

ENVISAT ASAR 交替极化模式目标检测性能分析

种劲松 李晓玮 韩昭颖

(中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室 北京 100080)

摘要: ENVISAT ASAR 具有交替极化模式, 可以提供 3 种双极化组合。该文针对 3 种双极化组合分别推导了几种目标检测器, 包括最优极化检测器、白化滤波检测器、张量检测器、单通道检测器等, 并使用 ROC 曲线对它们分别进行了性能比较。结果表明极化白化滤波检测器的性能最接近于理想的最优极化检测器, 极大地提高了检测性能。

关键词: 合成孔径雷达; 交替极化; 目标检测

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2359-04

Analysis of Target Detection Performance on ENVISAT ASAR Alternating Polarization Mode

Chong Jin-song Li Xiao-wei Han Zhao-ying

(National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The ENVISAT ASAR can operate on Alternating Polarization (AP) mode, which can provide three different dual polarization combinations. This paper derives target detectors for three different dual polarization combinations. The detection performance is compared using ROC curve. The results indicate that the Polarimetric Whiting Filter (PWF) detector is the best detector which approaches the performance of the ideal Optimized Polarimetric Detector (OPD) and can improve the detection performance.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Alternating Polarization (AP); Target detection

1 引言

利用合成孔径雷达(SAR)多极化信息进行目标检测是当前SAR应用研究的一个主要方向, 并开始于 1980 年代末。其中以美国MIT林肯实验室Novak等人的工作为代表。1989年, Novak利用全极化数据进行地面杂波背景中的坦克目标检测, 推导了最优极化检测器(OPD)^[1]。1990年, Novak提出了基于全极化数据的极化白化滤波(PWF)方法^[2]。1990年底, Chaney比较了几种不同的全极化目标检测算法^[3], 包括OPD, PWF, 张量检测器, 单通道检测器等, 并得出PWF是检测性能和所需预先统计量之间最好折衷的结论。

上述目标检测算法都是基于林肯实验室机载全极化数据进行的, 但目前国内可以通过商业途径获取的多极化数据源只有欧洲空间局ENVISAT卫星搭载的ASAR。ENVISAT ASAR具有 5 种工作模式, 其中交替极化(Alternating Polarization, AP)模式具有 3 种双极化组合^[4]: HH/VV, HH/HV和VV/VH, 可以提供相同场景同时获取的两种极化图像。然而, 目前针对ENVISAT ASAR双极化组合进行目标检测性能分析的研究尚未见报道。

本文在 Novak 全极化目标检测器的基础上, 推导了针对 ENVISAT ASAR AP 模式双极化组合的几种目标检测器,

并通过计算检测概率和虚警概率生成经典的检测性能 ROC (Receiver Operating Characteristic)曲线, 用于对检测器性能进行衡量与分析。

2 AP 模式双极化目标检测器

考虑到ENVISAT ASAR AP模式双极化组合特点, 本节对双极化组合测量矢量和协方差矩阵进行建模, 并将几种常用的全极化目标检测器推广到双极化组合中。

2.1 双极化组合模型表示

一般假设全极化雷达测量矢量 $\mathbf{X} = [s_{hh} \ s_{hv} \ s_{vv}]^T$ 服从零均值联合复高斯分布, 则

$$f(\mathbf{X}) = \frac{1}{\pi^3 |\Sigma|} \exp[-\mathbf{X}^H \Sigma^{-1} \mathbf{X}] \quad (1)$$

其中 $\Sigma = E\{\mathbf{X}\mathbf{X}^H\}$ 是极化测量矢量的协方差矩阵, E 表示数学期望, H 表示复共轭转置。

$$\Sigma = \sigma_{HH} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \rho\sqrt{\gamma} \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & 0 & \gamma \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 $\sigma_{HH} = E\{|HH|^2\}$, $\varepsilon = \frac{E\{|HV|^2\}}{E\{|HH|^2\}}$, $\gamma = \frac{E\{|VV|^2\}}{E\{|HH|^2\}}$,

