison of nonnegative eigenvalue decompositions with and without reflection symmetry assumptions[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(4): 2278-2287. doi: 10.1109/TGRS.2013.2259177.
- [36] 蔡永俊, 张祥坤, 姜景山. 极化 SAR 自适应三分量分解方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1089-1095. doi: 10.11947/j.AGCS.2016.20150533.
- CAI Yongjun, ZHANG Xiangkun, and JIANG Jingshan. Adaptive three-component decomposition approach for polarimetric SAR data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9): 1089-1095. doi: 10.11947/j.AGCS.2016.20150533.
- [37] AN W, CUI Y, and YANG J. Three-component model-based decomposition for polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(6): 2732-2739. doi: 10.1109/TGRS.2010.2041242.
- [38] YAMAGUCHI Y, SATO A, BOERNER W M, *et al.* Four-component scattering power decomposition with rotation of coherency matrix[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(6): 2251-2258.
- [39] SUGIMOTO M, OUCHI K, and NAKAMURA Y. Four-component scattering power decomposition algorithm with rotation of covariance matrix using ALOS-PALSAR polarimetric data[J]. *Remote Sensing*, 2012, 4(8): 2199-2209. doi: 10.3390/rs4082199.
- [40] CHEN S W, WANG X S, XIAO S P, *et al.* General polarimetric model-based decomposition for coherency matrix[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(3): 1843-1855.
- [41] BHATTACHARYA A, MUHURI A, DE S, *et al.* Modifying the yamaguchi four-component decomposition scattering powers using a stochastic distance[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations & Remote Sensing*, 2015, 8(7): 3497-3506. doi: 10.1109/JSTARS.2015.2420683.
- [42] 闫丽丽, 张继贤, 高井祥, 等. 一种适合方位建筑物的基于物理散射模型的极化 SAR 影像四分量分解方法[J]. 电子学报, 2015, 43(1): 203-208. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.01.032.
- YAN Lili, ZHANG Jixian, GAO Jingxiang, *et al.* Four-Component model-based decomposition of Polarimetric SAR data for oriented urban buildings[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(1): 203-208. doi: 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.01.032.
- [43] SHUANG Z, SHUANG W, LI-CHENG R, *et al.* A novel hybrid Freeman/eigenvalue decomposition with general scattering models[J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2015, 34(3): 265-270. doi: 10.11972/j.issn.1001-9014.2015.03.002.
- [44] 车美琴, 阿里木·赛买提, 杜培军, 等. 利用旋转不变特征提取全极化 SAR 影像人工地物[J]. 遥感学报, 2016, 20(2): 303-314. doi: 10.11834/jrs.20165098.
- CHE Meiqin, SAMAT A, DU Peijun, *et al.* Urban man-made target extraction from Quad-PolSAR imagery with roll-invariant parameters[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(2): 303-314. doi: 10.11834/jrs.20165098.
- [45] 范庆辉, 卢红喜, 保铮, 等. 基于半正定约束的极化相似度最优模型匹配目标分解[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(8): 1821-1827. doi: 10.11999/JEIT141468.
- FAN Qinghui, LU Hongxi, BAO Zheng, *et al.* Positive-semidefinite based target decomposition using optimal model-matching with polarization similarity[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(8): 1821-1827. doi: 10.11999/JEIT141468.
- [46] 殷君君, 安文韬, 杨健, 等. 一种改进的极化 SAR 图像四成分分解方法[J]. 信息与电子工程, 2011, 9(2): 127-132.
- YIN Junjun, AN Wentao, YANG Jian, *et al.* A modified four-component model-based scattering decomposition method of polarimetric SAR images[J]. *Information & Electronic Engineering*, 2011, 9(2): 127-132.
- [47] 李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 229-240. doi: 10.11999/JEIT151116.
- LI Chunsheng, WANG Weijie, WANG Pengbo, *et al.* Current situation and development trends of spaceborne SAR technology[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 229-240. doi: 10.11999/JEIT151116.
- [48] BOERNER W M. The development of multi-band equatorial orbiting POLSAR satellite sensors[C]. IEEE International Conference on Aerospace Electronics & Remotes Sensing Technology, Yogyakarta, Indonesia, 2014: 127-131.
- [49] BALLESTER-BERMAN J D and LOPEZ-SANCHEZ J M. Applying the Freeman-Durden decomposition concept to polarimetric SAR interferometry[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(1): 466-479. doi: 10.1109/TGRS.2009.2024304.
- [50] MINH N P, ZOU B, CAI H, *et al.* Forest height estimation from mountain forest areas using general model-based decomposition for PolInSAR image[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8(1): 083676, doi: 10.1117/1.JRS.8.083676.
- 张腊梅: 女, 1980年生, 副教授, 博士生导师, 研究方向为极化 SAR 图像信息提取.
- 段宝龙: 男, 1992年生, 硕士生, 研究方向为极化 SAR 图像处理.
- 邹斌: 男, 1968年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为遥感图像处理.