

## 基于体散射约束的极化SAR相干变化检测方法

冀广宇 梁兴东 董勇伟\* 李焱磊

(中国科学院电子学研究所微波成像技术重点实验室 北京 100190)

(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 相干变化检测(CCD)利用场景中变化区域的失相干特性进行检测,而场景中存在的体散射植被区域及低信噪比区域也呈现低相干特性,对待检测变化区域形成干扰。该文提出一种极化SAR CCD方法,首先利用变化前后SAR图像间的极化相干信息建立加权迹相干统计量,然后利用各个SAR图像内极化通道间的相干信息,通过建立混合GEV分布模型,采用改进EM算法求解各分量参数,建立体散射约束项,最后结合散射功率变化约束项构建极化CCD检验统计量。该方法可在不影响检测性能情况下排除干扰。该文采用变化前后的两幅L波段全极化SAR图像进行方法验证,实验结果及指标参数验证了该方法的正确性与有效性。

**关键词:** 极化合成孔径雷达; 相干变化检测; 极化相干信息; 体散射; EM算法

中图分类号: TP751.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2018)10-2461-09

DOI: 10.11999/JEIT180035

## Polarimetric SAR Coherent Change Detection Method Based on Volume Scattering Constraint

Ji Guangyu LIANG Xingdong DONG Yongwei LI Yanlei

(Key Laboratory of Science and Technology on Microwave Imaging, Institute of Electronics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Coherent Change Detection (CCD) detects change areas in the scene using its decorrelation, yet vegetation areas with volume scattering and low signal-noise ratio areas in the scene also appear as low coherence, which causes interference to change areas to be detected. A polarimetric SAR CCD method is proposed. Firstly, the polarimetric coherence between two SAR images before and after changing is employed to set up weighted trace coherence statistics. Secondly, the polarimetric coherence between channels of each SAR image is employed to set up volume scattering constraint by establishing GEV mixture distribution model and solving parameters of each part using improved EM algorithm. Lastly, constraint of scattering power change is combined to set up the final polarimetric CCD test statistics. Using this method, the interference could be eliminated without influence of detect performance. The method is validated by two L-band full-polarimetric SAR images before and after changing. Results and index parameters demonstrate the correctness and validity of the proposed method.

**Key words:** Polarimetric Synthetic Aperture Radar (SAR); Coherent Change Detection (CCD); Polarimetric coherence information; Volume scattering; EM algorithm

### 1 引言

相干变化检测(Coherent Change Detection, CCD)利用合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的相位相干性信息,对同一场景在两次数据获取时间段内发生的变化进行检测。与只利用图像强度/幅度信息的传统变化检测方法相比,

CCD通过变化场景呈现的低相干或失相干特性,可以检测出散射强度无明显差异的微小变化,如车辙印迹,土壤翻动痕迹等。但是,由于SAR图像中相干性信息对变化的敏感度极高<sup>[1]</sup>,场景中某些非感兴趣的变化区域由于其自身特性,极易被误检为变化区域。它们通常分为两类:一类是该区域自身信噪比低,使得噪声相位的随机性变化成为主导,形成低相干特性,这一类区域主要为水面、道路等低散射强度区域及雷达阴影区域;另一类是随着时

收稿日期: 2018-01-10; 改回日期: 2018-05-02; 网络出版: 2018-07-30

\*通信作者: 董勇伟 ywdong@mail.ie.ac.cn

间变化发生明显去相干特性的区域,这一类区域主要为植被生长,风吹微扰的自然变化区域。这些干扰区域在CCD中形成虚警,且仅通过单一极化SAR图像及其相干变化差异图像提供的信息难以将其提取并排除,较大程度影响了CCD的检测性能。