$\rho = \frac{E\{HH \cdot VV^*\}}{\sqrt{E\{|HH|^2\}E\{|VV|^2\}}}$, “*”代表复共轭。因此, 可以用

这4个协方差参数 $(\sigma_{\text{HH}}, \varepsilon, \gamma, \rho)$ 来描述全极化协方差矩阵。

针对 ENVISAT ASAR 双极化组合的情况, 极化测量矢量可以表示为二维矢量, 不同极化组合的极化测量矢量对应的协方差矩阵也不相同, 下面具体给出:

(1)对于 HH/VV 组合:

$$\begin{aligned} \text{极化测量矢量为 } \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} \text{HH} \\ \text{VV} \end{bmatrix}, \text{ 对应的协方差矩阵为} \\ \boldsymbol{\Sigma} &= E(\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^{\text{H}}) = E \begin{bmatrix} \text{HH} \cdot \text{HH}^* & \text{HH} \cdot \text{VV}^* \\ \text{VV} \cdot \text{HH}^* & \text{VV} \cdot \text{VV}^* \end{bmatrix} \\ &= \sigma \begin{bmatrix} 1 & \rho\sqrt{\gamma} \\ \rho^*\sqrt{\gamma} & \gamma \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3)$$

(2)对于 HH/HV 组合:

$$\begin{aligned} \text{极化测量矢量为 } \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} \text{HH} \\ \text{HV} \end{bmatrix}, \text{ 对应的协方差矩阵为} \\ \boldsymbol{\Sigma} &= E(\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^{\text{H}}) = E \begin{bmatrix} \text{HH} \cdot \text{HH}^* & \text{HH} \cdot \text{HV}^* \\ \text{HV} \cdot \text{HH}^* & \text{HV} \cdot \text{HV}^* \end{bmatrix} \\ &= \sigma \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \varepsilon \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

(3)对于 VV/VH 组合:

$$\begin{aligned} \text{极化测量矢量为 } \mathbf{X} &= \begin{bmatrix} \text{VV} \\ \text{VH} \end{bmatrix}, \text{ 对应的协方差矩阵为} \\ \boldsymbol{\Sigma} &= E(\mathbf{X} \cdot \mathbf{X}^{\text{H}}) = E \begin{bmatrix} \text{VV} \cdot \text{VV}^* & \text{VV} \cdot \text{VH}^* \\ \text{VH} \cdot \text{VV}^* & \text{VH} \cdot \text{VH}^* \end{bmatrix} \\ &= \sigma \begin{bmatrix} \gamma & 0 \\ 0 & \varepsilon \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\sigma, \varepsilon, \gamma, \rho$ 与全极化协方差矩阵中的元素定义相同。

通常的极化目标检测器将极化SAR图像按照式 $y = \mathbf{X}^{\text{H}} \mathbf{B} \mathbf{X}$ 进行加权融合, 然后将融合结果通过阈值检测器来检测目标。因此极化目标检测器的一般形式为

$$\mathbf{X}^{\text{H}} \mathbf{B} \mathbf{X} > T_D \quad (6)$$

其中 \mathbf{X} 为极化测量矢量, \mathbf{B} 为加权矩阵, T_D 为检测门限, 则检测准则表达为

$$\begin{cases} y > T_D, \text{ 目标} \\ y < T_D, \text{ 背景} \end{cases}$$

2.2 双极化最优极化检测器

最优极化检测器(OPD)^[1]是Neyman-Pearson准则下的对数似然比检测, 判决方程为

$$y = \mathbf{X}^{\text{H}} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \mathbf{X} > T_D \quad (7)$$

其中 T_D 为检测门限, $\boldsymbol{\Sigma}_c$ 为背景杂波协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_c = E\{\mathbf{X}_c \cdot \mathbf{X}_c^{\text{H}}\}$, $\boldsymbol{\Sigma}_{t+c}$ 表示目标存在情况下的协方差矩阵 $\boldsymbol{\Sigma}_{t+c} = E\{\mathbf{X}_{t+c} \cdot \mathbf{X}_{t+c}^{\text{H}}\}$ 。

