

极化SAR目标散射旋转域解译理论与应用

陈思伟* 李永祯 王雪松 肖顺平

(国防科技大学电子科学与工程学院电子信息系复杂电磁环境效应国家重点实验室 长沙 410073)

摘 要: 雷达目标的后向散射敏感于目标姿态与雷达视线的相对几何关系。雷达目标的这种散射多样性给以极化合成孔径雷达(SAR)为代表的成像雷达信息处理与应用造成诸多不便,是当前目标散射机理精细解译和定量应用面临的主要技术瓶颈之一。该文回顾并介绍一种在绕雷达视线旋转域解译目标散射机理的新思路,主要包括新近提出的统一的极化矩阵旋转理论和极化相干特征旋转域可视化解译理论。目标散射旋转域解译方法的核心思想是将特定几何关系下获得的目标信息拓展到绕雷达视线的旋转域,为目标散射信息深度挖掘和利用奠定基础。该文详细分析上述方法导出的一系列新的极化特征参数集,并开展应用验证。对比研究证实了旋转域解译方法在地物辨识与分类等领域的应用潜力。

关键词: 极化合成孔径雷达; 散射机理; 旋转域; 极化目标分解; 图像解译

中图分类号: TN957.52

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2017)05-0442-14

DOI: 10.12000/JR17033

引用格式: 陈思伟,李永祯,王雪松,等.极化SAR目标散射旋转域解译理论与应用[J].雷达学报,2017,6(5):442-455. DOI: 10.12000/JR17033.

Reference format: Chen Siwei, Li Yongzhen, Wang Xuesong, *et al.*. Polarimetric SAR target scattering interpretation in rotation domain: theory and application[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(5): 442-455. DOI: 10.12000/JR17033.

Polarimetric SAR Target Scattering Interpretation in Rotation Domain: Theory and Application

Chen Siwei Li Yongzhen Wang Xuesong Xiao Shunping

(The State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, School of Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Backscattering of radar targets is sensitive to the relative geometry between target orientations and the radar line of sight. This scattering diversity makes imaging radar represented by polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR) information processing and applications very difficult. This situation has become one of the main bottlenecks in the interpretation of the target scattering mechanism and quantitative applications. In this work, we review and introduce a new interpretation of the target scattering mechanism in the rotation domain along the radar line of sight. This concept includes the recently established uniform polarimetric matrix rotation theory and polarimetric coherence pattern visualization and interpretation in the rotation domain. The core idea of target scattering interpretation in the rotation domain is to extend the amount of target information acquired at a given geometry to the rotation domain, which then provides fundamentals for the deep mining and utilization of target scattering information. This work mainly focuses on the investigation of derived new polarimetric feature sets and application demonstrations. Comparison study results validate the promising potential for the application of the established interpretation framework in the rotation domain with respect to target discrimination and classification.

收稿日期: 2017-03-28; 改回日期: 2017-06-28; 网络出版: 2017-07-31

*通信作者: 陈思伟 chenswnudt@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(41301490, 61490690, 61490692)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (41301490, 61490690, 61490692)

Key words: Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR); Scattering mechanism; Rotation domain; Polarimetric target decomposition; Image interpretation

1 引言

极化SAR作为一种微波成像雷达,能够全天候、全天候工作,成为对地观测领域的重要传感器,在城区、森林、农作物、海洋、冰川和自然灾害等应用领域发挥着日益重要的作用^[1-12]。不同于光学图像,极化SAR图像难以仅仅通过目视解译进行有效利用,如何准确解译目标的散射机理是上述应用获得成功的关键之一。

极化SAR通过收发一组极化状态正交的电磁波,能够获得目标完整的极化散射矩阵。极化散射矩阵中蕴含的目标丰富散射信息,可通过散射机理建模和解译进行挖掘和提取^[13-16]。在过去几十年里,研究人员致力于目标电磁散射的建模与解译,提出了许多有效的理论和技术。起源于Huynen博士上世纪70年代工作^[17]的极化目标分解理论,能够有效刻画目标的物理散射机制,在诸多领域获得成功应用。极化目标分解可以分为相干分解和非相干分解两大类。考虑到相干斑的影响,基于极化相干矩阵和极化协方差矩阵等二阶统计量的非相干分解方法更为常用。非相干分解主要包含基于特征值-特征矢量的目标分解方法和基于模型的目标分解方法。基于特征值-特征矢量的目标分解方法以矩阵特征值分解作为其数学基础,分解结果具有唯一性,发展相对成熟^[18-20]。由于能够得到具有更清晰物理意义的分解结果,基于模型的目标分解方法在近年受到了更多的关注^[21]。在Freeman-Durden分解方法基础上,基于模型的目标分解方法取得了一系列重要进展,包括引入方位补偿技术(也称为去取向处理)^[22-24]、非负特征值约束^[25]、精细化体散射模型^[26,27]、精细化奇次和二次散射模型^[28]、同时全参数反演技术^[28]、“极化+干涉”分解技术^[29,30]等。该领域的其它相关研究进展还可参见文献^[31-36]。此外,文献^[37]和^[21,38]分别对极化目标分解理论的早期和最新进展进行了综述。

雷达目标的后向散射敏感于目标姿态与雷达视线的相对几何关系(本文称这一现象为散射多样性)。对同一目标(例如建筑物),当相对于雷达视线的姿态不同时,其散射特性可以是显著不同的。这种现象给成像雷达目标信息处理与应用造成诸多不便,是当前雷达目标散射机理精细解译和定量应用面临的主要技术瓶颈之一^[21]。此外,倾斜地表和倾斜建筑物等目标都可能扭转后向散射回波的极化基,进而产生较大的交叉极化能量。方位向补偿处

理通过使目标交叉极化分量最小,能够提升基于模型的目标分解方法的解译性能,改善对倾斜建筑物的解译模糊。然而,对目标极化方位角的估计值实质是所有散射分量的混合值。这种处理并不能始终确保二次散射和奇次散射分量被旋转回零方位角状态,从而使其交叉极化分量为零。正如文献^[39]指出,结合方位向补偿处理的传统基于模型的目标分解方法仍然难以有效解译极化方位角超过 $\pi/8$ 的倾斜建筑物,解译模糊依然严重。因此,只有更充分地考虑散射体在雷达视线方向上的散射多样性,通过构建精细化散射模型,自动适配诸如具有不同取向的倾斜地表和倾斜建筑物等目标产生的交叉极化分量,才有望更好地克服解译模糊^[28]。

另一方面,雷达目标的散射多样性中也蕴含了目标的丰富信息。对雷达目标的散射多样性进行有效挖掘和利用,能够给目标散射机理解译与应用带来新的研究思路。因此,研究团队另辟蹊径,在绕雷达视线方向,提出了极化旋转域的概念,将特定几何关系下获得的目标极化矩阵拓展到绕雷达视线的旋转域,并建立了极化矩阵在旋转域的解析表达式,进而导出了一系列全新的具有明确物理意义的极化振荡参数集和极化角参数集,为目标信息深度挖掘利用奠定基础^[40]。在此基础上,提出了统一的极化矩阵旋转理论^[40]和极化相干特征旋转域可视化解译理论^[41,42],初步建立了在旋转域解译目标散射机理的理论框架,为雷达目标散射机理解译提供了新方法,并在人造目标增强与检测^[43]、地物辨识与分类^[44]、灾害评估^[8]等领域获得成功应用。同时,经典的极化方位角理论^[45]和去取向理论^[22]也可统一到该理论框架。本文回顾和介绍目标散射旋转域解译的理论和方法,分析导出的极化参数集,并开展应用验证。

2 统一的极化矩阵旋转理论及应用

2.1 极化矩阵旋转处理

在水平和垂直极化基(H, V)下,极化SAR获取的目标全极化信息可以由极化散射矩阵表征:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, S_{VH} 是水平极化发射,垂直极化接收的后向散射系数。其它项类似定义。

将极化散射矩阵沿雷达视线进行旋转,就可以得到旋转域中的极化散射矩阵为:

$$\mathbf{S}(\theta) = \mathbf{R}_2(\theta) \mathbf{S} \mathbf{R}_2^T(\theta) \quad (2)$$

其中, θ 为旋转角, $\theta \in [-\pi, \pi)$ 。旋转矩阵为 $\mathbf{R}_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$, 上标 T 为转置。

满足互易性条件 ($S_{HV} \approx S_{VH}$) 时, 极化相干矩阵为:

$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{k}_P \mathbf{k}_P^H \rangle = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\langle \rangle$ 是集合平均处理。 $\mathbf{k}_P = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T$ 为 Pauli 散射矢量, \mathbf{k}_P^H 是 \mathbf{k}_P 的共轭转置。 T_{ij} 是 \mathbf{T} 的 (i, j) 元素。

将极化相干矩阵拓展到旋转域, 可得:

$$\mathbf{T}(\theta) = \mathbf{R}_3(\theta) \mathbf{T} \mathbf{R}_3^H(\theta) \quad (4)$$

其中, 旋转矩阵为 $\mathbf{R}_3(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$, $\theta \in [-\pi, \pi)$ 。

2.2 旋转域统一表达式

本文以极化相干矩阵为例介绍统一的极化矩阵旋转理论^[40]。极化散射矩阵等其它表征形式的极化矩阵可以同理分析。旋转域中极化相干矩阵 $\mathbf{T}(\theta)$ 各元素分别为:

$$T_{11}(\theta) = T_{11} \quad (5)$$

$$T_{12}(\theta) = T_{12} \cos 2\theta + T_{13} \sin 2\theta \quad (6)$$

$$T_{13}(\theta) = -T_{12} \sin 2\theta + T_{13} \cos 2\theta \quad (7)$$

$$T_{23}(\theta) = \frac{1}{2} (T_{33} - T_{22}) \sin 4\theta + \text{Re}[T_{23}] \cdot \cos 4\theta + j \text{Im}[T_{23}] \quad (8)$$

$$T_{22}(\theta) = T_{22} \cos^2 2\theta + T_{33} \sin^2 2\theta + \text{Re}[T_{23}] \sin 4\theta \quad (9)$$

$$T_{33}(\theta) = T_{22} \sin^2 2\theta + T_{33} \cos^2 2\theta - \text{Re}[T_{23}] \sin 4\theta \quad (10)$$