SAR的极化信息能够更加全面地反映目标的散射特性:极化SAR发射并接收水平与垂直极化电磁波,通过组合得到目标的全极化散射强度与相位信息,利用它们构成的极化相干性信息可以获得比单极化更好的检测效果<sup>[2]</sup>。在场景变化前后的两景极化SAR图像中,极化相干信息分为图像内极化相干信息与图像间极化相干信息,目前国内外学者利用极化相干信息进行变化检测方面做了许多研究工作,建立了一些极化相干变化检验统计量,大体分为两类,第1类检验统计量使用变化前后两景图像的图像内极化相干信息的比较结果构建检验统计量,包括基于复Wishart分布的似然比统计量<sup>[3-5]</sup>,散射机制间测地线距离<sup>[6]</sup>,最优极化状态下变化检测特征量<sup>[7]</sup>;第2类检验统计量使用图像间极化相干信息构建检验统计量,包括基于复高斯模型的对数似然比统计量<sup>[2]</sup>,极大似然相干估计量<sup>[8]</sup>,迹相干统计量<sup>[9]</sup>。第1类统计量可以获得更精细的差异图轮廓,但是相干变化的检测精度低于第2类统计量,这是由两种极化相干信息的差异导致的,具体内容在第2节介绍。以上方法建立的极化相干变化检验统计量,其检测效果大多是统计意义上检测性能的提升,并没有利用极化信息对呈现低相干特征的不同类型区域加以有效的区分。还有一些学者针对不同的场景选择具有适应性的变化检测方法:文献<sup>[10]</sup>在建立统计量的同时兼顾信噪比估计,减小了低信噪比引起的低相干效应;文献<sup>[11]</sup>针对季节性冰雪覆盖场景的极化SAR图像选择相适应的CCD方法,对于呈现表面散射的积雪区域和体散射的植被区域形成良好区分度,并由此监测冰雪覆盖面积的变化。

在全极化观测模式下,不同类型目标呈现出不同的极化散射机理。植被区域因其空间结构特性在极化观测下呈现体散射特性,我们本文感兴趣的变化区域主要出现在裸地、土地、湖面、房屋结构等地方,这些区域在极化观测下呈现表面散射(包括单次与2次散射)特性,这样通过引入全极化观测维度可以将产生变化检测干扰的植被区域提取并排除,降低检测结果的虚警率。与此同时,相比于单一极化,目标在全极化观测模式下可以展示出更加丰富的相干变化信息,从而避免目标的变化信息因正交于某种单一极化方式而不能被检测出造成的漏检情况<sup>[9]</sup>。

基于上述原理,本文提出一种极化CCD方法。该方法针对变化前后的两景极化SAR图像,先利用图像间的极化相干信息构建加权迹相干统计量检测场景中变化区域,再利用图像内极化相干信息构建约束项,去除场景中低信噪比区域及植被低相干区域造成的虚警影响。本文方法适用的场景广泛存在于军事、农业、灾害监测等各个领域,并通过实验数据表明,本文方法能够有效减小低相干干扰区域造成的影响。

本文的结构安排如下:第2节介绍极化相干模型,第3节为极化CCD算法原理与流程,第4节为实验数据验证与分析,第5节为结论。

## 2 极化相干模型

单站全极化SAR系统对目标探测,得到目标的两个同极化散射量(HH, VV)以及一个交叉极化散射量(HV)。对于场景中同一目标,变化前后观测到的两幅极化SAR图像形成一组联合6维向量 $\mathbf{k}$ :

$$\mathbf{k} = \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 & \mathbf{k}_2 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} s_{hh} & \sqrt{2}s_{hv} & s_{vv} & t_{hh} & \sqrt{2}t_{hv} & t_{vv} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

其中,  $s_{xy}$  和  $t_{xy}$  中分别包含变化前后观测图像中目标在各极化通道中的回波功率,式(1)中引入的因子 $\sqrt{2}$ 是为了保证总功率守恒。由式(1)的向量可以得到包含目标极化相干信息的6维联合极化协方差矩阵:

$$\mathbf{C}_6 = \langle \mathbf{k} \cdot \mathbf{k}^H \rangle = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{11} & \mathbf{C}_{12} \\ \mathbf{C}_{12}^H & \mathbf{C}_{22} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,  $\langle \cdot \rangle$  表示在一定窗口范围内求统计平均,上标H表示共轭转置。

$\mathbf{C}_6$ 可分成4个 $3 \times 3$ 的子阵,其中,  $\mathbf{C}_{12}$ 称作变化前后两幅图像的极化互协方差矩阵,包含图像间极化相干信息,其中各项表示不同极化状态组合的相干变化信息。 $\mathbf{C}_{11}$ 和 $\mathbf{C}_{22}$ 称作单幅极化SAR图像的极化协方差矩阵,包含图像内极化相干信息,可表示为目标不同散射机制的线性组合。下面所提出的极化CCD方法就是从这两类极化相干信息中设计检验统计量。