由于 OPD 检测器必须预先已知目标和背景杂波的统计

量, 是一种理想情况下的目标检测器。

将Novak等人提出的针对全极化SAR数据的OPD检测器推广到双极化中来, 使用2.1节中不同双极化组合对应的极化测量矢量和极化协方差矩阵代入式(7), 可以得到不同极化组合下的OPD检测模型。

(1)对于 HH/VV 双极化组合:

$$\begin{aligned} y &= \mathbf{X}^{\text{H}} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \mathbf{X} \\ &= \begin{bmatrix} \text{HH}^* & \text{VV}^* \end{bmatrix} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \begin{bmatrix} \text{HH} \\ \text{VV} \end{bmatrix} > T_D \end{aligned} \quad (8)$$

(2)对于 HH/HV 双极化组合:

$$\begin{aligned} y &= \mathbf{X}^{\text{H}} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \mathbf{X} \\ &= \begin{bmatrix} \text{HH}^* & \text{HV}^* \end{bmatrix} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \begin{bmatrix} \text{HH} \\ \text{HV} \end{bmatrix} > T_D \end{aligned} \quad (9)$$

(3)对于 VV/VH 双极化组合:

$$\begin{aligned} y &= \mathbf{X}^{\text{H}} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \mathbf{X} \\ &= \begin{bmatrix} \text{VV}^* & \text{VH}^* \end{bmatrix} (\boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} - \boldsymbol{\Sigma}_{t+c}^{-1}) \begin{bmatrix} \text{VV} \\ \text{VH} \end{bmatrix} > T_D \end{aligned} \quad (10)$$

2.3 双极化白化滤波检测器

极化白化滤波器(PWF)^[2]希望通过最优化加权矩阵 \mathbf{B} 能够最大程度降低融合图像 $y = \mathbf{X}^{\text{H}} \mathbf{B} \mathbf{X}$ 中的相干斑噪声, 由此而推导出 $\mathbf{B} = \boldsymbol{\Sigma}_c^{-1}$, \mathbf{B} 是一种白化滤波器, 因此 $y = \mathbf{X}^{\text{H}} \boldsymbol{\Sigma}_c^{-1} \mathbf{X}$ 被称为极化白化滤波。对于高斯模型杂波, 全极化PWF融合算法表达式^[2]:

$$\begin{aligned} y &= \frac{|\text{HH}|^2}{\sigma_{\text{HH}}(1-|\rho|^2)} + \frac{|\text{VV}|^2}{\sigma_{\text{HH}}(1-|\rho|^2)\gamma} + \frac{|\text{HV}|^2}{\sigma_{\text{HH}}\varepsilon} \\ &\quad - \frac{2|\rho|}{\sigma_{\text{HH}}(1-|\rho|^2)\sqrt{\gamma}} |\text{HH}| |\text{VV}| \cos(\phi_{\text{HH}} - \phi_{\text{VV}} - \phi_{\rho}) \end{aligned} \quad (11)$$

其中 $\phi_{\text{HH}}, \phi_{\text{VV}}$ 和 ϕ_{ρ} 分别为HH, VV和 ρ 的相位值。

经推导, 针对双极化组合模型的PWF检测器如下:

(1)对于 HH/VV 双极化组合:

$$\begin{aligned} y &= \frac{|\text{HH}|^2}{\sigma_{\text{HH}}(1-|\rho|^2)} + \frac{|\text{VV}|^2}{\sigma_{\text{HH}}(1-|\rho|^2)\gamma} \\ &\quad - \frac{\rho \text{HHVV}^* + \rho^* \text{HH}^* \text{VV}}{\sigma_{\text{HH}}(1-|\rho|^2)\sqrt{\gamma}} > T_D \end{aligned} \quad (12)$$

(2)对于 HH/HV 双极化组合:

$$y = \frac{|\text{HH}|^2}{\sigma_{\text{HH}}} + \frac{|\text{HV}|^2}{\sigma_{\text{HH}}\varepsilon} > T_D \quad (13)$$

