

雷达目标空频域瞬态极化特性及其在几何结构反演中的应用

徐 牧 王雪松 肖顺平
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 该文针对高分辨全极化成像雷达体制,研究了雷达目标的空频域瞬态极化特性及其在目标几何结构反演中的应用。给出了空频域瞬态极化特性的表征及获取方法,将已有瞬态极化理论拓广至空频域,并对典型散射结构的空频域瞬态极化特性进行对比分析。作为应用,提出基于空频域瞬态极化特性分析的雷达目标几何结构反演方法,该方法通过揭示空频域瞬态极化特征与散射结构类型间的对应关系,可以克服传统反演的模糊性和局限性,实现更为准确和可信的反演。基于暗室测量数据验证了该方法的有效性。

关键词: 雷达目标; 瞬态极化; 空频域; 几何结构反演; 散射中心

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)05-1127-05

Radar Target's Space-Frequency Instantaneous Polarization Characteristics and Its Application on Geometrical Structure Retrieval

Xu Mu Wang Xue-song Xiao Shun-ping

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In this paper, the space-frequency instantaneous polarization characteristics of the specific radar target is analyzed, and its successful application to the retrieval of target's geometrical structure is also proposed. The concept and derivation of space-frequency instantaneous polarization characteristics are discussed, and the characteristics of canonical structures are compared. As an illustration of the potential application, a novel scheme of the retrieval of target's geometrical structure is proposed, which is based on space-frequency instantaneous polarization features. Comparing with traditional methods, the novel scheme can obtain a more accurate and robust result. The validity of the scheme is indicated by experimental results.

Key words: Radar target; Instantaneous polarization; Space-frequency domain; Geometrical structure retrieval; Scattering center

1 引言

雷达目标电磁散射特性研究是目标特征提取及分类识别的基石^[1]。高分辨成像和全极化测量都是现代雷达系统的重要发展趋势,研究高分辨全极化成像条件下雷达目标的极化散射特性,已成为雷达极化信息处理领域的热点问题。

传统的极化合成孔径雷达/逆合成孔径雷达(极化 SAR/ISAR)具有对目标二维成像解析能力^[2],成像结果表现为孤立的二维散射中心分布。但此成像过程实际上将散射中心的极化散射特性在空域(方位角域)和频域内进行了平均,忽略了极化散射随雷达观测姿态及频率的动态变化特性,丢失了大量目标散射的细节特征。文献[3]提出了雷达目标电磁散射的瞬态极化表征理论,有效刻画了目标极化散射在频域的动态变化特性。在高分辨全极化成像条件下,目标极化散射不仅与频率有关,还依赖于目标与雷达测量系统间的空间位置

关系。对于极化 SAR 成像雷达系统,这种位置关系可由成像的俯仰角及方位角等描述。鉴于极化 SAR 成像系统的俯仰角通常较为固定,目标极化散射随成像方位角的变化通常更为显著^[4,5],仅从单一的频域难以全面刻画目标的极化特性。对于已有或在研的先进高分辨全极化成像雷达系统,其通常具有大的信号带宽及宽的成像积累角,使分析目标极化散射随成像方位角及频率的动态变化特性成为可能。综合考虑目标的空域及频域瞬态极化特性,可以揭示出更多目标识别及图像解译可资利用的有用信息。

基于上述背景,针对高分辨全极化成像雷达体制,本文给出了散射中心空频域瞬态极化特性的表征及获取方法,并对不同类型典型散射结构的空频域瞬态极化特性进行分析对比。作为应用,提出了基于空频域瞬态极化特征的雷达目标几何结构反演策略。该方法通过揭示空频域瞬态极化特征与散射结构类型间的对应关系,能够克服已有反演方法的模糊性和局限性,实现更为准确和可信的反演。

