

文章编号: 2095-4980(2013)05-0702-05

基于特征选择与 GOPCE 的舰船检测方法

焦智灏¹, 杨 健¹, 宋建社², 叶春茂³

(1.清华大学 电子工程系, 北京 100084;
2.解放军第二炮兵工程大学 信息工程研究所, 陕西 西安 710025;
3.北京无线电测量研究所, 北京 100854)

摘 要: 原始的广义相对最优极化(GOPCE)中, 通过最大化目标与背景极化参数融合结果的比值, 而求取极化参数的最优系数向量, 但没有考虑参数融合结果中目标与杂波的分布。为提高基于极化合成孔径雷达图像的舰船目标检测性能, 提出了一种基于极化特征选择及改进 GOPCE 的目标检测方法。首先提出了一个改进的优化准则, 同时考虑了最大化信杂比与最小化目标与杂波分布的方差。基于改进的优化准则, 选择了 3 个最优极化特征, 并求解对应的最优系数向量, 获取了目标与背景区分度更大的融合图像。实验结果表明, 该方法有效提高了目标的检测性能。

关键词: 合成孔径雷达; 雷达极化; 特征选择; 舰船检测; 相对最优极化

中图分类号: TN958

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201305.0702

Ship detection based on feature selection and GOPCE

JIAO Zhi-hao¹, YANG Jian¹, SONG Jian-she², YE Chun-mao³

(1.Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2.Institute of Information Engineering, The Second Artillery Engineering College, Xi'an Shaanxi 710025, China;
3.Beijing Inst. of Radio Measurement, Beijing 100854, China)

Abstract: The optimal coefficient vector is calculated by maximizing the fusion ratio of polarization parameters of targets to those of clutter in the traditional Generalized Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement(GOPCE), while the distributions of the fusion value corresponding to desired targets and clutter are ignored. A feature selection method and a modified GOPCE model are developed to improve ship detection performance in polarimetric Synthetic Aperture Radar(SAR). A modified optimization criteria is proposed, which considers minimizing variance of targets and clutter as well. Three best polarization features are selected and the optimal coefficient vector is calculated based on the criteria, and the difference between targets and clutter is enhanced in the fused image. Experiment results demonstrate the improvement of the proposed method.

Key words: Synthetic Aperture Radar; radar polarimetry; feature selection; ship detection; Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement

利用合成孔径雷达(SAR)图像在目标检测方面已有大量的应用^[1-2], 而极化合成孔径雷达由于包含了目标的极化信息, 相对于传统单极化 SAR 能提供更多可用特征, 因而在目标检测, 特别是海上舰船目标的检测方面具有重要的发展前景^[3-10]。如何充分、有效地利用极化 SAR 的各个通道所提供的多维信息, 最大程度抑制背景杂波, 增强目标强度, 以提高目标的检测性能, 一直是各国学者研究的重点问题。

在利用极化 SAR 进行目标检测的诸多方法中, 将多维的极化数据融合为一个检测量后进行检测是最重要的方法。Novak 等提出了 2 种针对目标检测的极化 SAR 图像滤波方法, 极化白化滤波器(Polarimetric Whitening Filter, PWF)与极化匹配滤波器(Polarimetric Matched Filter, PMF)^[5], 用于增强目标与杂波之间的对比度。Touzi 等研究了海况、入射角、极化方式对舰船检测的影响, 指出了入射角较小的情况下利用极化熵进行舰船检测的可行性^[6]。CHEN 等提出了利用极化交叉熵进行舰船检测的方法^[7]。YANG 等在相对最优极化(Optimization of Polarimetric

收稿日期: 2012-11-12; 修回日期: 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41171317); 国家自然科学基金重点资助项目(61132008); 清华大学自主研究基金资助项目(20111080968)

Contrast Enhancement, OPCE)的基础上,提出了广义相对最优极化(GOPCE),并将其应用于舰船目标检测,取得了良好的效果^[8-10]。

本文针对极化 SAR 图像海上舰船目标的检测,对广义相对最优极化中极化参数的优化融合准则进行改进,并利用新的融合准则,结合增 L 去 R 特征选择方法,在一系列极化特征中选出 3 个最优特征,作为改进的广义相对最优极化中的极化参数。实验结果表明,改进的方法在提高了目标与杂波对比度的同时,抑制了目标与杂波的分布宽度,从而有效提高了目标检测性能。