极化相干矩阵副对角线元素的能量项与极化相干特征有关, 其表达式分别为:

$$|T_{12}(\theta)|^2 = |T_{12}|^2 \cos^2 2\theta + |T_{13}|^2 \sin^2 2\theta + \text{Re}[T_{12} T_{13}^*] \sin 4\theta \quad (11)$$

$$|T_{13}(\theta)|^2 = |T_{12}|^2 \sin^2 2\theta + |T_{13}|^2 \cos^2 2\theta - \text{Re}[T_{12} T_{13}^*] \sin 4\theta \quad (12)$$

$$|T_{23}(\theta)|^2 = \frac{1}{4} (T_{33} - T_{22})^2 \sin^2 4\theta + \text{Re}^2[T_{23}] \cos^2 4\theta + \frac{1}{2} (T_{33} - T_{22}) \text{Re}[T_{23}] \sin 8\theta + \text{Im}^2[T_{23}] \quad (13)$$

其中, $|\cdot|$ 为取绝对值处理, 上标 * 为取共轭处理, $\text{Re}[T_{ij}]$ 和 $\text{Im}[T_{ij}]$ 分别为 T_{ij} 的实部和虚部。

通过数学变换, 可以发现, $\mathbf{T}(\theta)$ 各元素均可统一地由一个正弦函数进行表征^[40]:

$$f(\theta) = A \sin[\omega(\theta + \theta_0)] + B \quad (14)$$

其中, A 是振荡幅度, B 是振荡中心, ω 是角频率, θ_0 是初始角参数。

这样, 旋转域中 $\mathbf{T}(\theta)$ 的每个元素均可由新导出的参数集 $\{A, B, \omega, \theta_0\}$ 进行完整刻画。这样, 就建立了极化相干矩阵在旋转域的统一表达式。极化相干矩阵在旋转域的主要机理效应表现为各元素的振荡起伏。因此, 新导出的参数集 $\{A, B, \omega, \theta_0\}$ 称为振荡参数。对极化相干矩阵的每一元素, 得到的振荡参数集 $\{A, B, \omega, \theta_0\}$ 总结于表 1。

2.3 振荡参数分析^[40]

在刻画极化相干矩阵的旋转效应方面, 振荡参数集蕴含了丰富的信息。本质上讲, 这些振荡参数直接与目标旋转域极化散射特性相联系, 具备表征地物散射特性的潜能。从表 1 可以看出, 极化相干矩阵的旋转变量可以分为 5 组: (1) $\text{Re}[T_{12}(\theta)]$ 和 $\text{Re}[T_{13}(\theta)]$; (2) $\text{Im}[T_{12}(\theta)]$ 和 $\text{Im}[T_{13}(\theta)]$; (3) $\text{Re}[T_{23}(\theta)]$, $T_{22}(\theta)$ 和 $T_{33}(\theta)$; (4) $|T_{12}(\theta)|^2$ 和 $|T_{13}(\theta)|^2$; (5) $|T_{23}(\theta)|^2$ 。同组内的元素, 得到的振荡参数集 $\{A, B, \omega, \theta_0\}$ 包含等价的信息或者振荡参数是相同的。进一步地, 还可以导出如下的参数依赖关系式:

$$\text{Re}[T_{12}(\theta)] = \text{Re}[T_{13}(\theta + \pi/4)] \quad (15)$$

$$\text{Im}[T_{12}(\theta)] = \text{Im}[T_{13}(\theta + \pi/4)] \quad (16)$$

$$T_{22}(\theta) = T_{33}(\theta + \pi/4),$$

$$T_{22}(\theta) = \text{Re}[T_{23}(\theta + \pi/8)] + B - T_{22} \quad (17)$$

$$|T_{12}(\theta)|^2 = |T_{13}(\theta + \pi/4)|^2 \quad (18)$$

其中, $B - T_{ij}$ 代表矩阵元素 $T_{ij}(\theta)$ 的振荡中心 B 。其它参数 $A - T_{ij}$, $\omega - T_{ij}$ 和 $\theta_0 - T_{ij}$ 可以类似定义。

在下面的分析中, 主要考察参数 $\text{Re}[T_{12}(\theta)]$, $\text{Im}[T_{12}(\theta)]$, $T_{22}(\theta)$, $|T_{12}(\theta)|^2$ 和 $|T_{23}(\theta)|^2$ 五项。

(a) 振荡幅度 A

从表 1 可以看出, 相互独立的振荡幅度参数为 4 个, 分别为 $A - \text{Re}[T_{12}]$, $A - \text{Im}[T_{12}]$, $A - T_{22}$ 和 $A - |T_{12}|^2$ 。振荡参数 $A - |T_{23}|^2$ 可以由 $A - T_{22}$ 导出:

$$A - |T_{23}|^2 = \frac{1}{4} (A - T_{22})^2 \quad (19)$$

将目标极化散射矩阵 \mathbf{S} 的元素代入 $A - T_{22}$, 可以发现 $A - T_{22}$ 十分敏感于地物散射对称性条件:

表 1 旋转域极化相干矩阵的振荡参数集^[40]

Tab. 1 Oscillation parameter set of polarimetric coherence matrix in rotation domain

元素项	$A = \sqrt{\cdot}$	B	ω	$\theta_0 = \frac{1}{\omega} \text{Angle}\{\cdot\}$
$\text{Re}[T_{12}(\theta)]$	$\text{Re}^2[T_{12}] + \text{Re}^2[T_{13}]$	0	2	$\text{Re}[T_{13}] + j \text{Re}[T_{12}]$
$\text{Re}[T_{13}(\theta)]$	$\text{Re}^2[T_{12}] + \text{Re}^2[T_{13}]$	0	2	$-\text{Re}[T_{12}] + j \text{Re}[T_{13}]$
$\text{Im}[T_{12}(\theta)]$	$\text{Im}^2[T_{12}] + \text{Im}^2[T_{13}]$	0	2	$\text{Im}[T_{13}] + j \text{Im}[T_{12}]$
$\text{Im}[T_{13}(\theta)]$	$\text{Im}^2[T_{12}] + \text{Im}^2[T_{13}]$	0	2	$-\text{Im}[T_{12}] + j \text{Im}[T_{13}]$
$\text{Re}[T_{23}(\theta)]$	$\frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 + \text{Re}^2[T_{23}]$	0	4	$\frac{1}{2}(T_{33} - T_{22}) + j \text{Re}[T_{23}]$
$T_{22}(\theta)$	$\frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 + \text{Re}^2[T_{23}]$	$\frac{1}{2}(T_{22} + T_{33})$	4	$\text{Re}[T_{23}] + j \frac{1}{2}(T_{22} - T_{33})$
$T_{33}(\theta)$	$\frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 + \text{Re}^2[T_{23}]$	$\frac{1}{2}(T_{22} + T_{33})$	4	$-\text{Re}[T_{23}] + j \frac{1}{2}(T_{33} - T_{22})$
$ T_{12}(\theta) ^2$	$\text{Re}^2[T_{12}T_{13}^*] + \frac{1}{4}(T_{13} ^2 - T_{12} ^2)^2$	$\frac{1}{2}(T_{12} ^2 + T_{13} ^2)$	4	$\text{Re}[T_{12}T_{13}^*] + j \frac{1}{2}(T_{12} ^2 - T_{13} ^2)$
$ T_{13}(\theta) ^2$	$\text{Re}^2[T_{12}T_{13}^*] + \frac{1}{4}(T_{13} ^2 - T_{12} ^2)^2$	$\frac{1}{2}(T_{12} ^2 + T_{13} ^2)$	4	$-\text{Re}[T_{12}T_{13}^*] + j \frac{1}{2}(T_{13} ^2 - T_{12} ^2)$
$ T_{23}(\theta) ^2$	$\frac{1}{4} \left\{ \frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 + \text{Re}^2[T_{23}] \right\}^2$	$\frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 + \text{Re}^2[T_{23}] \right\} + \text{Im}^2[T_{23}]$	8	$\frac{1}{2}(T_{33} - T_{22}) \text{Re}[T_{23}] + j \frac{1}{2} \left[\text{Re}^2[T_{23}] - \frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 \right]$

$$\begin{aligned}
A_{-T_{22}} &= \frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 + \text{Re}^2[T_{23}] \\
&= \frac{1}{4} \left(\left\langle |S_{\text{HH}} - S_{\text{VV}}|^2 - 4|S_{\text{HV}}|^2 \right\rangle \right)^2 \\
&\quad + 4 \left\{ \text{Re} \left[(S_{\text{HH}} - S_{\text{VV}}) S_{\text{HV}}^* \right] \right\}^2 \quad (20)
\end{aligned}$$

对诸如草地和农作物等匀质分布式自然地物, 散射对称性条件 $\langle S_{\text{HH}} S_{\text{HV}}^* \rangle \approx \langle S_{\text{VV}} S_{\text{HV}}^* \rangle \approx 0$ 通常是满足的, 这样 $A_{-T_{22}}$ 可以近似为:

$$A_{-T_{22}} \approx \frac{1}{4} \left(\left\langle |S_{\text{HH}} - S_{\text{VV}}|^2 - 4|S_{\text{HV}}|^2 \right\rangle \right)^2 \quad (21)$$

然而, 对房屋建筑物等人造目标, 一般不满足散射对称性条件。这样, $A_{-T_{22}}$ 中的第2项 $\left\{ \text{Re} \left[(S_{\text{HH}} - S_{\text{VV}}) S_{\text{HV}}^* \right] \right\}^2$ 的取值就相对较大, 不能忽略。因此, 振荡参数 $A_{-T_{22}}$ 在理论上就具备区分人造目标和自然目标的较好性能。