(3)对于 VV/VH 双极化组合:

$$y = \frac{|\text{VV}|^2}{\sigma_{\text{HH}}\gamma} + \frac{|\text{VH}|^2}{\sigma_{\text{HH}}\varepsilon} > T_D \quad (14)$$

2.4 双极化张量检测器

张量(SPAN)检测器^[3]是广泛使用的处理方法, 是将所有极化通道进行非相干加权, 对于全极化数据, 加权矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{ 因此全极化SPAN检测器可以表示为}$$

$$|HH|^2 + 2|HV|^2 + |VV|^2 > T_D \quad (15)$$

针对双极化组合模型, $B=\text{diag}(1,1)$, 其中 diag 表示对角矩阵, 则 SPAN 检测器可以表示为

(1)对于 HH/VV 双极化组合:

$$y = \begin{bmatrix} HH^* & VV^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HH \\ VV \end{bmatrix} = |HH|^2 + |VV|^2 > T_D \quad (16)$$

(2)对于 HH/HV 双极化组合:

$$y = \begin{bmatrix} HH^* & HV^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} HH \\ HV \end{bmatrix} = |HH|^2 + |HV|^2 > T_D \quad (17)$$

(3)对于 VV/VH 双极化组合:

$$y = \begin{bmatrix} VV^* & VH^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} VV \\ VH \end{bmatrix} = |VV|^2 + |VH|^2 > T_D \quad (18)$$

2.5 单通道检测器

这是最简单的检测器, 只使用某个通道进行检测, 例如

用 HH 极化通道检测时, 全极化加权矩阵为 $B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,

检测准则为 $|HH|^2 > T_D$ 。

为了统一表达, 本文也对双极化中单通道检测进行了建模。

(1)对于 HH/HV 双极化组合:

$$\text{HH 通道 } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ HV 通道 } B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2)对于 HH/VV 双极化组合:

$$\text{HH 通道 } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ VV 通道 } B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(3)对于 VV/VH 双极化组合:

$$\text{VV 通道 } B = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ VH 通道 } B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

3 ENVISAT ASAR AP 模式双极化目标检测性能比较

3.1 检测概率和虚警概率的计算

为进行双极化检测器的性能分析, 需要计算检测概率和虚警概率, 核心就是要计算随机量 $y = \mathbf{X}^H \mathbf{B} \mathbf{X}$ 的概率密度函数。

一般地, 可以假设二维双极化测量矢量 \mathbf{X} 服从零均值复高斯分布模型, 即 $f(\mathbf{X}) = \frac{1}{\pi^2 |\Sigma|} \exp(-\mathbf{X}^H \Sigma^{-1} \mathbf{X})$, 可以求取 y 的概率密度函数。由于直接求取比较困难, 可以通过变换的方法。

计算 y 的特征函数:

$$\phi_y(j\omega) = \iiint_{\infty} \exp\{j\omega(\mathbf{X}^H \mathbf{B} \mathbf{X})\} \times \frac{1}{\pi^2 |\Sigma|} \cdot \exp\{-\mathbf{X}^H \Sigma^{-1} \mathbf{X}\} d\mathbf{X} \quad (19)$$

做线性变换 $\mathbf{X} = \mathbf{A} \mathbf{Y}$, 应满足同时对角化和单位化的条件, 即: $\mathbf{A}^H \mathbf{B} \mathbf{A} = \Lambda = \text{diag}(\lambda_i)$ 和 $\mathbf{A}^H \Sigma^{-1} \mathbf{A} = \mathbf{I}$, 其中, λ_i 表示矩阵 Σ 的特征值, \mathbf{I} 为单位矩阵。将条件代入式(19), 可得:

$$\phi_y(j\omega) = \prod_{i=1}^2 \frac{1}{(1 - j2\lambda_i \omega)} \quad (20)$$