## 3 极化CCD方法

本文提出的极化CCD方法,其目的是检测出场景中呈现低相干特性的目标变化区域,同时排除同样呈现低相干特性的干扰区域,这种干扰区域主要包括广泛存在于各类待检测场景中的阴影,水面等低信噪比区域以及易受生长、风吹等因素影响的植被区域。基本原理为:利用极化SAR丰富的极化

相干信息，一方面更精细地检测出各种极化方式下呈现出的低相干区域，提高检测率；另一方面将同为低相干特性的目标变化区域与干扰区域差异化并将后者排除，降低虚警率。本文提出的方法流程如图1所示。需要注意的是：本文方法所使用的变化前后两景极化SAR图像需要精确的数据获取与必要的预处理操作，以保证图像质量与极化相干信息的精度。图像的获取需要满足重轨干涉的需求。预处理操作具体包括极化校正，辐射校正与图像配准，其中前一项采用方法与精度要求参考文献[12]，后两项参考文献[13]。这些内容在此处不是研究重点，因而不在于本文赘述。下面按照图1所示方法流程对各个处理步骤作详细介绍。

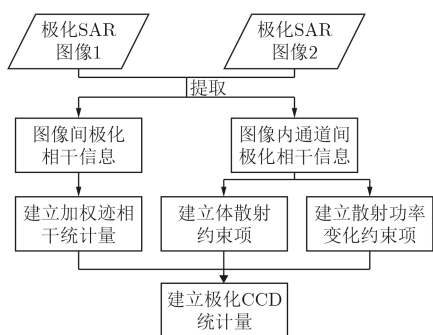


图1 极化CCD方法流程图

### 3.1 加权迹相干统计量

目标的3个极化散射观测量  $s_{hh}$ ,  $\sqrt{2}s_{hv}$  与  $s_{vv}$  构成极化空间内的一组标准正交基，通过归一化线性组合投影向量  $\mathbf{w}$  可表征任意一种极化状态。极化空间上的每一种极化状态对应被观测目标变化前后的一个复相干系数，其在所有极化状态下形成相干区域(coherent region)。从相干区域中提取检验统计量，一种方式为求取相干区域的质心，这样得到的统计量避免了目标在不同极化状态下呈现较大相干性差异导致变化的误检或漏检。

在实际场景中，植被因生长或受风吹等环境影响造成的变化不是我们本文感兴趣的目标变化，而植被区域的大部分散射机制为体散射，根据各种极化目标分解模型[14]可知，交叉极化通道中的散射成分表现为体散射。因此，为了减小体散射低相干对变化检测的影响，我们采用复相干系数的加权平均值作为检验统计量，并将权重加在投影向量上，得到加权投影向量：

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{V}\mathbf{w} \\ \mathbf{V} &= \text{diag}(1, \sqrt{\alpha}, 1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中， $\text{diag}(a_{11} \ a_{22} \ \dots \ a_{nn})$  表示为  $n$  阶对角矩阵，

$\alpha$  为加权系数，取值范围为  $[0, 1]$ 。于是得到相干区域的加权质心统计量：

$$\gamma_w = \frac{1}{S} \int_{\Theta} \frac{\mathbf{w}^H \mathbf{V}^H \mathbf{C}_{12} \mathbf{V} \mathbf{w}}{\sqrt{\mathbf{w}^H \mathbf{V}^H \mathbf{C}_{11} \mathbf{V} \mathbf{w} \cdot \mathbf{w}^H \mathbf{V}^H \mathbf{C}_{22} \mathbf{V} \mathbf{w}}} d\mathbf{w} \quad (4)$$

其中， $\Theta$  为投影向量  $\mathbf{w}$  的支撑域，即单位球面， $S$  为单位球表面积。用加权迹相干统计量对  $\gamma_w$  逼近[9]，得：

$$\gamma_{w, \text{tr}} = \frac{\text{Trace}(\mathbf{V}^H \mathbf{C}_{12} \mathbf{V})}{\sqrt{\text{Trace}(\mathbf{V}^H \mathbf{C}_{11} \mathbf{V}) \text{Trace}(\mathbf{V}^H \mathbf{C}_{22} \mathbf{V})}} \quad (5)$$