1 广义相对最优极化

1.1 相对最优极化

在给定目标与杂波的极化散射信息的情况下,OPCE 通过选择一组最优的发射和极化状态,使得目标与背景杂波的接收功率之比达到最大,从而实现增强目标回波、抑制杂波干扰的目的^[11]。非相干情况下,假设目标与杂波的 Kennagh 矩阵分别为 $\mathbf{K}_A$ 和 $\mathbf{K}_B$, 相对最优极化的数学求解模型为:

$$\begin{cases} \text{maximize: } \frac{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_A \mathbf{g}}{\mathbf{h}^T \mathbf{K}_B \mathbf{g}} \\ \text{subject to: } h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 = 1 \\ g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{g} = [g_1, g_2, g_3]^T$ 和 $\mathbf{h} = [h_1, h_2, h_3]^T$ 分别表示发射和接收天线极化方式的 Stocks 矢量。最优极化状态 $\mathbf{g}_{\text{opt}}$ 和 $\mathbf{h}_{\text{opt}}$ 可通过交叉迭代求解^[12], 对极化 SAR 图像每个像素进行如下计算即可得到对比增强后的功率图像:

$$OPCE = \mathbf{h}_{\text{opt}}^T \mathbf{K}_{\text{opt}} \mathbf{g}_{\text{opt}} \quad (2)$$

1.2 广义相对最优极化

在相对最优极化的基础上, YANG 等结合相似性参数^[13]和极化熵^[14]等目标极化特征,提出了广义相对最优极化(GOPCE)^[8],可进一步提高目标与杂波的对比如度。GOPCE 为 2 个因子的乘积,1 个因子为原始 OPCE 的接收功率,另 1 个因子由极化特征的线性组合的平方构成,表述了目标的极化散射特性。GOPCE 的模型表达式如下:

$$GOPCE = (\mathbf{x}^T \mathbf{r})^2 \cdot \mathbf{h}^T \mathbf{K} \mathbf{g} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2 \ r_3]^T$ 为与一次反射、二次反射的相似性参数及极化熵组成的参数向量; $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T$ 为极化参数的系数向量,需通过优化获得。为使目标与杂波之间的对比度最大, GOPCE 的求解模型为:

$$\begin{cases} \text{maximize: } \frac{[\mathbf{x}^T E(\mathbf{r}_A \mathbf{r}_A^T) \mathbf{x}] \cdot \mathbf{h}^T \mathbf{K}_A \mathbf{g}}{[\mathbf{x}^T E(\mathbf{r}_B \mathbf{r}_B^T) \mathbf{x}] \cdot \mathbf{h}^T \mathbf{K}_B \mathbf{g}} \\ \text{subject to: } x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1 \\ h_1^2 + h_2^2 + h_3^2 = 1 \\ g_1^2 + g_2^2 + g_3^2 = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{r}_A$ 与 $\mathbf{r}_B$ 分别为目标与杂波的极化参数矢量; $E(\cdot)$ 为数学期望。发射和接收的最优极化状态 $\mathbf{g}_{\text{opt}}$ 和 $\mathbf{h}_{\text{opt}}$ 通过 OPCE 方法求解,最优系数向量 $\mathbf{x}$ 则为矩阵 $E(\mathbf{r}_B \mathbf{r}_B^T)^{-1} E(\mathbf{r}_A \mathbf{r}_A^T)$ 的最大特征根所对应的特征向量^[8]。

此外,在目标信息未知的情况下,可通过最小化杂波区域融合结果的方差^[9],来求取系数向量 $\mathbf{x}$:

$$\text{minimize: } \text{var}((\mathbf{x}^T \mathbf{r}_B)^2 \cdot \mathbf{h}_{\text{opt}}^T \mathbf{K}_B \mathbf{g}_{\text{opt}}) \quad (5)$$

2 基于改进优化准则的舰船检测方法

2.1 最大化信杂比并最小化目标与杂波方差的优化准则

传统的 GOPCE 中,为求得最优系数向量 $\mathbf{x}$,需要最大化目标与杂波的极化参数融合结果的信杂比:

$$J = \frac{\mathbf{x}^T E(\mathbf{r}_A \mathbf{r}_A^T) \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T E(\mathbf{r}_B \mathbf{r}_B^T) \mathbf{x}} \quad (6)$$