2 空频域瞬态极化特性分析

分析雷达目标的空频域瞬态极化特性,即要揭示其极化

2008-04-01 收到, 2008-10-27 改回

国家自然科学基金(60672033)和新世纪优秀人才计划项目(NCET-04-0997)资助课题

散射随频率及成像方位角的动态变化特性。光学区雷达目标的电磁散射是“等效散射中心”的相干合成^[1,5],目标整体的瞬态极化特性取决于各散射中心的瞬态极化特性。为此,本文重点分析二维散射中心的空频域瞬态极化特性,揭示不同类型散射中心空频域瞬态极化特性的差异,为后续目标几何结构反演等应用提供依据。

2.1 空频域瞬态极化特性的表征及获取

本文将散射中心极化散射随方位角及频率的联合变化特性称为散射中心的“空频域瞬态极化特性”。定义散射中心的“空频域瞬态极化散射算子集”为

$$\mathbf{G}_{SF} = \{S_{SF}(\theta, f), \theta \in \Omega_\theta, f \in \Omega_f\} \quad (1)$$

其中 Ω_θ 和 Ω_f 分别代表空域及频域支撑集,对应高分辨二维成像的方位角范围及发射信号带宽。 $S_{SF}(\theta, f)$ 代表方位角为 θ 、频率为 f 时散射中心的瞬态 S -矩阵^[3], \mathbf{G}_{SF} 即可完整表征散射中心的空频域瞬态极化特性。

下面给出一条基于子孔径处理思想的 \mathbf{G}_{SF} 获取流程:对于 $\forall \theta_0 \in \Omega_\theta$, 考虑其附近长度为 $\Delta\theta$ 的子孔径区域 $\tilde{\theta} = [\theta_0 - \Delta\theta/2, \theta_0 + \Delta\theta/2]$ 。当 $\Delta\theta$ 较小时,可近似认为散射中心在 $\tilde{\theta}$ 内的极化特性基本恒定,对 $\tilde{\theta}$ 内的测量数据进行全极化散射中心建模及参数估计,估计获得的参数即可近似表征散射中心在 θ_0 时的瞬态极化特性。为克服已有全极化散射中心参数估计可能存在的多通道估计不一致问题,本文采用文献[6]的二维相干极化 GTD 模型进行全极化散射中心的建模,则 $\tilde{\theta}$ 内测量获得各通道散射回波可表述为

$$u_{pq}(\theta, f) = \sum_{i=1}^d (jf/f_c)^{\alpha_i} S_{pq}^i \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f}{c}(x_i \cos\theta + y_i \sin\theta)\right] + n_{pq}(\theta, f) \quad (2)$$

其中 $p, q = H$ 或 V 表示不同的极化通道, d 为散射中心数目, f 为频率, θ 为方位角, $n_{pq}(\theta, f)$ 为观测噪声。 α_i, x_i, y_i 及 S_{pq}^i 分别对应第 i 个散射中心的 GTD 类型参数、距离向及方位向位置、频点 f_c 处 pq 通道的复散射系数。定义 $\mathbf{P}(\theta_0) \triangleq \{S_{pq}^i(\theta_0), x(\theta_0), y(\theta_0), \alpha(\theta_0)\}$ 为方位角 θ_0 处的散射中心参数集,考虑到 $\Delta\theta$ 过大会影响对散射中心局部极化特性的准确估计,可在 $3^\circ \sim 5^\circ$ 范围内选择 $\Delta\theta$ 值。对于不同的成像子孔径,采用相同的处理获得各自的散射中心参数集,并基于提取的参数进行散射中心关联。鉴于篇幅限制及突出本文重点的需要,对全极化散射中心提取及关联的具体过程不再赘述,详见相关文献[6]。由不同方位角处提取获得的散射中心参数集即可获得该散射中心的 \mathbf{G}_{SF} 。即对于 $\forall(\theta_i, f_j) \in \Omega_\theta \times \Omega_f$, 有

$$\mathbf{S}_{SF}(\theta_i, f_j) = \begin{pmatrix} S_{SF}^{hh}(\theta_i, f_j) & S_{SF}^{hv}(\theta_i, f_j) \\ S_{SF}^{vh}(\theta_i, f_j) & S_{SF}^{vv}(\theta_i, f_j) \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中

$$S_{SF}^{pq}(\theta_i, f_j) = (jf_j/f_c)^{\alpha(\theta_i)} S_{pq}(\theta_i) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi f_j}{c}(x(\theta_i) \cos\theta_i + y(\theta_i) \sin\theta_i)\right] \quad (4)$$