(b) 振荡中心 B

$\text{Re}[T_{12}(\theta)]$ 和 $\text{Im}[T_{12}(\theta)]$ 的取值从负值到正值对称变化, 因此其振荡中心 B 的取值均为0。其余的能量项 ($T_{22}(\theta)$, $|T_{12}(\theta)|^2$ 和 $|T_{23}(\theta)|^2$) 均具有取正值的振荡中心。根据表1, 可以得到另一个参数依赖关系式:

$$\begin{aligned}
B_{-|T_{12}|^2} &= \frac{1}{2} \left(|T_{12}|^2 + |T_{13}|^2 \right) \\
&= \frac{1}{2} (A_{-} \text{Re}[T_{12}] + A_{-} \text{Im}[T_{12}]) \quad (22)
\end{aligned}$$

这样, 相互独立且为变量的振荡中心参数为两个。

(c) 角频率 ω

对极化相干矩阵的所有元素, 角频率参数均为常数, 并有3种取值: $\omega_{-} \text{Re}[T_{12}] = \omega_{-} \text{Im}[T_{12}] = 2$,

$\omega_{-} T_{22} = \omega_{-} |T_{12}|^2 = 4$ 和 $\omega_{-} |T_{23}|^2 = 8$ 。这样, 对应的振荡周期 $2\pi/\omega$ 分别为 π , $\pi/2$ 和 $\pi/4$ 。由于角频率参数为常数, 因此独立于地物散射特性。

(d) 初始角 θ_0

根据表1, 相互独立的初始角参数 θ_0 有5个。极化通道内和极化通道间的相位信息通常更敏感于地物的散射机理。根据这些初始角参数, 接下来可导出几组典型的角参数集。

2.4 旋转域典型角参数及分析^[40]

在极化旋转域, 有几组有趣的旋转角参数。第1组是不动角参数 θ_{sta} 。当按 θ_{sta} 角旋转极化相干矩阵时, 对应的矩阵元素将保持不变。第2组是最小化和最大化角参数 θ_{min} 和 θ_{max} 。当按 θ_{min} (θ_{max}) 角旋转极化相干矩阵时, 对应的矩阵元素将实现最小化 (最大化)。第3组是零角参数 θ_{null} 。当按 θ_{null} 角旋转极化相干矩阵时, 对应的矩阵元素变为0。利用旋转域统一表达式, 所有这些角参数均可以方便地由初始角 θ_0 和角频率 ω 导出。结合正弦函数的周期性, 下面的分析均限定在主值区间 $[-\pi/\omega, \pi/\omega]$ 。

(a) 不动角参数 θ_{sta}

不动角参数 θ_{sta} 是能够使对应的矩阵元素在旋转前后保持不变的非零旋转角, 即 $f(\theta_{\text{sta}}) = f(0)$ 。得到不动角 θ_{sta} 为:

$$\theta_{\text{sta}} = \begin{cases} \pi/\omega - \theta_0, & \text{if } 0 \leq \theta_0 < \pi/\omega \\ -\pi/\omega - \theta_0, & \text{if } -\pi/\omega \leq \theta_0 < 0 \end{cases} \quad (23)$$

(b) 最小化和最大化角参数 θ_{min} 和 θ_{max}

最小化和最大化角能够使对应的矩阵元素在旋转域实现最小化和最大化, 即 $f(\theta_{\text{min}}) = -A + B$ 和

$f(\theta_{\max}) = A + B$ 。得到最小化角 θ_{\min} 为:

$$\theta_{\min} = \begin{cases} 3\pi/2\omega - \theta_0, & \text{if } \pi/2\omega \leq \theta_0 < \pi/\omega \\ -\pi/2\omega - \theta_0, & \text{if } -\pi/\omega \leq \theta_0 < \pi/2\omega \end{cases} \quad (24)$$

同时, 得到的最大化角 θ_{\max} 为:

$$\theta_{\max} = \begin{cases} \pi/2\omega - \theta_0, & \text{if } \pi/2\omega \leq \theta_0 < \pi/\omega \\ -3\pi/2\omega - \theta_0, & \text{if } -\pi/\omega \leq \theta_0 < \pi/2\omega \end{cases} \quad (25)$$

此外, 导出的最小化角 $\theta_{\min}-T_{33}$ 等价于极化方位角参数, 其表达式为:

$$\theta_{\min}-T_{33} = \frac{1}{4} \left(\tan^{-1} \frac{2 \operatorname{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} \pm n\pi \right), \quad n=0, 1 \quad (26)$$

利用去取向理论使交叉极化分量最小时, 可以导出一个角参数, 该角参数理论上就等价于极化方位角。这样, 从极化矩阵旋转的观点, 极化方位角理论和去取向理论均可统一到该极化矩阵旋转理论框架。

(c) 零角参数 θ_{null}

零角参数 θ_{null} 是可以使矩阵对应元素为0的旋转角, 即 $f(\theta_{\text{null}}) = 0$ 。由于所有能量项的振荡中心始终为 $B > 0$, 这样只有副对角线元素的实部和虚部项存在零角参数 θ_{null} , 为:

$$\theta_{\text{null}} = -\theta_0 \quad (27)$$

2.5 典型角参数性能对比分析

利用AIRSAR在荷兰Flevoland获得的L波段极化SAR数据验证导出的角参数在地物辨识方面的性能。该研究区域包含多种地物, 例如农作物、森林、道路、水域等。农作物区域主要包括茎豆、油菜、豌豆、土豆、紫苜蓿、小麦和甜菜等。极化SAR数据由新近提出的SimiTest方法^[46]进行相干斑滤波处理, 如图1(a)所示。部分农作物的真值图如图1(b)所示。

针对典型最小化角 $\theta_{\min}-T_{33}$ 、零角 $\theta_{\text{null}}-\operatorname{Re}[T_{12}]$ 和 $\theta_{\text{null}}-\operatorname{Im}[T_{12}]$ 参数开展性能对比分析。图2为导出的上述3种角参数。为了对比理解, 图2(a)为常

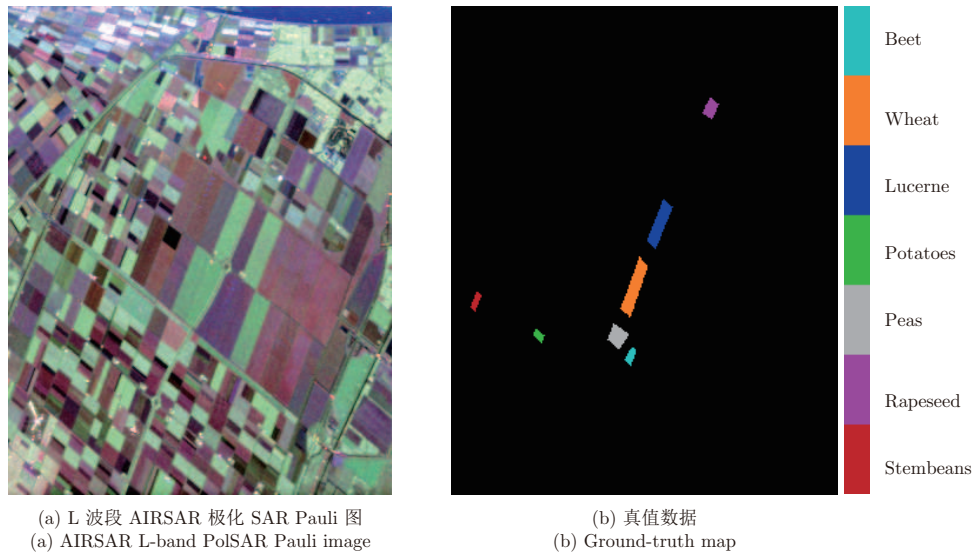


图 1 研究区域荷兰Flevoland

Fig. 1 Study area of Flevoland, the Netherlands

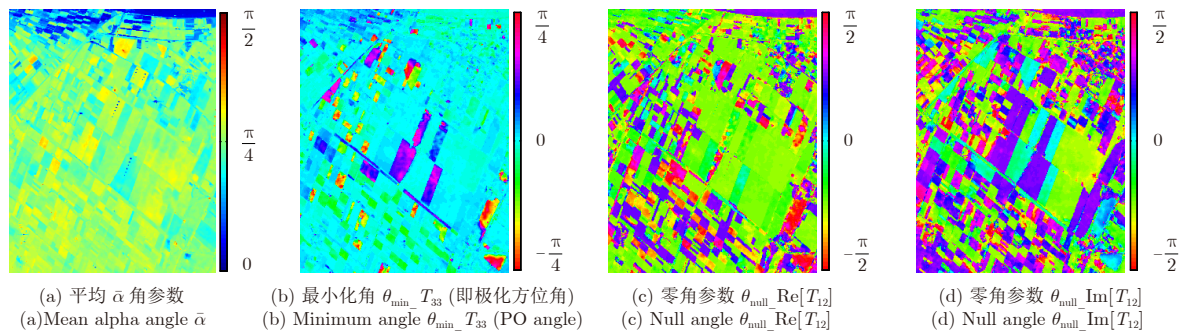


图 2 导出的极化角参数

Fig. 2 Derived polarimetric angle parameters

用的平均 α 角参数^[48]。对L波段数据，平均 α 角参数的取值主要集中在 $\pi/4$ 附近，表明此时体散射机理占主导。最小化角参数 $\theta_{\min}-T_{33}$ 与经典的极化方位角等价，能够反映散射体相对雷达视线的取向特性。对取向均匀的农作物区域，估计得到的极化方位角参数也是匀质的。此外，相比于平均 α 角参数和极化方位角参数，零角参数 $\theta_{\text{null}}-\text{Re}[T_{12}]$ 和 $\theta_{\text{null}}-\text{Im}[T_{12}]$ 能够更灵敏地体现不同地物的散射差异。这两个零角参数能够表征散射对称性条件($\langle (S_{\text{HH}} + S_{\text{VV}}) S_{\text{HV}}^* \rangle$)、共极化通道能量的相对大小($\langle |S_{\text{VV}}|^2 - |S_{\text{HH}}|^2 \rangle$)和共极化分量的相位差($\text{Im}[\langle S_{\text{HH}} S_{\text{VV}}^* \rangle]$)等关键信息，其取值具有明确的物理意义，并在地物分类等领域获得了成功应用^[40]。对导出的其它振荡参数的对比分析和应用验证可参见文献^[40,47]。