事实上,仅仅最大化信杂比还不能够达到最优检测效果,若能同时优化目标与杂波分布的方差,则可减小目标与杂波分布的重叠,提高目标的检测性能。因此,对信杂比、目标与杂波的方差进行综合考虑,采用如下形式的优化目标函数:

$$J_{\text{new}} = \frac{2\mathbf{x}^T E(\mathbf{r}_A \mathbf{r}_A^T) \mathbf{x} - \text{var}(\mathbf{r}_A^T \mathbf{x})}{\mathbf{x}^T E(\mathbf{r}_B \mathbf{r}_B^T) \mathbf{x} + \text{var}(\mathbf{r}_B^T \mathbf{x})} = \frac{\mathbf{x}^T [E(\mathbf{r}_A \mathbf{r}_A^T) + \mathbf{u}_A \mathbf{u}_A^T] \mathbf{x}}{\mathbf{x}^T [2E(\mathbf{r}_B \mathbf{r}_B^T) - \mathbf{u}_B \mathbf{u}_B^T] \mathbf{x}} \quad (7)$$

式中: $\mathbf{u}_A = E(\mathbf{r}_A)$; $\mathbf{u}_B = E(\mathbf{r}_B)$; $\text{var}(\cdot)$ 表示方差。与传统 GOPCE 的求解方法类似, 在新的目标函数下, 最优系数向量 $\mathbf{x}$ 为矩阵 $[2E(\mathbf{r}_B \mathbf{r}_B^T) - \mathbf{u}_B \mathbf{u}_B^T]^{-1} [E(\mathbf{r}_A \mathbf{r}_A^T) + \mathbf{u}_A \mathbf{u}_A^T]$ 的最大特征根所对应的特征向量。

新的优化目标函数对于最大化信杂比以及最小化目标与杂波的方差进行了折中考虑, 相对于原始 GOPCE 虽然会损失部分信杂比, 但可以减小目标与杂波分布的重叠, 从而使得目标及杂波具有更好的区分度。在不同目标检测的应用背景下, 若对 J_{new} 中目标方差 $\text{var}(\mathbf{r}_A^T \mathbf{x})$ 和杂波方差 $\text{var}(\mathbf{r}_B^T \mathbf{x})$ 分别乘以加权系数, 还可对最大化信杂比以及最小化目标与杂波的方差的折中进行调整, 以获得更好的检测效果。

2.2 极化特征选择

在新的目标函数 J_{new} 中, 极化特征向量是可根据选择的极化参数灵活调整的, 因此, 可结合特征选择方法, 将 J_{new} 推广为极化特征组合的评价函数, 在一系列目标极化特征中选取若干最优特征, 作为改进 GOPCE 的极化参数, 提高目标的检测性能。选择极化特征利用以下评价函数:

$$EF = \max(J_{\text{new}} | \|\mathbf{x}\|_2 = 1) \quad (8)$$

评价函数 EF 作为一个定量指标, 综合衡量了特征组合实现更大的信杂比及更小的目标与杂波分布方差的能力, EF 的值越大, 意味着该特征组合对目标与杂波的区分能力更强。

常用的特征选择方法有分支界限搜索、顺序前进选择、顺序后退选择、增 L 减 R 选择、遗传算法等, 本文中采用应用较广且计算量小的增 L 减 R 特征选择算法^[15], 其中 L 取 3, R 取 2。

本文方法中, 用于极化特征选择的原始极化特征集合包含了 15 个常用的特征:

$$\mathbf{F} = \left\{ S_1, S_2, S_1 S_2, H, \alpha, \frac{T_{11} T_{22}}{\text{Span}^2}, \frac{T_{22}}{\text{Span}}, \frac{T_{33}}{\text{Span}}, \frac{|T_{12}|}{\text{Span}}, \frac{|T_{13}|}{\text{Span}}, \frac{|T_{23}|}{\text{Span}}, \frac{P_s}{\text{Span}}, \frac{P_d}{\text{Span}}, \frac{P_v}{\text{Span}}, \frac{P_c}{\text{Span}} \right\} \quad (9)$$