$\mathbf{S}_{SF}(\theta_i, f_j)$ 即为 \mathbf{G}_{SF} 在空频点 (θ_i, f_j) 处的瞬态 S -矩阵。

2.2 典型散射结构的空频域瞬态极化特性分析

诸如坦克、装甲车等地面目标,二面角、三面角及平板等是目标体上最为典型的散射结构。本节以三面角、二面角及平板这三种典型散射结构为例,分析并揭示不同类型散射结构空频域瞬态极化特性的差异。

首先简要介绍上述散射结构全极化观测数据的仿真生成方法。鉴于雷达成像积累角不会过大的客观实际,可近似认为三面角在成像方位角范围内的散射满足严格各向同性,根据其散射的理论公式^[1]即可计算其在一定观测条件下的空频域瞬态极化散射算子集 \mathbf{G}_{SF} ;对于二面角,本文借鉴文献[7]的方法,从惠更斯原理和物理光学近似入手获得其 \mathbf{G}_{SF} 。同理,理想平板的 \mathbf{G}_{SF} 值也可根据其散射的理论公式计算获得。仿真设置上述散射结构的相关参数,生成全极化观测数据,在此基础上即可对散射结构的空频域瞬态极化特性进行分析。图1所示为上述散射结构的空频域瞬态极化散射功率谱,对比图1(a)~图1(c)易知:三面角的空域极化散射呈现明显的各向同性特点,而二面角及平板则表现为典型的各向异性。进一步分析易知,对于二面角及平板,其空域极化散射集中在姿态角^[5]附近的主瓣区域,在姿态角处出现峰值,且主瓣宽度与散射结构方位向长度有关。在频域,三者的极化散射都呈现明显的色散特点,具体表现为散射强度随频率增加而增大。此外,对于 $\forall(\theta, f) \in \Omega_\theta \times \Omega_f$, 基于 SDH 分解^[8]提取散射结构在 (θ, f) 处的奇次、偶次及螺旋体分量,可以对上述三者的散射机理进行分析,限于篇幅,对 SDH 分解的具体实现过程不再赘述,详见文献[8]。分析结果表明:三面角极化散射为明显的奇次散射,二面角在其主瓣区域内为明显的偶次散射,而平板在其主瓣区域内则表现为明显的奇次散射。