3 极化相干特征旋转域可视化解译理论与应用

3.1 极化相干特征旋转域解译与刻画

极化SAR不同极化通道间的极化相干特征是一种常用的极化特征量，已应用于目标检测与分类等领域^[48,49]。目前，对极化相干特征的有效利用仍存在两方面的局限。首先，极化相干特征十分敏感于目标的姿态。以建筑物为例，极化相干特征的取值严重依赖于建筑物取向与极化SAR飞行方向的相对关系。当二者平行时，极化相干特征取值趋近于1；当二者有较大夹角时，极化相干特征取值恶化，远低于1。这样，极化SAR对具有不同取向的建筑物的解译就会产生模糊。其次，对具有散射对称性的农作物等自然地物区域，极化相干特征的取值较小，趋近于0，难以获得实际应用。本节在统一的极化矩阵旋转理论基础下，发展一种极化相干特征旋转域解译与刻画方法。该方法的核心思想是将特定姿态下的极化相干特征拓展到极化旋转域，通过可视化处理和参数化刻画，完整地描述目标极化相干特征在旋转域中的特性，用于精细解译目标在绕雷达视线旋转域中的散射特性，进而用于物理参数反演和目标分类识别等。

对任意极化通道 s_X 和 s_Y ，传统的极化相干特征为：

$$|\gamma_{X-Y}| = \frac{|\langle s_X \cdot s_Y^* \rangle|}{\sqrt{\langle s_X \cdot s_X^* \rangle} \cdot \sqrt{\langle s_Y \cdot s_Y^* \rangle}} \quad (28)$$

将极化相干特征拓展到旋转域，可得：

$$|\gamma_{X-Y}(\theta)| = \frac{|\langle s_X(\theta) \cdot s_Y^*(\theta) \rangle|}{\sqrt{\langle s_X(\theta) \cdot s_X^*(\theta) \rangle} \cdot \sqrt{\langle s_Y(\theta) \cdot s_Y^*(\theta) \rangle}}, \quad \theta \in [-\pi, \pi] \quad (29)$$

将旋转域极化相干特征 $|\gamma_{X-Y}(\theta)|$ 按旋转角 θ 在

极坐标系中进行表征，即可得到旋转域中极化相干特征的可视化图，实现对极化相干特征的可视化表征。图3即为一个旋转域极化相干特征的可视化图示例。

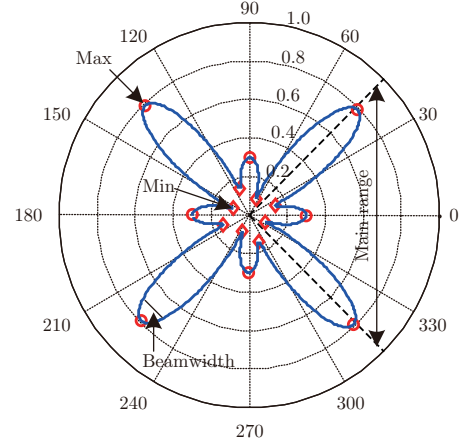


图3 旋转域极化相干特征的可视化图示例

Fig. 3 Illustration of polarimetric coherence pattern example

旋转域极化相干特征的可视化图能够完整表征雷达目标在绕雷达视线旋转域中的散射特性。基于该可视化解译工具，定义以下特征参数进行旋转域参数化刻画：

- (1) 原始极化相干特征值 $|\gamma_{X-Y}|$ ，为：

$$|\gamma_{X-Y}| = |\gamma_{X-Y}(0)| \quad (30)$$

- (2) 旋转域极化相干特征最大值 $|\gamma_{X-Y}|_{\max}$ ，为：

$$|\gamma_{X-Y}|_{\max} = \max \{ |\gamma_{X-Y}(\theta)| \} \quad (31)$$

- (3) 旋转域极化相干特征最小值 $|\gamma_{X-Y}|_{\min}$ ，为：

$$|\gamma_{X-Y}|_{\min} = \min \{ |\gamma_{X-Y}(\theta)| \} \quad (32)$$

- (4) 旋转域极化相干度 $|\gamma_{X-Y}|_{\text{mean}}$ ，为：

$$|\gamma_{X-Y}|_{\text{mean}} = \text{mean} \{ |\gamma_{X-Y}(\theta)| \} \quad (33)$$

- (5) 旋转域极化相干起伏度 $|\gamma_{X-Y}|_{\text{std}}$ ，为：

$$|\gamma_{X-Y}|_{\text{std}} = \text{std} \{ |\gamma_{X-Y}(\theta)| \} \quad (34)$$

- (6) 旋转域极化相干对比度 $|\gamma_{X-Y}|_{\max-\min}$ ，为：

$$|\gamma_{X-Y}|_{\max-\min} = |\gamma_{X-Y}|_{\max} - |\gamma_{X-Y}|_{\min} \quad (35)$$

- (7) 旋转域最大化旋转角 $\theta_{\gamma-\max}$ ，为：

$$\theta_{\gamma-\max} = \arg \max_{\theta \in [-\pi, \pi]} |\gamma_{X-Y}(\theta)| \quad (36)$$

- (8) 旋转域最小化旋转角 $\theta_{\gamma-\min}$ ，为：

$$\theta_{\gamma-\min} = \arg \min_{\theta \in [-\pi, \pi]} |\gamma_{X-Y}(\theta)| \quad (37)$$

- (9) 旋转域极化相干宽度 BW_α ，为：

$$\text{BW}_\alpha = \theta'' - \theta', \text{ 其中 } |\gamma_{X-Y}(\theta'')| = |\gamma_{X-Y}(\theta')| = \alpha \cdot |\gamma_{X-Y}|_{\max} \text{ 且 } \theta'' > \theta_{\gamma-\max} > \theta' \quad (38)$$

其中， $\max\{\cdot\}$ 为求最大值； $\min\{\cdot\}$ 为求最小值； $\text{mean}\{\cdot\}$ 为求均值； $\text{std}\{\cdot\}$ 为求标准差； α 为调节因子，通常取 $\alpha = 0.95$ 。

考虑水平和垂直极化基(H, V)，可以得到6个典型的极化相干特征： $|\gamma_{\text{HH-VV}}(\theta)|$ ， $|\gamma_{\text{HH-HV}}(\theta)|$ ， $|\gamma_{\text{VV-HV}}(\theta)|$ ， $|\gamma_{(\text{HH+VV})-(\text{HH-VV})}(\theta)|$ ， $|\gamma_{(\text{HH+VV})-(\text{HV})}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{(\text{HH-VV})-(\text{HV})}(\theta)|$ ，并可验证以下旋转域等价关系式^[43]：

$$\begin{aligned} |\gamma_{\text{HH-HV}}(\theta)| &= |\gamma_{\text{VV-HV}}(\theta + \pi/2)|, \\ |\gamma_{(\text{HH+VV})-(\text{HH-VV})}(\theta)| &= |\gamma_{(\text{HH+VV})-(\text{HV})}(\theta + \pi/4)| \end{aligned} \quad (39)$$

这样，独立的极化相干特征有4个： $|\gamma_{\text{HH-VV}}(\theta)|$ ， $|\gamma_{\text{HH-HV}}(\theta)|$ ， $|\gamma_{(\text{HH+VV})-(\text{HH-VV})}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{(\text{HH-VV})-(\text{HV})}(\theta)|$ 。下面针对这4个旋转域极化相干特征进行分析和应用验证。

3.2 农作物极化相干特征增强

不同极化通道间的极化相干特征是一种常用的极化特征参数。极化相干特征与目标的形状、类别和姿态等密切相关，获得广泛应用。然而，由于严重的去相干效应，大部分农作物等自然植被区域的极化相干特征取值趋近于0，在实际中难以获得有效使用。通过在旋转域中寻求目标与雷达视线间的最优几何关系，能够得到极化相干特征的最大值 $|\gamma_{X-Y}|_{\max}$ ，实现极化相干特征的最优增强。对图1所示AIRSAR数据进行分析，4种典型极化相干特征优化前后的对比结果如图4所示。极化相干特征旋转域优化前后的统计分布图如图5所示。对优化前后各极化相干特征均值的定量对比结果如表2所示。可以清楚地看到，通过旋转域优化处理能够显著增强地物不同极化通道间的极化相干特征。优化前，极化相干特征 $|\gamma_{(\text{HH+VV})-(\text{HH-VV})}|$ ， $|\gamma_{(\text{HH-VV})-(\text{HV})}|$ ，