式中: S_1 和 S_2 为与一次反射、二次反射的相似性参数; H 和 α 为极化熵及平均散射角^[14]; P_s, P_d, P_v 和 P_c 分别为 Yamaguchi 四成分分解^[16]后的一次散射、二次散射、体散射、螺旋体散射能量。

2.3 基于特征选择及改进 GOPCE 的目标检测方法

基于极化参数融合的改进优化准则, 结合了极化特征选择及改进 GOPCE 的目标检测方法的具体流程如下:

- 1) 对极化 SAR 图像进行 PWF 滤波^[5], 设置极低虚警率, 获取部分目标样本, 同时采集部分杂波样本。
- 2) 对目标样本点与杂波样本像素点计算 $\mathbf{F}$ 中所有的极化特征, 并以 J_{new} 作为评估函数, 选择包含若干特征的最优特征组合 $\mathbf{F}_0$ 。
- 3) 利用最优特征组合 $\mathbf{F}_0$, 采用 J_{new} 作为优化函数求取最优系数向量 $\mathbf{x}$ 后, 获得改进 GOPCE 的增强图像。
- 4) 设定一定虚警概率, 检测所有目标像素。

3 实验结果与分析

实验采用的数据为 NASA/JPL 实验室 AIRSAR 系统 C 波段极化 SAR 数据, 采集于澳大利亚悉尼湾附近。图 1 为该图像的总功率图。

对该极化 SAR 图像分别采用原始 GOPCE 及结合特征选择的改进 GOPCE 进行处理。为公平起见, 改进的方法同样也采用 3 个目标极化特征。原始数据经过 PWF 滤波, 获取目标及杂波样本后, 应用极化特征选择算法, 得到了最优极化特征, 为: S_1, α 及 $\frac{|T_{12}|}{\text{Span}}$ 。对杂波像素及

目标像素进行统计后, 图 2 和图 3 分别为经过 2 种方法增强处理后目标及杂波分布的直方图, N 为样本数。可见改进方法中, 目标与杂波分布都具有更小的方差, 特别是杂波分布, 其主体宽度减小了约 5 dB。对比图 2 和图 3, 可明显看到改进的方法中目标与杂波分布的重叠更

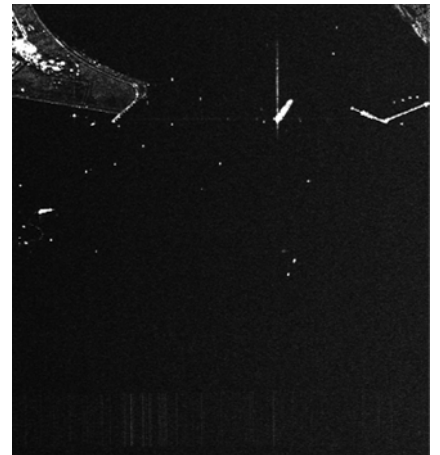


Fig.1 Span image
图 1 Span 图像

少,也就意味着两者具有了更高的区分度,虽然改进方法相对于原始 GOPCE 在信杂比上有了少许损失,但由于它同时对信杂比、目标及杂波分布的方差进行了优化,反而具有了更好的目标检测性能。

为更直观地比较原始 GOPCE 与改进方法的目标检测性能,图 4 中画出了 2 种方法对应的接收机工作性能曲线(ROC 曲线)。可见,改进方法对目标的检测性能有较为明显的提高,在相同虚警概率下,目标的检测概率提高了约 2%。设置虚警概率为 10^{-4} ,图 5 和图 6 分别为 2 种方法对应的目标检测结果,可见相同虚警率下,改进方法能检测出更多的目标像素。将图 5 和图 6 中的部分区域放大,在图 7 中显示了白色框中的 2 个区域中 2 种方法检测的结果,其中图 7(a)和图 7(b)为原始 GOPCE 方法,图 7(c)和图 7(d)为改进方法。可见,对于区域 I,改进方法检测出了左下角的微弱目标,而原始 GOPCE 方法没有检测出,此外该区域中有一艘由较多像素组成的大型舰船,改进的方法也将该目标内更多的像素检测为目标像素。类似地,在区域 II 中,原始的 GOPCE 漏检了左上方的小目标,而改进方法则将该目标检测了出来。由此可见,通过选择最优的特征组合,并对目标和杂波分布的方差进行约束后,改进的方法提高了目标检测性能。