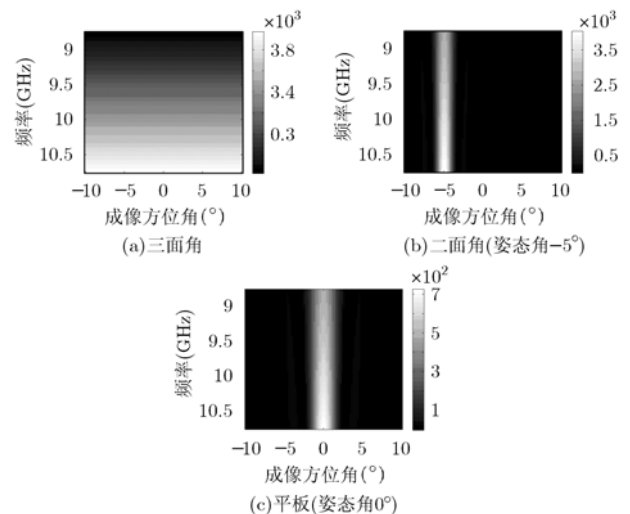


图1 典型散射结构空频域瞬态极化散射功率谱

3 基于空频域瞬态极化特征的雷达目标几何结构反演

几何结构特征是雷达目标最为本质的属性之一, 它对目标特性的描述更加贴近人类视觉系统的感知方式, 雷达目标几何结构反演可为目标识别及图像解译等提供直观有效的判别信息。已有几何结构反演主要基于二维散射中心等理论^[4,5,9]。其中, GTD 散射中心模型利用类型参数对散射结构类型进行初步反演^[9], 结构反演的模糊性较大, 如无法有效区分二面角和三面角这两种基本散射结构。属性散射中心模型^[4]对目标散射特性的描述更为细致。但该模型参数过多, 参数之间相互耦合的影响非常严重^[5]。鉴于极化在揭示目标散射机理等方面的优势, 文献[10]初步验证了基于极化特征进行散射结构类型判别的可行性, 但无法区分极化特性相近的散射结构。为此, 本文基于对全极化散射中心空频域瞬态极化特性的分析, 提出了一种基于空频域瞬态极化特征的反演方法。利用空频域瞬态极化特性分析所揭示出的关于目标极化散射的细节信息, 可以克服已有反演方法存在的模糊性等不足。

3.1 反演流程

基于空频域瞬态极化特征的雷达目标几何结构反演流程可概述为: 基于全极化散射中心提取获得目标体上各局部散射结构的空频域瞬态极化特征。在此基础上, 基于空频域瞬态极化特征匹配, 将上述散射结构用某种基本的几何结构类型来等效, 由各局部散射结构的几何形状及空间位置关系即可大致“拼接”出目标整体结构, 实现反演任务。

在整个流程中, 对目标体上各局部散射结构类型的准确判别(即确定其基本几何形状)是能否成功反演目标几何结构的关键。本节给出一种基于树状分类器的散射结构类型判别策略, 判别准则可表述为: 首先, 利用极化分类将散射中心等效为与其极化散射最为相近的基本结构类型。其次, 若极化分类存在判别模糊, 引入空域各向异性判别将散射中心细分为各向同性及各向异性类型。最后, 对于利用上述方法仍无法判别或存在模糊的情况, 辅以频域色散特性判别, 通过 GTD 类型参数进一步判别散射结构的类型。在散射结构类型判别的具体实现过程中, 按照“极化分类——空域各向异性判别——频域色散特性判别”的顺序进行, 这种对判别准则顺序的设计是较为合理的, 主要基于以下考虑。

首先, 极化信息可以揭示散射中心对应散射结构的散射机理, 而散射机理与散射结构的几何形状、姿态取向等属性密切相关, 其在揭示散射结构几何特征上具有特殊优势。特别地, 全极化散射中心提取结合了高分辨成像和极化信息处理二者的优势, 对散射中心对应几何结构类型的判别更为准确。

其次, 雷达目标的电磁散射具有明显的方位依赖性, 而这种依赖性可作为目标识别的重要依据, 利用空域各向异性判别可以提供额外的判别信息。如同为奇次散射的三面角和

平板, 前者为典型的空域各向同性结构, 而后者为典型的空域各向异性。通过空域各向异性判别可消积极化分类判别的模糊性。

最后, 频域色散特性对散射结构类型的区分能力有限, 且 GTD 类型参数的提取受噪声及相对测量带宽等因素影响较大。为此, 将频域色散特性判别放在最后, 在极化分类及空域各向异性判别无效时使用。

图 2 即以二面角、平板、三面角及球体这 4 种最为基本的几何结构为例, 对本文提出的散射结构类型判别准则进行直观的阐述。由于上述四者彼此之间在频域色散特性、散射机理等方面的相似性, 基于传统反演^[4]或简单的极化分类^[9]都难以将四者完整区分, 而利用本文方法则可成功做到这一点。可见, 通过对目标体上散射中心空频域瞬态极化特征的提取, 可以反映其在极化域、空域及频域等多方面的特性, 提高反演的精度。