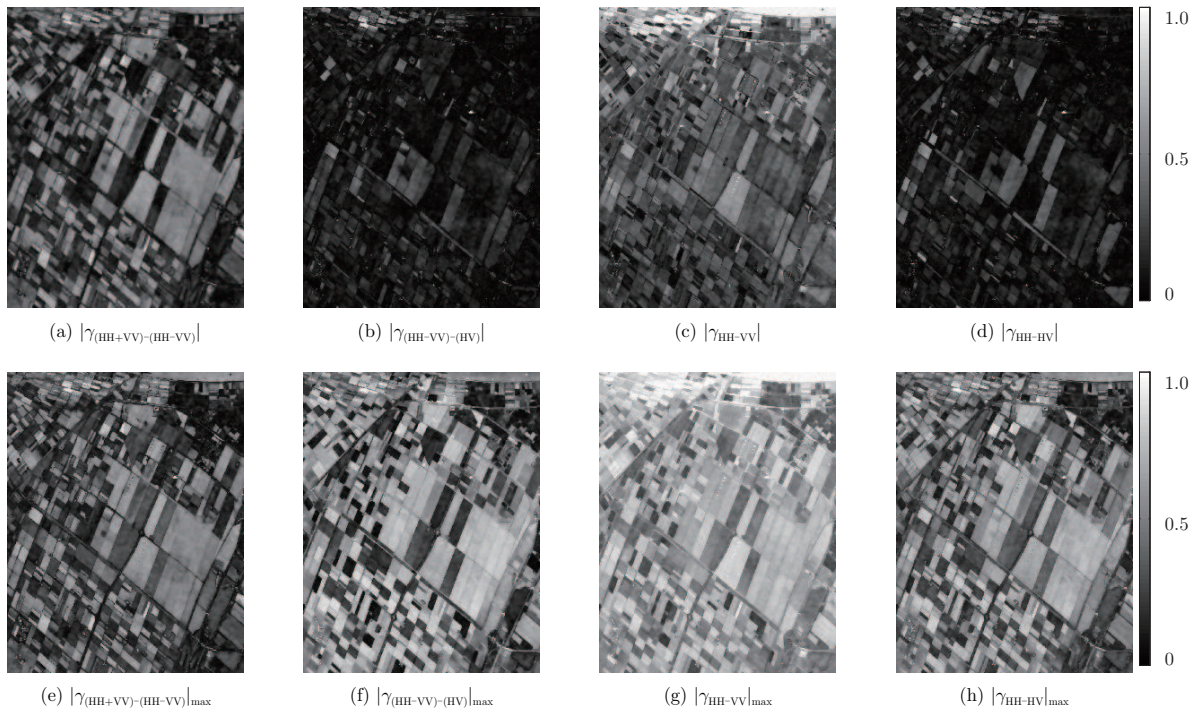


图 4 极化相干特征旋转域优化前后对比图

Fig. 4 Comparison of polarimetric coherence without and with optimization in rotation domain

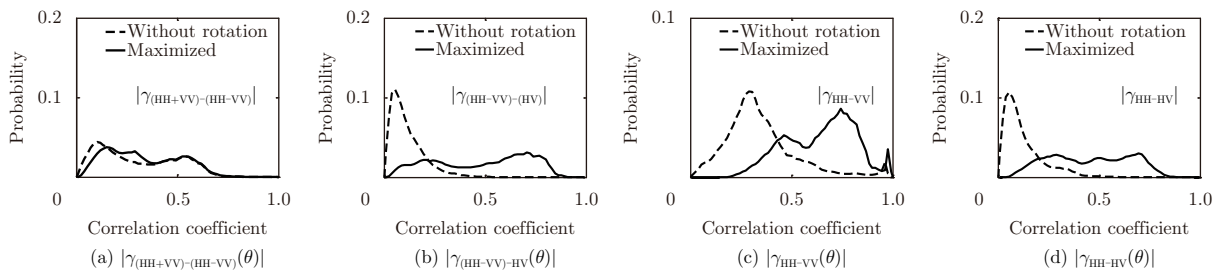


图 5 极化相干特征旋转域优化前后的统计分布图

Fig. 5 Histograms of polarimetric coherence for full scene AIRSAR data

表 2 AIRSAR数据极化相干特征旋转域优化前后对比结果

Tab. 2 Comparison of polarimetric coherence without and with optimization in rotation domain for AIRSAR data

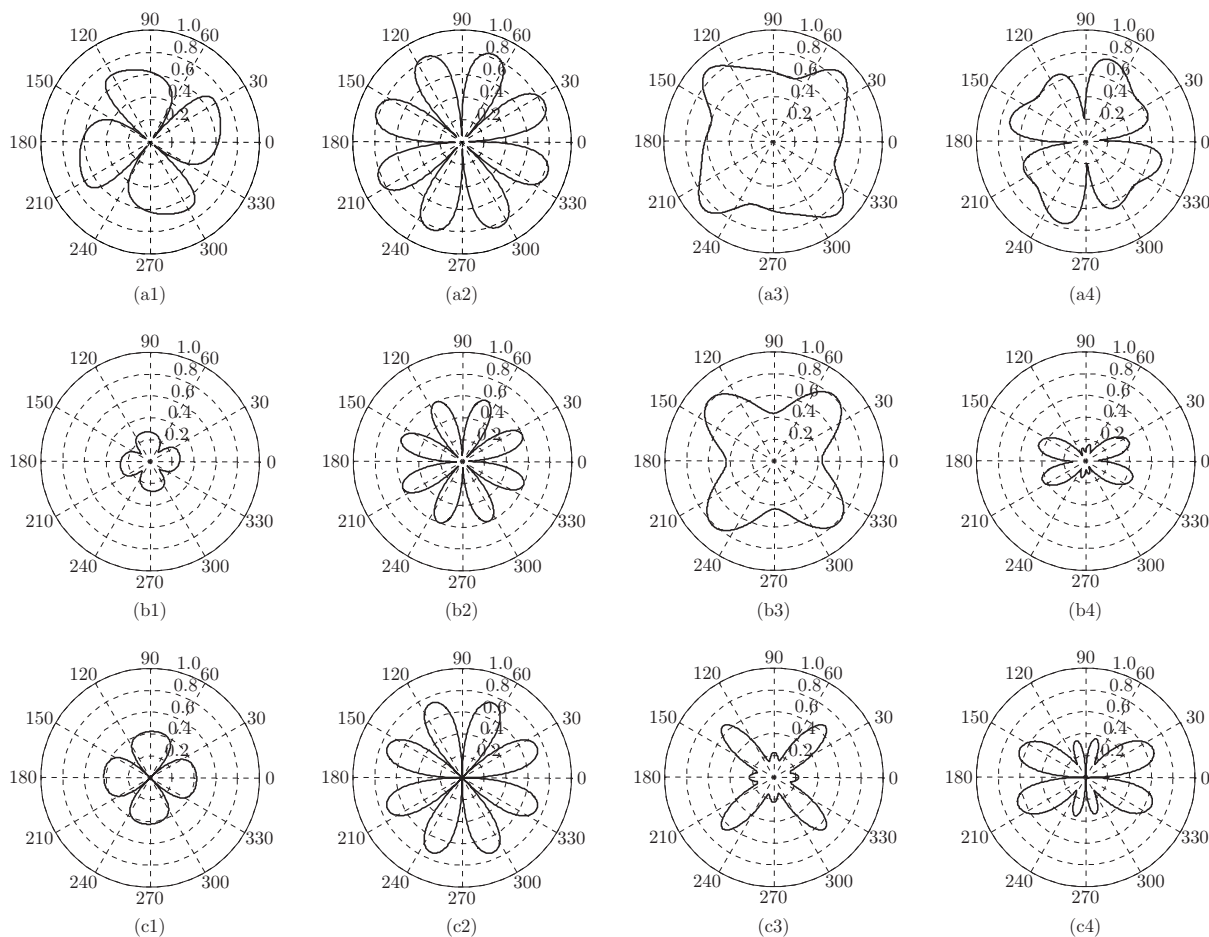
极化相干特征	原始值均值	最优值均值	增强百分比(%)
$ \gamma_{(HH+VV)-(HH-VV)}(\theta) $	0.30	0.33	10.00
$ \gamma_{(HH-VV)-HV}(\theta) $	0.11	0.48	336.36
$ \gamma_{HH-VV}(\theta) $	0.35	0.64	82.86
$ \gamma_{HH-HV}(\theta) $	0.13	0.45	246.15

$|\gamma_{HH-VV}|$ 和 $|\gamma_{HH-HV}|$ 的均值分别0.30, 0.11, 0.35和0.13。优化后, 上述4个极化相干特征的均值分别增强至0.33, 0.48, 0.64和0.45, 增强百分比分别达到10.00%, 336.36%, 82.86%和246.15%, 增强效果十分明显。同时, 对4种极化相干特征的平均增强百分比为168.84%。这样, 通过旋转域优化增强处理, 能够提升自然地物区域极化相干特征的利用率, 并在地物辨识与分类领域获得实际应用^[44]。此外, 旋转域优化增强的极化相干特征的最大值参数 $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}|_{\max}$ 能够有效增强包括倾斜建筑物在内的人造目标, 并成功应用于人造目标提取和震灾建筑物倒损率估计等领域, 详见文献^[43,8]。

3.3 农作物极化相干特征旋转域可视化解译与辨识

对图1中AIRSAR极化SAR数据中的7类已知农作物, 随机选择每类农作物的一个样本进行极化相干特征旋转域解译研究, 得到的可视化图如图6所示。可以看到, 尽管旋转域极化相干特征 $|\gamma_{(HH+VV)-(HH-VV)}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{(HH-VV)-HV}(\theta)|$ 的可视化图在整体上分别呈现为四叶型和八叶型, 但在旋转域可视化图的细节方面, 仍能体现出不同地物的差异性。以 $|\gamma_{(HH+VV)-(HH-VV)}(\theta)|$ 为例, 其中紫苜蓿和小麦的可视化图十分相似, 如图6(e1)和图6(f1)所示。尽管如此, 二者极化相干值的最大值和最小值对应的旋转角仍然是显著不同的, 可由导出的旋转域最大化旋转角 $\theta_{\gamma-\max}$ 和最小化旋转角 $\theta_{\gamma-\min}$ 进行刻画。旋转域极化相干特征 $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{HH-HV}(\theta)|$ 的可视化图没有固定形状, 对不同地物呈现出丰富的整体和细节差异, 为地物分类辨识奠定基础。此外, 对同一农作物, 不同极化相干特征在旋转域的特性是不同的。同时, 对同一极化相干特征, 不同农作物在旋转域中的特性也可能是不同的。对真值图图1(b)中不同农作物的其它样本像素进行分析, 可以得到与图6类似的结果。