由特征函数性质可以对特征函数进行逆变换得到 y 概率密度函数, 即

$$f(y) = \xi^{-1}\{\phi_y(-j\omega)\} = \xi^{-1}\left\{\prod_{i=1}^2 \frac{1}{(1 + j2\lambda_i \omega)}\right\} = \begin{cases} \frac{1}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} e^{-\frac{y}{2\lambda_1}} - \frac{1}{2(\lambda_1 - \lambda_2)} e^{-\frac{y}{2\lambda_2}}, & \lambda_1 \neq \lambda_2 \\ \frac{y}{2\lambda} e^{-\frac{y}{2\lambda}}, & \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \end{cases} \quad (21)$$

其中 $\xi^{-1}(\cdot)$ 表示特征函数的逆变换。利用 $f(y)$ 即可以求得检测率或虚警率:

$$P_{D/FA} = \int_T^{\infty} f(y) dy = \begin{cases} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\frac{T}{2\lambda_1}} - \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} e^{-\frac{T}{2\lambda_2}}, & \lambda_1 \neq \lambda_2 \\ 2\lambda e^{-\frac{T}{2\lambda}} + T e^{-\frac{T}{2\lambda}}, & \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda \end{cases} \quad (22)$$

其中 T 为检测门限。当 $\Sigma = \Sigma_c$ 时, 即求虚警率 P_{FA} , $f(y)$ 对应的是杂波的概率密度函数; 当 $\Sigma = \Sigma_{t+c}$ 时, 即求检测率 P_D , $f(y)$ 对应的是目标加杂波的概率密度函数。

3.2 检测性能比较分析

本文利用购买的 ENVISAT ASAR AP 模式 3 个不同双极化组合的实际数据作为数据源, 选择海上舰船和海面背景分别作为目标和杂波背景, 进行极化协方差矩阵参数估计, 用于分析比较不同极化目标检测器的性能。表 1-表 3 为 3 种双极化组合下的极化协方差矩阵参数。

表 1 HH/VV 双极化组合协方差矩阵参数

	σ	γ	ρ
海洋背景	2.3349e+003	1.6052	-0.0001-0.0000i
舰船目标	1.7369e+005	0.8829	-0.0027-0.0068i

表 2 HH/HV 双极化组合协方差矩阵参数

	σ	ε
海洋背景	1.0181e+005	0.0116
舰船目标	4.2765e+005	0.3315

表 3 VV/VH 双极化组合协方差矩阵参数

	$\sigma\gamma$	$\sigma\varepsilon$
海洋背景	0.0240	1.9655e+004
舰船目标	0.0368	8.6595e+005

在不同的目标杂波比(T/C)^[1]下,通过选择不同的检测门限 T ,根据式(22)可以得到对应的检测概率和虚警概率,从而构造经典的ROC曲线来衡量检测性能。图1—图3分别为3种极化组合在不同目标杂波比($T/C=3\text{dB}$ 和 $T/C=10\text{dB}$)下的检测性能ROC曲线。