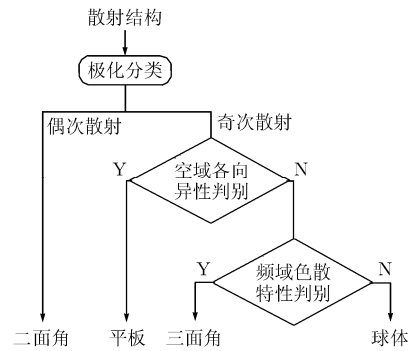


图 2 散射结构类型判别准则示例

3.1.1 极化分类 人造目标体上的强散射结构通常为确定性结构, 可选择相干极化分解方法获得全极化散射中心的散射机理特征, 通过散射机理分类实现对散射结构类型的初步判别。本文借鉴 Cameron 分解^[11]的处理思想进行极化分类, 计算待判别散射结构与二面角及三面角等基本散射结构的极化散射相似性参数, 基于最小距离准则将散射结构等效为与其极化散射特性最为接近的基本散射结构。文献[11]设置了 6 种基本的对称散射结构, 对于大多数人造目标体上的强散射结构, 可由上述基本散射结构进行等效。

3.1.2 空域散射各向异性判别 考虑散射中心散射较强的极化通道。对于理想球体等各向同性散射中心, 该通道内的空域散射幅度序列可由常函数来表征, 即

$$\bar{A}_{\text{iso}}(\theta) = C, \quad \theta \in \Omega_0 \quad (5)$$

其中 $\bar{A}_{\text{iso}}(\theta)$ 为散射中心在多个频点处空域散射幅度序列的均值。与之对应的是, 作为典型的各向异性散射结构, 二面角及平板等散射中心在该通道内的空域散射幅度序列可由 sinc 函数来表征, 即

$$\bar{A}_{\text{ani}}(\theta) = A \text{sinc}[a(\theta - \theta_0)], \quad \theta \in \Omega_0 \quad (6)$$

因此, 可基于最小二乘曲线拟合思想进行散射中心空域散射

各向异性判别。基于式(5)和式(6)对实际获得的散射中心空域散射幅度序列进行拟合,根据拟合残差将该散射中心判为各向同性或各向异性。限于篇幅,对具体的实现过程不再赘述。

3.1.3 频域色散特性判别 本文基于二维相干极化 GTD 模型对全极化散射中心进行建模,其中的 GTD 类型参数即表征了散射中心所具有的频域色散特性。为此,根据提取获得的散射中心的 GTD 类型参数,基于最小距离准则进行匹配即可实现对其频域色散特性的判别。当 GTD 类型参数与 0 最接近,则判为非色散结构;否则,判为色散结构。当利用极化分类处理无法确定散射中心散射机理类型时,可根据其类型参数进行判别。

3.2 仿真实验及结果分析

本节基于暗室实测数据验证本文所提反演方法的有效性,被测目标为某弹头模型,如图 3(a)所示。实测数据的频率范围为 8.75~10.75GHz,步进为 20MHz;方位角范围 0°~180°,步进 0.2°,俯仰角为 15°。图 3(b)为雷达沿目标侧面入射时,经全极化散射中心提取获得的目标体上局部散射结构的分布示意图。该提取结果对应成像方位角范围为 90°~95°,中心方位角 92.5°(暗室测量时当雷达沿目标头部正面入射时,方位角定为 0°)。易知在此观测条件下,目标在中部弹体及尾翼存在强散射结构。限于篇幅,本文仅选择图 3(b)中标记为 1,2 的代表性散射结构为例,验证本文方法对不同散射结构进行几何反演的有效性,从而说明其对目标整体结构的反演性能。