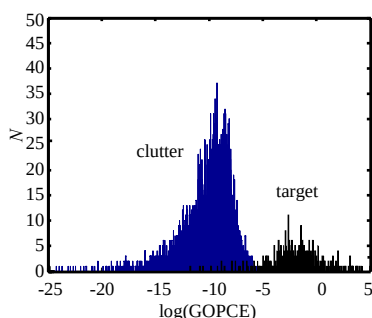


Fig.2 Target-clutter distribution of GOPCE
图 2 GOPCE 目标与杂波分布

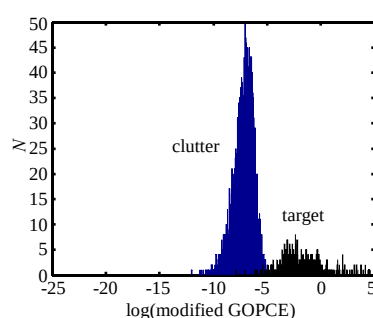


Fig.3 Target-clutter distribution of proposed method
图 3 新方法目标与杂波分布

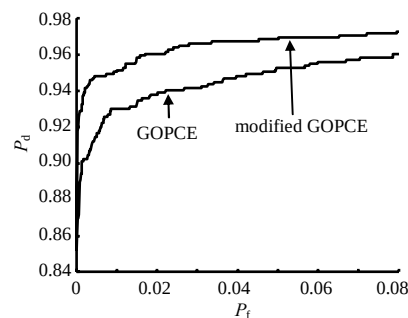


Fig.4 ROC curves
图 4 ROC 曲线

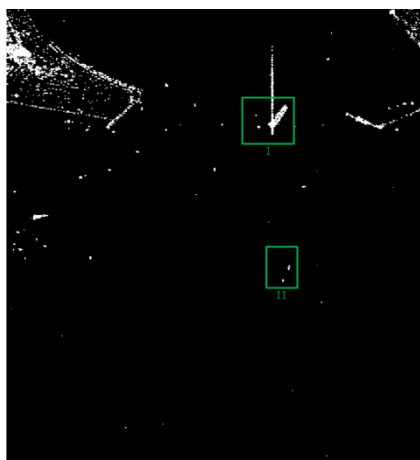


Fig.5 Detection result of GOPCE
图 5 GOPCE 检测结果

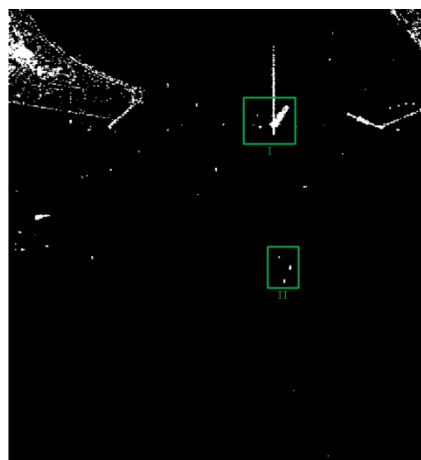


Fig.6 Detection result of the proposed method
图 6 新方法检测结果

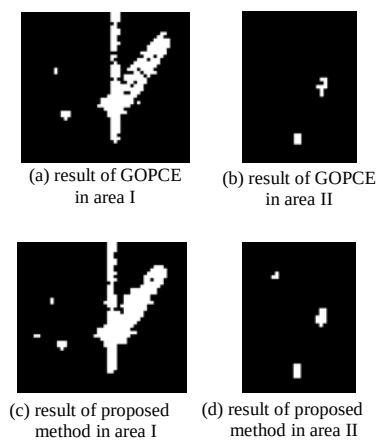


Fig.7 Detection results of area I and II
图 7 区域 I 和 II 的检测结果

4 结论

传统 GOPCE 中,对极化参数的最优系数向量的求解没有考虑目标与杂波的分布宽度。对此,本文提出了一个对最优系数向量求解的改进的优化准则,该准则同时考虑了最大化目标与背景的信杂比与最小化目标与杂波分布的方差,能最大程度减小目标与杂波分布的重叠。同时,该优化准则作为特征组合的评估函数,从一系列目标极化特征中选择最优的特征组合,作为改进 GOPCE 的极化参数。实验结果表明,结合特征选择与改进 GOPCE 的新方法提高了舰船目标的检测性能。此外在改进方法中,由于可灵活地根据目标与杂波的真实散射特性选择最优特征组合,因而在其他类型目标的检测应用中,如在一些利用相似性参数与极化熵区分度都不明显的目标的检测中,改进方法可有更灵活的应用。