针对真值图中的7类农作物, 对导出的旋转域



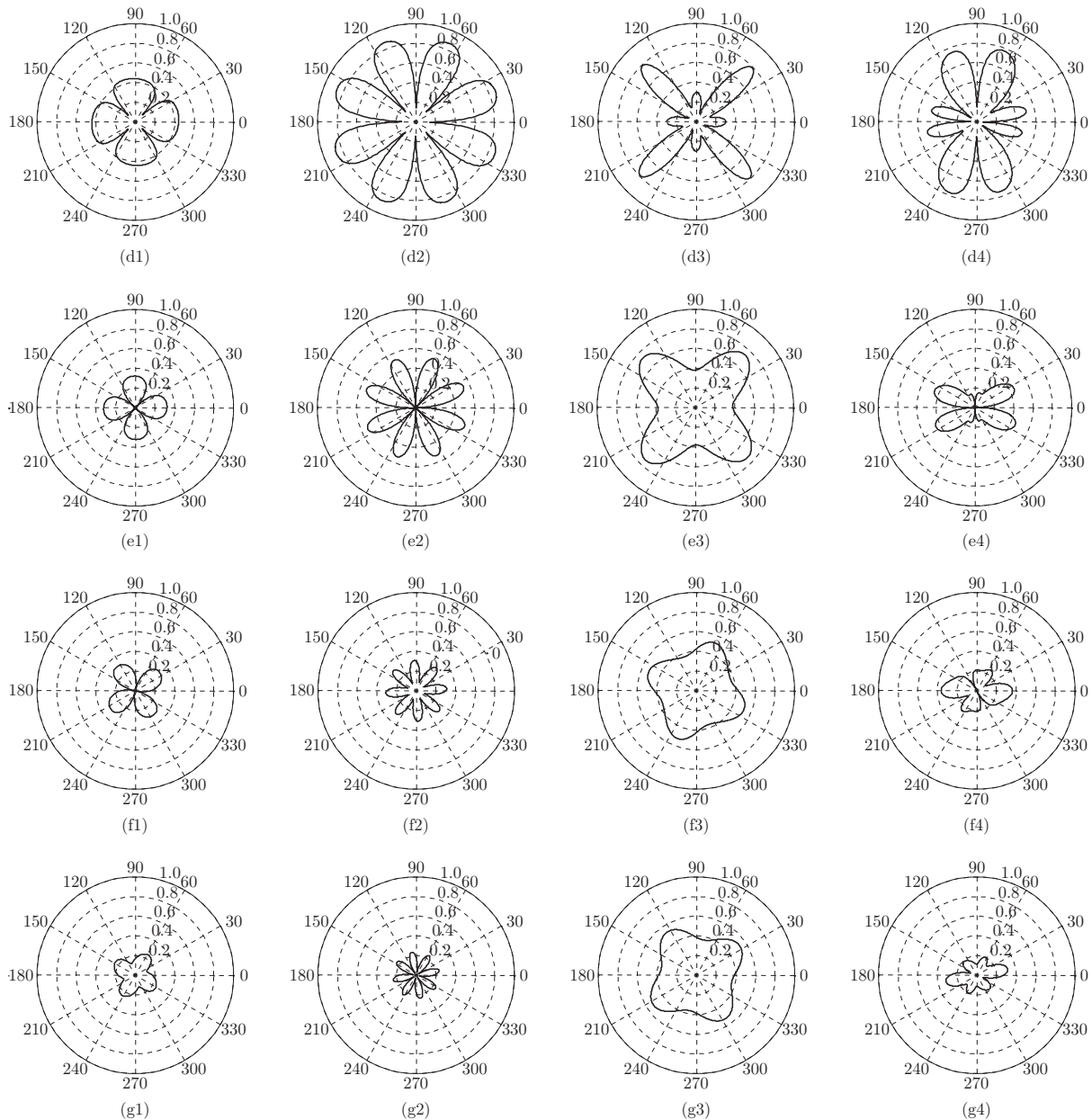


图 6 AIRSAR数据中7种已知地物的旋转域极化相干特征的可视化图。(a1)–(a4) 茎豆, (b1)–(b4) 油菜, (c1)–(c4)豌豆, (d1)–(d4)土豆, (e1)–(e4)紫苜蓿, (f1)–(f4)小麦, (g1)–(g4)甜菜。其中, 1–4分别代表 $|\gamma_{(HH+VV)-(HH-VV)}(\theta)|$, $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}(\theta)|$, $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{HH-HV}(\theta)|$

Fig. 6 Polarimetric coherence patterns of the seven crop types from AIRSAR data. (a1)–(a4)stembeans, (b1)–(b4)rapeseed, (c1)–(c4)peas, (d1)–(d4)potatoes, (e1)–(e4)lucerne, (f1)–(f4)wheat and (g1)–(g4)beet. The numbers 1–4 indicate $|\gamma_{(HH+VV)-(HH-VV)}(\theta)|$, $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}(\theta)|$, $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|$ and $|\gamma_{HH-HV}(\theta)|$, respectively

极化相干特征刻画参数进行了定量对比分析。各刻画参数对每类农作物的取值的均值和方差图如图7–图13所示。地物1–7分别为茎豆、油菜、豌豆、土豆、紫苜蓿、小麦和甜菜。从图中可以看到, 对同一类农作物, 各刻画参数的取值均在均值附近, 起伏较小。具体而言, 图7为原始极化相干特征值、旋转域极化相干特征最大值和最小值的对比图。可以看到, $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}(\theta)|$, $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{HH-HV}(\theta)|$ 的旋转域极化相干特征最大值显著增

强了原始极化相干特征值。图8为旋转域极化相干度对比图, 表征了在旋转域中各地物极化相干值均值的差异。其中, 地物1(茎豆)在4种极化相干特征中均呈现较高的极化相干度, 而地物7(甜菜)的极化相干度则较小。图9为旋转域极化相干起伏度对比图。对 $|\gamma_{(HH+VV)-(HH-VV)}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}(\theta)|$, 地物1(茎豆)的极化相干起伏度最大。对 $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|$ 和 $|\gamma_{HH-HV}(\theta)|$, 地物4(土豆)的极化相干起伏度最大。此外, 对4种极化相干特征, 地物7(甜菜)的极

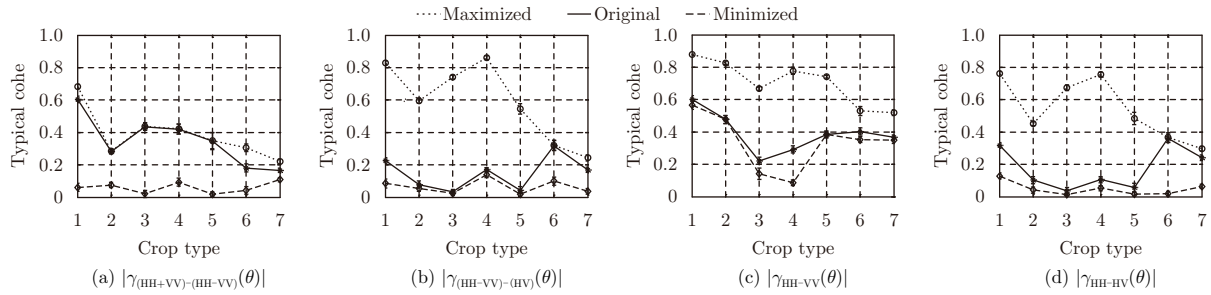


图7 旋转域极化相干特征典型值对比图

Fig. 7 Errorbar plots of typical polarimetric coherence parameters

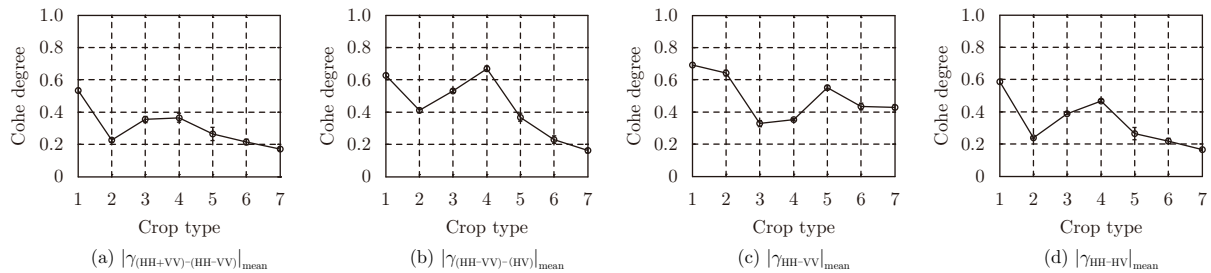


图8 旋转域极化相干度对比图

Fig. 8 Errorbar plots for polarimetric coherence degree in rotation domain

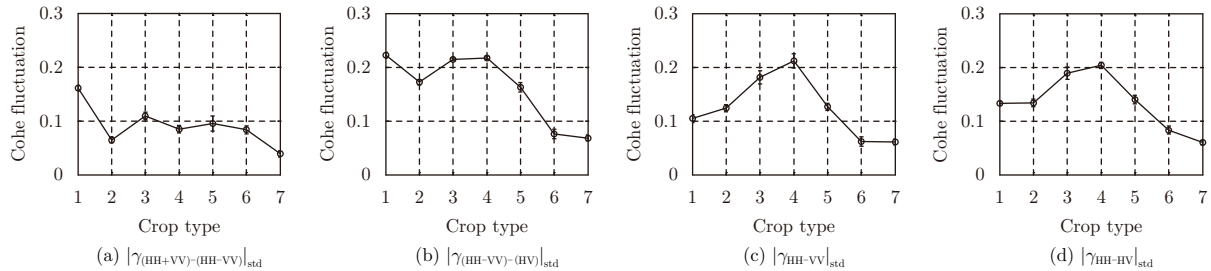


图9 旋转域极化相干起伏度对比图

Fig. 9 Errorbar plots of polarimetric coherence fluctuation in rotation domain

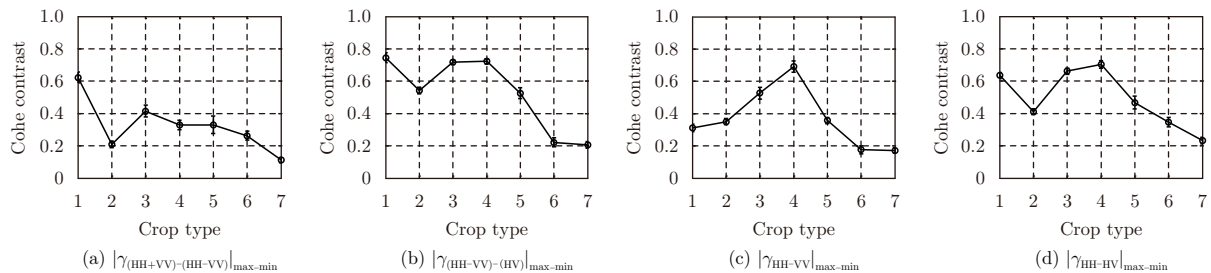


图10 旋转域极化相干对比度对比图

Fig. 10 Errorbar plots of polarimetric coherence contrast in rotation domain

化相干起伏度均为最小。图10为旋转域极化相干对比度对比图，与图9的特征趋势相似。另外，图11为旋转域极化相干宽度对比图，图12和图13分别为旋转域极化相干特征最大化角和最小化角对比图。除 $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}(\theta)|_{-BW_{0.95}}$ 的取值基本为常数($\approx 22.5^\circ$)外，其它刻画参数对不同农作物的取值均