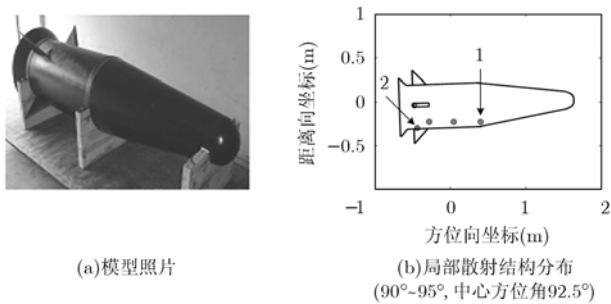


图 3 弹头类目标模型

图 4 为对两个典型散射中心空频域瞬态极化特性的分析结果。其中,图 4(a)为散射中心 1 的空频域瞬态极化功率谱,易知其表现出空域各向异性的特点,利用空域散射幅度函数拟合也可将其判为各向异性结构。图 4(b)为对散射中心 1 进行极化分类的结果,鉴于其空域散射旁瓣较弱,噪声等因素可能会影响对其真实特性的提取。为此,仅提取其在空域散射主瓣区域内的散射机理特征。由图 4(b)易知,散射中心 1 表现为典型的奇次散射,在极化特性方面可能对应三角面、平板及球体等类型。根据图 2 的散射结构类型判别准则,结合极化分类及空域散射各向异性判别的结果,可将其判为平

板结构。这主要是由于雷达侧面入射时,弹体形成强的镜面散射的原因,其即等效为一个平板的散射,类型判别结果与实际模型的结构特性吻合得很好。同理,图 4(d)为散射中心 2 的空频域瞬态极化功率谱,易知其同样表现出空域各向异性的特点。图 4(e)为对散射中心 2 进行极化分类的结果,易知其散射中心表现为典型的二面角散射(仅在极个别位置处被误判为偶极子)。则根据图 2 的散射结构类型判别准则,结合极化分类及空域散射各向异性判别的结果,可将其判为二面角结构,这与其所在位置处尾翼和弹体之间形成的二面角结构相吻合。对于以上两个散射中心,基于空域瞬态极化特性分析即可对其类型进行成功判别。对目标体上其他典型散射中心进行同样的处理,可以反演获得各自等效的基本结构类型,限于篇幅不再一一列举。基于暗室实测数据的实验充分验证了利用本文方法进行雷达目标几何结构反演的可行性。

特别地,图 4(c)和图 4(f)同样给出了对散射中心 1 和散射中心 2 的频率色散特性的分析结果。对于散射中心 2 对应的二面角结构,由于其散射相对散射中心 1 要强(对比图 4(a)和图 4(d)易知此结论),因此其 GTD 类型参数较为稳定,在其空域散射主瓣区域内基本为 1,与对二面角的理论分析相一致。但是,散射中心 1 的 GTD 类型参数不够稳定,无法通过该参数对其散射类型进行准确判别,这也说明了相对于空域各向异性判别及极化分类,频域色散特性判别对成像条