参考文献:

- [1] LI J,Zelnio E G. Target Detection with Synthetic Aperture Radar[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996,32(2):613-627.

- [2] LIAO M, WANG C, Wang Y, et al. Using SAR Images to Detect Ships from Sea Clutter[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2):194–198.
- [3] Novak L M, Burl M C, Irving W W. Optimal Polarimetric Processing for Enhanced Target Detection[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(1):234–244.
- [4] Chaney R D, Bud M C, Novak L M. On the Performance of Polarimetric Target Detection Algorithms[J]. IEEE Aerospace Electronic Systems Magazine, 1990, 5(11):10–15.
- [5] Novak L M, Sechten M B, Cardullo M J. Studies of Target Detection Algorithms that Use Polarimetric Radar Data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2):150–165.
- [6] Touzi R, Charbonneau F, Hawkins R H. Ship-Sea Contrast Optimization When using Polarimetric SARs[C]// Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, Australia: [s.n.], 2001:426–428.
- [7] CHEN J, CHEN Y, YANG J. Ship Detection using Polarization Cross-Entropy[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2009, 6(4):723–727.
- [8] YANG J, DONG G, PENG Y, et al. Generalized Optimization of Polarimetric Contrast Enhancement[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2004, 1(3):171–174.
- [9] YANG J, ZHANG H, YAMAGUCHI Y. GOPCE Based Approach to Ship Detection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(6):1089–1093.
- [10] 崔一, 刘雨蒙, 杨健. 基于改进广义相对最优极化的极化 SAR 舰船检测方法[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2011, 51(3):424–427. (CUI Yi, LIU Yumen, YANG Jian. Ship Detection in Polarimetric SAR Images Based on Modified Generalized Optimization of the Polarimetric Contrast Enhancement[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2011, 51(3):424–427.)
- [11] Kostinski A B, Boerner W M. On the Polarimetric Contrast Optimization[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1987, 35(8):988–991.
- [12] Yang J, Yamaguchi Y, Boerner W M, et al. Numerical Methods for Solving the Optimal Problem of Contrast Enhancement[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(2):965–971.
- [13] YANG J, PENG Y, LIN S. Similarity between Two Scattering Matrices[J]. Electronics Letters, 2001, 37(3):193–194.
- [14] 陈体刚, 李彦佐. 全极化 SAR 图像中相干矩阵特征值及其应用[J]. 信息与电子工程, 2005, 3(3):161–166. (CHEN Ti gang, LI Yanzuo. Coherent Matrix Eigenvalue and Eigenvalue Index of Polarimetric SAR Images and Its Application of Bayes Classification[J]. Information and Electronic Engineering, 2005, 3(3):161–166.)
- [15] 张学工. 模式识别[M]. 北京:清华大学出版社, 2010. (ZHANG Xuegong. Pattern Recognition[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2010.)
- [16] 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 and Electronic Engineering, 2011, 9(2):127–132.)

作者简介:



焦智灏(1985–), 男, 江苏省江阴市人, 在读博士研究生, 主要从事极化SAR图像的目标特征提取及应用的研究. email: jiaozh03@mails.thu.edu.cn.

叶春茂(1981–), 男, 湖北省咸宁市人, 高级工程师, 博士, 主要从事雷达信号处理与系统设计、图像处理、目标识别等的研究.

杨健(1965–), 男, 湖北省襄樊市人, 教授, 博士生导师, 主要从事雷达极化、雷达遥感等理论的建模、最优极化处理以及模糊理论等研究.

宋建社(1954–), 男, 陕西省富平县人, 教授, 博士, 主要从事合成孔径雷达信号处理、图像处理、信息建模、系统工程等的研究.