有所差异，具备地物分辨能力。

以基本的欧氏距离作为类间距衡量标准，可以优选出3组2维刻画参数($|\gamma_{HH-VV}|_{max}$ 和 $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}|$ ， $|\gamma_{HH-VV}|_{max}$ 和 $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|_{-BW_{0.95}}$ ， $|\gamma_{HH-VV}|_{max}$ 和 $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|_{-\theta_{\gamma-max}}$ ，实现对7类农作物的有效区分和辨识，如图14所示。

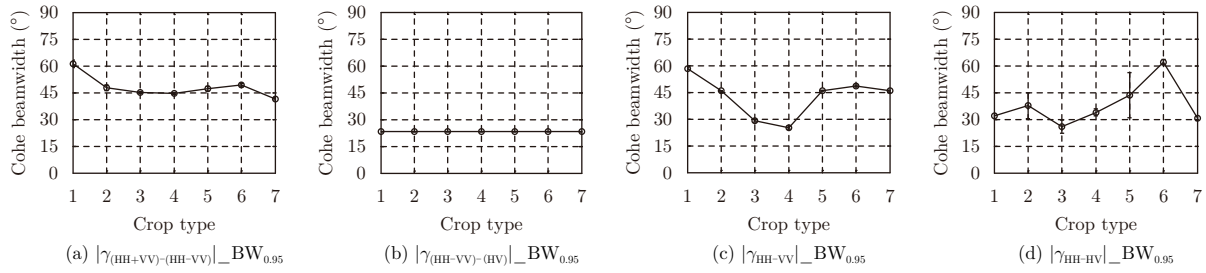


图 11 旋转域极化相干宽度对比图

Fig. 11 Errorbar plots of polarimetric coherence beamwidth $BW_{0.95}$ in rotation domain

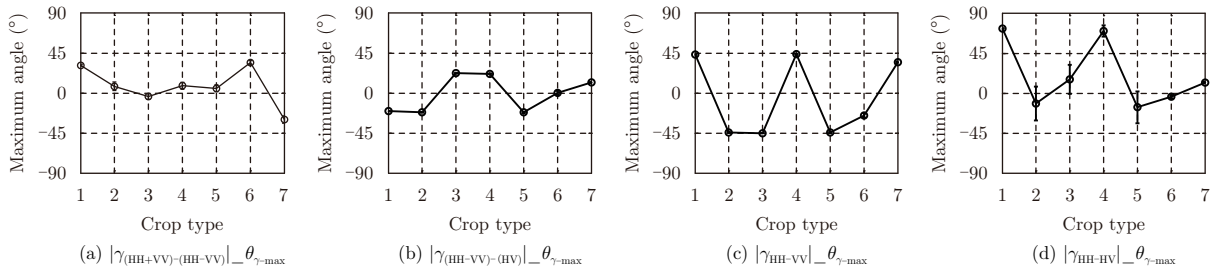


图 12 旋转域极化相干特征最大化角对比图

Fig. 12 Errorbar plots of maximum rotation angles $\theta_{\gamma_{max}}$ (in deg) which produce maximized coherence in rotation domain

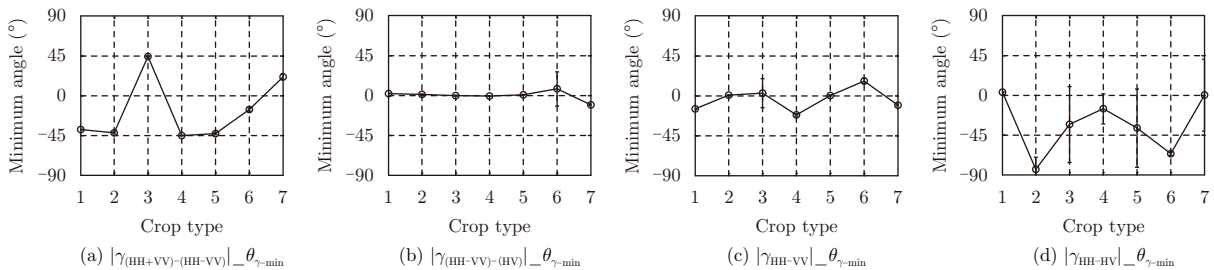


图 13 旋转域极化相干特征最小化角对比图

Fig. 13 Errorbar plots of minimum rotation angles $\theta_{\gamma_{min}}$ (in deg) which produce minimized coherence in rotation domain

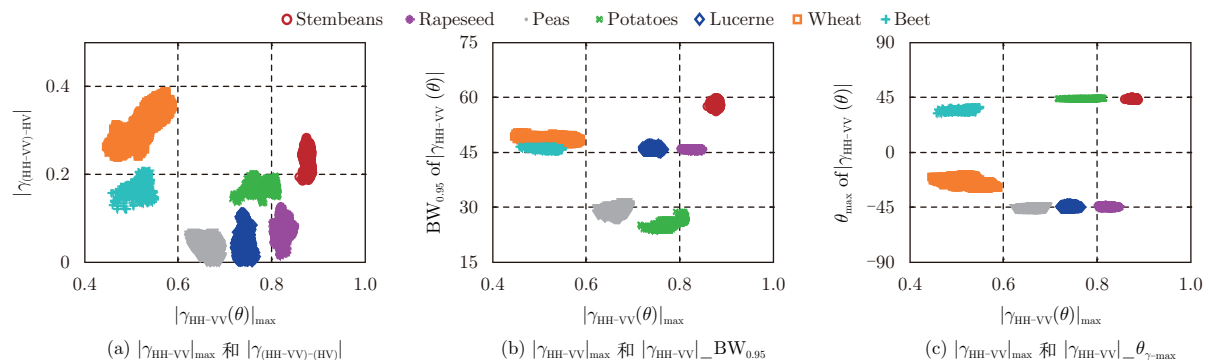


图 14 基于极化特征组合的农作物辨识结果

Fig. 14 Crops discrimination results based on combinations of derived polarimetric parameters

为定量分析旋转域特征带来的增量得益，利用支持向量机(SVM)分类器开展了地物分类的对比分析。其中，第1种方法利用常用的旋转不变特征极化熵 H 、平均 $\bar{\alpha}$ 角和极化反熵 Ani ^[18]作为SVM的输入；第2种方法在 H 、 $\bar{\alpha}$ 和 Ani 基础上，进一步引入了图14

中优选的旋转域特征 $|\gamma_{HH-VV}|_{max}$ 、 $|\gamma_{(HH-VV)-(HV)}|$ 、 $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|_{BW_{0.95}}$ 和 $|\gamma_{HH-VV}(\theta)|_{\theta_{\gamma_{max}}}$ 作为SVM的输入。对7类有真值的地物，随机选取20%的数据作为训练样本，剩余的80%数据作为测试样本，共进行20次蒙特卡洛实验。实验结果表

明, 仅利用旋转不变特征的第1种方法得到的平均分类精度为94.22%, 结合了旋转域极化特征的第2种方法得到的平均分类精度达到了99.32%。因此, 极化相干特征旋转域分析方法带来了5.1%的分类精度提升, 证实了方法的有效性。

这样, 通过极化相干特征旋转域可视化解译与特征提取, 就能够有效挖掘目标旋转域隐含特征, 为极化SAR的应用研究提供更为丰富和全面的特征集。同时, 旋转域解译方法也为极化成像雷达目标解译提供了新的有效途径。

4 结论

极化SAR作为对地观测领域的主流成像传感器, 发挥着越来越重要的作用。目标散射机理的准确理解与解译是极化SAR数据获得成功应用的关键。针对雷达目标的散射多样性, 本文回顾并介绍了在旋转域解译和挖掘目标散射信息的理论方法。其中, 统一的极化矩阵旋转理论将极化矩阵拓展到旋转域, 并针对各矩阵元素导出了一系列新的极化振荡参数集。在此基础上, 将描述不同极化通道间特性的极化相干特征也拓展到旋转域, 提出了可视化解译工具并导出了一系列新的刻画参数。上述理论方法和导出的参数在地物辨识与分类等领域获得了实际应用。本文重点就极化相干特征旋转解译方法对农作物极化相干特征增强、可视化解译和类别辨识等开展了对比分析和应用验证。目标旋转域解译理论作为一种新的极化SAR图像解译方法, 为目标散射信息深度挖掘、刻画和利用提供了有力支撑, 其应用潜力值得更深入的开发。