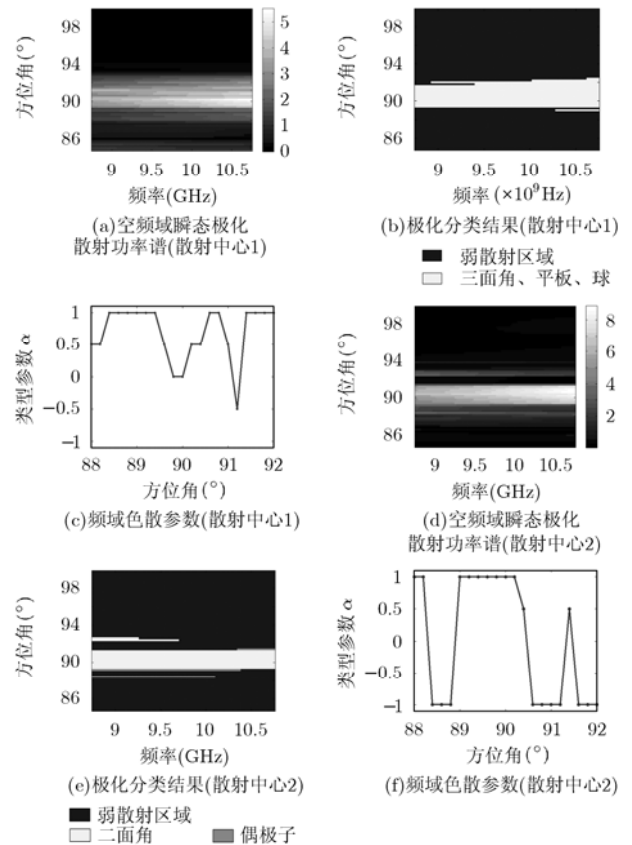


图 4 散射结构空频域瞬态极化特性分析结果

件及信噪比的要求更高,这也是本文在设计类型判别准则将其放在最后的原因。

4 结束语

本文针对全极化成像雷达体制,研究了雷达目标的空频域瞬态极化特性及其在雷达目标几何结构反演中的应用,基于暗室测量数据验证了反演方法的有效性。需要说明的是,对于雷达目标几何结构反演这一典型“逆”问题,已有研究未能给出有效的解决途径。本文对此进行了初步尝试,给出了一条切实可行的反演策略,通过对局部散射结构几何特性的准确判别而实现了目标整体结合结构的反演,反演结果更为准确和可信。但对于含有较多形状不规则散射结构的复杂目标,其几何形状的不规则及散射机理的复杂性都对几何结构反演提出了严峻挑战,如何利用空频域瞬态极化特性对此类目标进行几何结构反演,将是几何结构反演能否走向实用化的重要问题,也是下一步研究中需要重点攻关的难题。

参 考 文 献

- [1] 黄培康,殷红成,许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005, 第1章.
- [2] [美]卡明(Cumming, I.G.)等[著], 洪文等[译], 吴一戎[审]. 合成孔径雷达成像——算法与实现[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007. 10, 第1章.
- [3] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2005, 第3章.
- [4] Potter L C, *et al.* Attributed scattering centers for SAR ATR[J]. *IEEE Trans. on IP*, 1997, 6(1): 79-91.
- [5] 孙真真. 基于光学区雷达目标二维像的目标散射特征提取的理论及方法研究[D]. [博士学位], 长沙: 国防科学技术大学, 2001.
- [6] 代大海, 王雪松, 肖顺平. 基于二维 CP-GTD 模型的全极化 SAR 超分辨成像[J]. *自然科学进展*, 2007, 10(17): 1439-1448.
- [7] Verly J G. Physical optics polarization scattering matrix for a right-angle dihedral[R]. ADA293 036, 1995.
- [8] Alberga V, Krogager E, and Chandra M. Potential of coherent decompositions in SAR polarimetry and interferometry[J]. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'04, Alaska, 2004: 1792-1795.*
- [9] Potter L C, *et al.* A GTD-based parametric model for Scattering [J]. *IEEE Trans. on AP*, 1995, 43(10): 1058-1067.
- [10] Ertin E and Potter L C. Polarimetric classification of scattering centers using M-ary Bayesian decision rules[J]. *IEEE Trans. on AES*, 2000, 36(3): 738-749.
- [11] Cameron W L and Leung L K. Feature motivated polarization scattering matrix decomposition[J]. *IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, 1990: 549-557.*

徐 牧: 男, 1979年生, 博士生, 研究方向为雷达信号处理与目标识别、极化SAR图像处理.

王雪松: 男, 1972年生, 教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, “三遥”分会委员, 主要从事雷达极化信息处理、信号处理与目标检测及识别、弹道导弹攻防对抗电子战等领域的研究.

肖顺平: 男, 1964年生, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理、雷达目标识别、模糊信息处理、电子战等领域的研究.