文献[9]分析了各种情况下使用迹相干统计量对相干区域质心近似的误差，在极端情况下幅值误差低于0.09。在加权迹相干统计量对  $\gamma_w$  的近似中仍然可以保持相同量级的误差，这是由于可以将  $\mathbf{V}^H \mathbf{C}_{12} \mathbf{V}$  看作一个整体矩阵代入到文献[9]分析的各种情况中，具体分析这里不再阐述。

本文中，我们要尽可能减小植被区域体散射低相干的影响，因此  $\alpha$  的取值要尽可能小；然而，求取矩阵的迹过程中，极化通道之间的相加运算可有效提高数据的信噪比，若  $\alpha$  趋近于0，则相当于非相干叠加过程少了一个通道的数据，使得信噪比有所降低。我们本文从待检测场景中获取先验知识，选取  $\alpha$  值为场景中非体散射区域所占百分比，具体计算方法为，以第3.2.2节求取的体散射响应度为统计量，计算其低于门限值(取为0.5)的像素点占总像素点的百分比，求取变化前后两幅图像中该百分比的均值，即为  $\alpha$  值。

### 3.2 体散射约束项

我们本文通过变化前后两幅SAR图像各自的极化协方差矩阵提供的相干信息建立约束项，达到区分不同类型低相干区域的目的。呈现低相干特性的干扰区域主要来自呈现体散射特性的植被变化区域以及由随机噪声构成的低信噪比区域，本小节建立约束项的目的即将这两种散射特点的区域从场景中提取出来并排除之。

**3.2.1 建立通道间相干统计量** 文献[11]提出一种通道间相干统计量  $\rho_{\tilde{G}} = \langle s_{hh} s_{vv}^* \rangle / \text{span}$ ，其中  $\text{span} = \langle |s_{hh}|^2 \rangle + \langle 2|s_{hv}|^2 \rangle + \langle |s_{vv}|^2 \rangle$  为散射总功率。该统计结果可以把场景分成体散射主导区域(呈现低相干特性)和表面散射主导区域(呈现高相干特性)。但是，对于两个同极化通道功率  $\langle |s_{hh}|^2 \rangle$  与  $\langle |s_{vv}|^2 \rangle$  存在较大差异的区域，会因得到一个  $|\rho_{\tilde{G}}|$  的低相干结果而将其与体散射区域误分为同类。对此，本文提出一种改进的通道间相干统计

量, 表达式为

$$\rho_G = \frac{\langle s_{hh} s_{vv}^* \rangle}{\text{span}} \left( \sqrt{\gamma} + \frac{1}{\sqrt{\gamma}} \right) \quad (6)$$

其中,  $\gamma = \langle |s_{hh}|^2 \rangle / \langle |s_{vv}|^2 \rangle$  为同极化通道功率比。值得注意的是, 在低信噪比情况下, 根据统计特性, 采用统计量  $\rho_G$  也将获得一个低相干值, 但是, 由于低信噪比区域与体散射区域在本文情况下均被看作干扰, 将两者混为一类不影响检测结果, 故  $\rho_G$  对本文 CCD 情况具有适应性。

**3.2.2 构建约束项**  $\rho_G$  统计量根据相干性差异将场景分成两类, 我们本文需要通过计算目标对这两类的响应度构建约束项。因此, 我们首先分析  $\rho_G$  统计量中两种散射成分的统计特性, 然后从它们的混合模型中对各自的分布模型进行拟合, 根据拟合结果求取体散射响应度, 最后根据变化前后两幅图像的体散射响应度构建约束项。

(1) 统计特性分析与 GEV 分布建模: 本文采用广义极值 (Generalize Extreme Value, GEV) 分布对  $\rho_G$  统计量建模, 因其能够较好地拟合该统计量呈现的左右拖尾分布。GEV 分布有 3 个参数: 形状参数  $\xi$ , 尺度参数  $\sigma$  和位置参数  $\mu$ 。我们本文建立一个混合 GEV 模型, 将  $|\rho_G|$  统计量表示为 2 个 GEV 分布的线性叠加, 其定义如式 (7) 所示。

$$f(x; \mu, \sigma, \xi) = \sum_{i=1}^2 a_i f_i(x; \mu_i, \sigma_i, \xi_i) \quad (7)$$

其中,  $f_i(\cdot)$  表示一种散射机制的  $|\rho_G|$  统计量所服从的 GEV 分布, 令  $i=1$  表示体散射机制,  $i=2$  表示表面散射机制。下面用 EM 算法对场景中各采样点的  $|\rho_G|$  统计量处理, 实现各个 GEV 分布的参数估计。