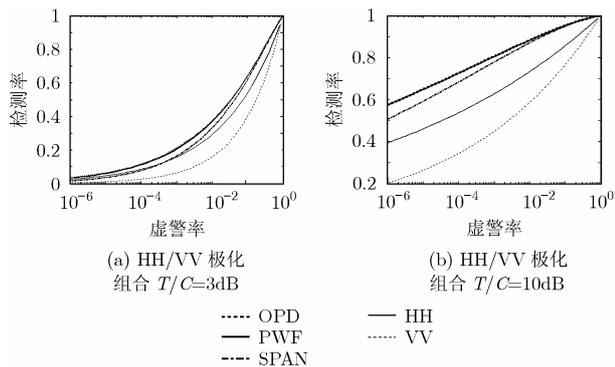


图1 HH/VV极化组合检测器性能ROC曲线

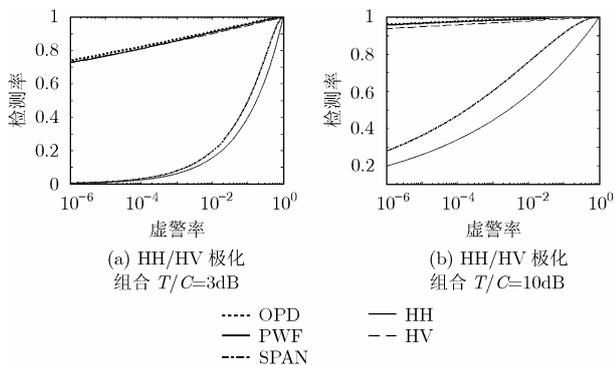


图2 HH/HV极化组合检测器性能ROC曲线

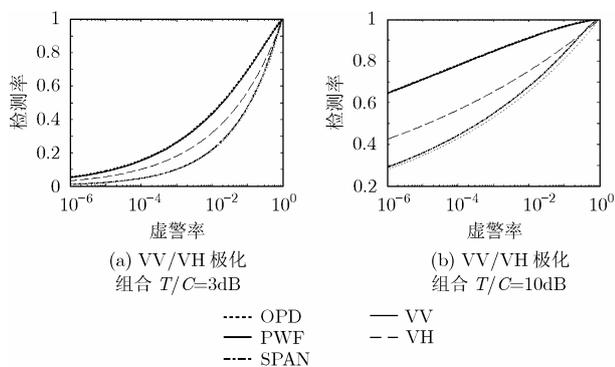


图3 VV/VH极化组合检测器性能ROC曲线

由图1—图3可以看出,对于HH/VV双极化组合,检测器性能排序如下:OPD>PWF>SPAN>HH>VV;对于

HH/HV双极化组合,检测器性能排序如下:OPD>PWF>HV>SPAN>HH;对于VV/VH双极化组合,检测器性能排序如下:OPD>PWF>VH>SPAN>VV。

由此可以得出如下结论:

(1)理想的OPD检测器是Neymann-Pearson准则下最优的检测器,它的检测性能是所有其它检测器的上限。

(2)PWF检测器与理想的OPD检测器最为接近,达到极好的检测效果。这是由于PWF检测器使用了双极化通道的融合数据,同时利用了极化统计特性,比SPAN检测器和单通道检测器的检测性能明显提高,并接近于OPD检测器,具有实际应用价值。

(3)SPAN检测器虽然使用了多个极化通道,但由于没有利用任何杂波和目标的极化统计特性,其检测性能明显低于PWF和OPD检测器。同时,SPAN检测器性能并不总是优于单通道,有时甚至比单通道的检测性能还差。

(4)交叉极化(即HV或VH)单通道检测性能较高。特别是在HH/HV双极化组合时,HV单通道检测的性能几乎接近于PWF检测性能。由于PWF检测比单通道检测速度慢,因此HH/HV双极化组合时,选择HV单通道检测是检测性能与检测速度之间的折衷。

4 结束语

本文针对ENVISAT ASAR AP模式推导了双极化组合的目标检测器,使用ROC曲线进行检测器性能比较,从而实现了双极化信息对目标检测性能改善的定量分析。双极化信息极大地提高了目标检测性能,显示了ENVISAT ASAR AP模式数据在目标检测应用中的前景。即将发射的德国TerraSAR和加拿大Radarsat2都将具有全极化模式,有理由相信使用全极化数据比双极化数据目标检测性能会更好。

参考文献

- [1] Novak L M, Sechen M B, and Cardullo M J. Studies of target detection algorithms that use polarimetric data. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1989, 25(2): 150-165.
- [2] Novak L M and Burl M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1990, 26(2): 293-305.
- [3] Chaney R D, Bud M C, and Novak L M. On the performance of polarimetric target detection algorithms. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1990, 5(11):10-15.
- [4] European Space Agency. ENVISAT ASAR science and applications. ESA Publication SP-1225, http://earth.esa.int/pub/ESA_DOC/SP_1225.pdf, SP-1225, Nov. 1998.

种劲松: 女, 1969年生, 研究员, 从事专业为海洋目标监视、遥

感图像处理.

李晓玮: 男, 1982 年生, 硕士生, 从事专业为信号与信息处理.

韩昭颖: 女, 1982 年生, 硕士生, 从事专业为信号与信息处理.