参 考 文 献

- [1] Lee J S and Pottier E. Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications[M]. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [2] Cloude S R. Polarisation Application in Remote Sensing[M]. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- [3] 金亚秋, 徐丰. 极化散射与SAR遥感信息理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
Jin Ya-qiu and Xu Feng. Theory and Approach for Polarimetric Scattering and Information Retrieval of SAR Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [4] 张红, 王超, 刘萌, 等. 极化SAR理论、方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Zhang Hong, Wang Chao, Liu Meng, et al. Theory, Approach and Application of Polarimetric SAR[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [5] Dell'Acqua F and Gamba P. Remote sensing and earthquake damage assessment: Experiences, limits, and perspectives[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(10): 2876–2890. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2196404.
- [6] Sato M, Chen S W, and Satake M. Polarimetric SAR analysis of Tsunami damage following the March 11, 2011 East Japan Earthquake[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2012, 100(10): 2861–2875. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2200649.
- [7] Chen S W and Sato M. Tsunami damage investigation of built-up areas using multitemporal spaceborne full polarimetric SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(4): 1985–1997. DOI: 10.1109/TGRS.2012.2210050.
- [8] Chen S W, Wang X S, and Sato M. Urban damage level mapping based on scattering mechanism investigation using fully polarimetric SAR data for the 3.11 East Japan earthquake[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 6919–6929. DOI: 10.1109/TGRS.2016.2588325.
- [9] 吴一戎. 多维度合成孔径雷达成像概念[J]. 雷达学报, 2013, 2(2): 135–142.
Wu Yi-rong. Concept of multidimensional space joint-observation SAR[J]. *Journal of Radars*, 2013, 2(2): 135–142.
- [10] 洪文. 圆迹SAR成像技术研究进展[J]. 雷达学报, 2012, 1(2): 124–135.
Hong Wen. Progress in circular SAR imaging technique[J]. *Journal of Radars*, 2012, 1(2): 124–135.
- [11] 张杰, 张晰, 范陈清, 等. 极化SAR在海洋探测中的应用与探讨[J]. 雷达学报, 2016, 5(6): 596–606.
Zhang Jie, Zhang Xi, Fan Chen-qing, et al. Discussion on application of polarimetric synthetic aperture radar in marine surveillance[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 596–606.
- [12] 许成斌, 周伟, 丛瑜, 等. 基于峰值区域的高分辨率极化SAR舰船目标特征分析与鉴别[J]. 雷达学报, 2015, 4(3): 367–373.
Xu Cheng-bin, Zhou Wei, Cong Yu, et al. Ship analysis and detection in high-resolution Pol-SAR imagery based on peak zone[J]. *Journal of Radars*, 2015, 4(3): 367–373.
- [13] 王雪松. 雷达极化技术研究现状与展望[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 119–131.
Wang Xue-song. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119–131.
- [14] 杨汝良, 戴博伟, 李海英. 极化合成孔径雷达极化层次和系统工作方式[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 132–142.
Yang Ru-liang, Dai Bo-wei, and Li Hai-ying. Polarization hierarchy and system operating architecture for polarimetric synthetic aperture radar[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 132–142.
- [15] 代大海, 廖斌, 肖顺平, 等. 雷达极化信息获取与处理的研究进展[J]. 雷达学报, 2016, 5(2): 143–155.
Dai Da-hai, Liao Bin, Xiao Shun-ping, et al. Advancements on radar polarization information acquisition and processing[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 143–155.

- [16] 赵春雷, 王亚梁, 阳云龙, 等. 雷达极化信息获取及极化信号处理技术研究综述[J]. 雷达学报, 2016, 5(6): 620–638.
Zhao Chun-lei, Wang Ya-liang, Yang Yun-long, *et al.*. Review of radar polarization information acquisition and polarimetric signal processing techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 620–638.
- [17] Huynen J R. Phenomenological Theory of Radar Targets[D]. [Ph.D. dissertation], Delft University of Technology, 1970.
- [18] 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. DOI: [10.1109/36.551935](https://doi.org/10.1109/36.551935).
- [19] Touzi R. Target scattering decomposition in terms of roll-invariant target parameters[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(1): 73–84. DOI: [10.1109/TGRS.2006.886176](https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.886176).
- [20] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2116121).
- [21] Chen S W, Li Y Z, Wang X S, *et al.*. Modeling and interpretation of scattering mechanisms in polarimetric synthetic aperture radar: Advances and perspectives[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2014, 31(7): 79–89.
- [22] Xu F and Jin Y Q. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2351–2364. DOI: [10.1109/TGRS.2005.855064](https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.855064).
- [23] An W T, 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2041242).
- [24] 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. DOI: [10.1109/TGRS.2010.2099124](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2099124).
- [25] Van Zyl J J, Ariei 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2128325).
- [26] Ariei 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2076285).
- [27] Neumann M, Ferro-Famil L, and Reigber A. Estimation of forest structure, ground, and canopy layer characteristics from multibaseline polarimetric interferometric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(3): 1086–1104. DOI: [10.1109/TGRS.2009.2031101](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2031101).
- [28] 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. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2255615](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2255615).
- [29] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2009.2024304).
- [30] Chen S W, Wang X S, Li Y Z, *et al.*. Adaptive model-based polarimetric decomposition using PolInSAR coherence[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(3): 1705–1718. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2253780](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2253780).
- [31] Wang C L, Yu W D, 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2259177).
- [32] Li H Z, Wang C, Zhang H, *et al.*. A unified three-component scattering model for polarimetric coherent target decomposition[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(9): 2868–2891. DOI: [10.1080/01431161.2011.622728](https://doi.org/10.1080/01431161.2011.622728).
- [33] Zhu F Y, Zhang Y H, and Li D. An extension of a complete model-based decomposition of polarimetric SAR data[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(2): 287–291. DOI: [10.1109/LGRS.2015.2511076](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2511076).
- [34] Deng L and Yan Y N. Improving the Yamaguchi4 decomposition method using selective polarization orientation compensation[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2016, 42(2): 125–135. DOI: [10.1080/07038992.2016.1160774](https://doi.org/10.1080/07038992.2016.1160774).
- [35] Zou B, Zhang Y, Cao N, *et al.*. A four-component decomposition model for PolSAR data using asymmetric scattering component[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(3): 1051–1061. DOI: [10.1109/JSTARS.2014.2380151](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2380151).
- [36] Wang Y H, Liu H W, and Jiu B. PolSAR coherency matrix decomposition based on constrained sparse representation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(9): 5906–5922. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2293663](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2293663).
- [37] 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(3): 498–518.
- [38] 张腊梅, 段宝龙, 邹斌. 极化SAR图像目标分解方法的研究进展[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(12): 3289–3297.
- Zhang Lamei, Duan Baolong, and Zou Bin. Research development on target decomposition method of polarimetric SAR image[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(12): 3289–3297.
- [39] Chen S W, Ohki M, Shimada M, *et al.* Deorientation effect investigation for model-based decomposition over oriented built-up areas[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 273–277.
- [40] Chen S W, Wang X S, and Sato M. Uniform polarimetric matrix rotation theory and its applications[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(8): 4756–4770. DOI: [10.1109/TGRS.2013.2284359](https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2284359).
- [41] Chen S W, Li Y Z, and Wang X S. A visualization tool for polarimetric SAR data investigation[C]. The 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, Hamburg, Germany, 2016: 579–582.
- [42] Chen S W and Wang X S. Polarimetric coherence pattern: A visualization tool for PolSAR data investigation[C]. The IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Beijing, China, 2016: 7509–7512.
- [43] Xiao S P, Chen S W, Chang Y L, *et al.* Polarimetric coherence optimization and its application for manmade target extraction in PolSAR data[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2014, 97(6): 566–574.
- [44] Chen S W, Li Y Z, and Wang X S. Crop discrimination based on polarimetric correlation coefficients optimization for PolSAR data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2015, 36(16): 4233–4249. DOI: [10.1080/01431161.2015.1079345](https://doi.org/10.1080/01431161.2015.1079345).
- [45] Lee J S, Schuler D L, Ainsworth T L, *et al.* On the estimation of radar polarization orientation shifts induced by terrain slopes[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(1): 30–41. DOI: [10.1109/36.981347](https://doi.org/10.1109/36.981347).
- [46] Chen S W, Wang X S, and Sato M. PolInSAR complex coherence estimation based on covariance matrix similarity test[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4699–4710. DOI: [10.1109/TGRS.2012.2192937](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2192937).
- [47] 陶臣嵩, 陈思伟, 李永祯, 等. 结合旋转域极化特征的极化SAR地物分类[J]. *雷达学报*, 2017, 6(5): 524–532.
- Tao Chensong, Chen Siwei, Li Yongzhen, *et al.* Polarimetric SAR terrain classification using polarimetric feature derived from rotation domain[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(5): 524–532. DOI: [10.12000/JR16131](https://doi.org/10.12000/JR16131).
- [48] Ainsworth T L, Schuler D L, and Lee J S. Polarimetric SAR characterization of man-made structures in urban areas using normalized circular-pol correlation coefficients[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, 112(6): 2876–2885. DOI: [10.1016/j.rse.2008.02.005](https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.02.005).
- [49] Yamaguchi Y, Yamamoto Y, Yamada H, *et al.* Classification of terrain by implementing the correlation coefficient in the circular polarization basis using X-band POLSAR data[J]. *IEICE Transactions on Communications*, 2008, E91B(1): 297–301.

作者简介



陈思伟(1984–), 男, 四川人, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院讲师, 主要研究方向包括雷达极化信息处理、成像雷达信息处理、目标散射建模与解译、微波遥感大数据、环境遥感与灾害遥感等。

E-mail: chenswnudt@163.com



李永祯(1977–), 男, 内蒙古人, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院研究员, 电子信息复杂电磁环境效应国家重点实验室副主任, 主要研究方向为新体制雷达与电子对抗。

E-mail: e0061@sina.com



王雪松(1972–), 男, 内蒙古人, 博士, 国防科技大学理学院院长, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达极化信息处理、雷达目标识别、新体制雷达技术。



肖顺平(1964–), 男, 江西人, 博士, 国防科技大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 电子信息复杂电磁环境效应国家重点实验室主任, 主要研究方向包括雷达极化信息处理、电子信息复杂电磁环境仿真评估技术、雷达目标识别等。