(2) 计算体散射响应度: EM 算法是一种通过迭代实现极大似然估计的算法。结合本文应用, 算法首先给定 GEV 分布类别个数 (2 个) 与各个 GEV 分布参数初始值, 然后在每一步迭代中, 先通过 E 步求场景中各采样点的  $|\rho_G|$  统计量对体散射类别的响应度, 然后在 M 步根据响应度大小对各采样点归类, 用最小二乘法估计每一类的 GEV 分布参数。如此迭代, 直到达到参数收敛条件<sup>[15]</sup>。

在使用 EM 算法时, 由于难以求解 GEV 分布各参数关于各统计数据的显式表达式, 故无法直接将 E 步计算的响应度作为权值代入 M 步的参数计算中。而采用设置响应度阈值对各采样点归类的方法造成 M 步中每类采样点的统计直方图产生截断, 使得每次 GEV 分布的拟合精度不高, 延缓分布参数的迭代收敛速度, 且容易收敛至局部极值, 导致参

数估计结果不准确。本文针对这一问题在采样点归类方法上进行改进。由于本文中采样点的  $|\rho_G|$  统计量取值范围在  $[0, 1]$  之间, 故针对每个采样点在  $[0, 1]$  区间随机生成一个服从均匀分布的随机数, 并将之与该点的体散射响应度比较, 若随机数小于体散射响应度, 则将该点归为体散射机制一类, 否则归为表面散射一类。这样操作使得所有采样点以响应度为概率归入类别中, 响应值越大, 归入该类的概率越高, 反之, 则归入另一类的概率越高。这样操作避免了固定阈值分割的截断效应, 提高了每次 GEV 分布的拟合精度, 使分布参数的迭代收敛速度加快, 且不易收敛至局部极值。然而, 当收敛至一定范围之后, 受采样点个数的限制, 这种依概率归类的随机性凸显出来, 使得参数迭代收敛指标——最后两次迭代步骤中参数的均方误差在一定范围内波动。因此需要改变参数收敛条件: 将最后  $n$  次求取的参数迭代均方误差取平均作为迭代收敛指标与收敛阈值比较, 小于该阈值则迭代停止。

使用改进的 EM 算法得到的 GEV 分布参数求取场景中各采样点的  $|\rho_G|$  统计量对体散射类别的响应度, 记作  $r$ , 分别对变化前后的两幅图像处理, 得到的体散射响应度记作  $r_A$  和  $r_B$ 。

(3) 构建体散射约束项: 体散射约束项表示为  $\lambda(r_A, r_B) \cdot (1 - |\gamma_{w, tr}|)$ , 函数  $\lambda(r_A, r_B) = l \cdot r_A r_B$ , 其中  $0 < l \leq 1$ 。体散射约束项的作用是, 与迹相干统计量相加, 通过增大场景中体散射主导区域的统计值将其从低相干区域中排除。函数  $\lambda(r_A, r_B)$  中, 尺度系数  $l$  控制体散射区域统计值增大的幅度, 实际选择时为了获取相干变化差异图的最佳显示效果,  $l$  取场景中加权迹相干统计量  $\gamma_{w, tr}$  的均值。

### 3.3 散射功率变化辅助约束项

体散射约束项将表现为体散射特性和低信噪比区域从低相干特性中排除, 但是由于该约束项中响应度的计算没有兼顾变化前后两幅图像之间的关系, 因此可能将被排除区域中发生明显幅度变化的区域误排除, 形成漏检, 而这种区域是属于我们感兴趣的目标变化区域的。基于以上原因, 我们本文建立散射功率变化统计量作为辅助约束项, 将属于目标变化区域的散射功率发生明显变化区域在极化 CCD 统计量中设置为低值。

我们采用对数比值法建立散射功率变化统计量, 对数散射功率比  $\eta$  的计算式为

$$\eta = \min \left\{ 10 \lg \left[ \max \left( \frac{\text{span}_A}{\text{span}_B}, \frac{\text{span}_B}{\text{span}_A} \right) \right], 10 \right\} \quad (8)$$

其中,  $\text{span}_A$  与  $\text{span}_B$  分别为变化前后两幅极化

SAR图像的散射总功率,  $\eta$ 的单位为dB。根据 $\eta$ 得到的散射功率变化辅助约束项为 $(1 - \eta/10)$ 。式(8)所示的约束项中将 $\eta$ 限制在 $[0 \text{ dB}, 10 \text{ dB}]$ 区间内,  $\eta$ 趋近于0 dB表示两幅图像散射功率一致,  $\eta$ 趋近于10 dB表示两幅图像散射功率相差较大, 这样设置是出于归一化的目的, 以保证最终极化CCD统计量的取值范围在 $[0, 1]$ 区间。

### 3.4 极化CCD统计量

我们本文建立总的极化CCD统计量, 表示为

$$p(\gamma_{w, \text{tr}}, r_A, r_B, \eta; l) = [|\gamma_{w, \text{tr}}| + lr_A r_B (1 - |\gamma_{w, \text{tr}}|)] \left(1 - \frac{\eta}{10}\right) \quad (9)$$

统计量 $p$ 的取值范围为 $[0, 1]$ 。该统计量由上述分析的加权迹相干统计量 $|\gamma_{w, \text{tr}}|$ 、体散射约束项 $lr_A r_B (1 - |\gamma_{w, \text{tr}}|)$ 和散射功率变化辅助约束项 $(1 - \eta/10)$ 3部分组成。对于场景中的某个区域, 获得 $p$ 的低值(趋近于0)表示为目标变化区域, 获得 $p$ 的高值(趋近于1)表示为未变化区域或干扰区域。图2(a), 图2(b)所示分别为在 $|\gamma_{w, \text{tr}}|=0.2$ (低相干)与0.9(高相干)情况下统计量 $p$ 随变化前后两幅图像的体散射响应度乘积 $r_A r_B$ 及对数散射功率比 $\eta$ 的变化情况。由图2(a)可见, 在迹相干统计量呈现低相干

状态下, 当体散射响应度较高(即该区域表现为体散射)且变化前后散射功率相当时(图2(a)的左上角状态), 总的极化CCD统计量 $p$ 呈现为高值, 即从低相干干扰区域中将其作为虚警排除; 但若变化前后散射功率相差较大时(图2(a)的右侧状态), 总的极化CCD统计量 $p$ 呈现为低值, 即真实的变化区域没有被漏检。

根据极化CCD统计量对变化前后的SAR图像处理, 得到处理后的相干变化差异图。接下来可以采用一些较为成熟的算法进行阈值分割获取二值图像, 如最大类间方差法、峰谷法、迭代式阈值选择法<sup>[16]</sup>, 在场景中变化区域较少时, 可采用邻域直方图差方法<sup>[17]</sup>进行阈值选取。该部分内容不是本文的研究重点, 故这里不再赘述。

## 4 实验数据验证

基于本文的方法, 利用ESAR机载L波段全极化重轨SAR数据进行实验验证。该数据采集时间分别为2007年3月31日和5月2日, 时间间隔1个月, 所在场景为瑞典Eggby小镇附近的一片场景, 变化前后的极化Pauli分解图像以及光学对比图像如图3所示。场景中存在裸地, 草地, 湖泊等区域, 这些区

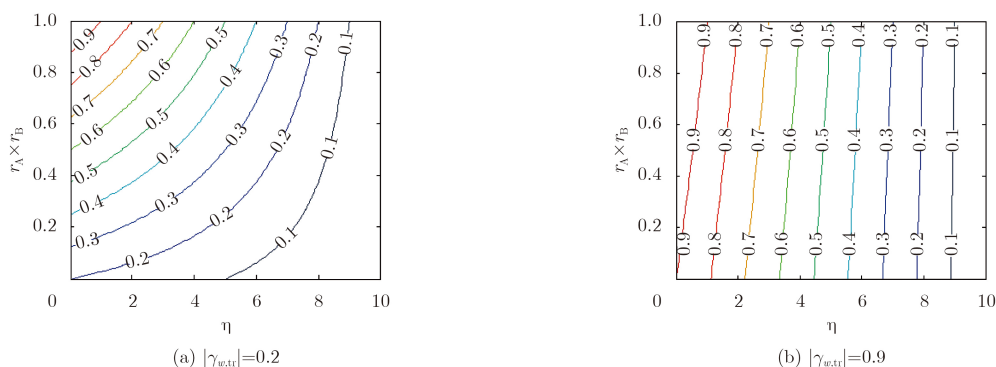
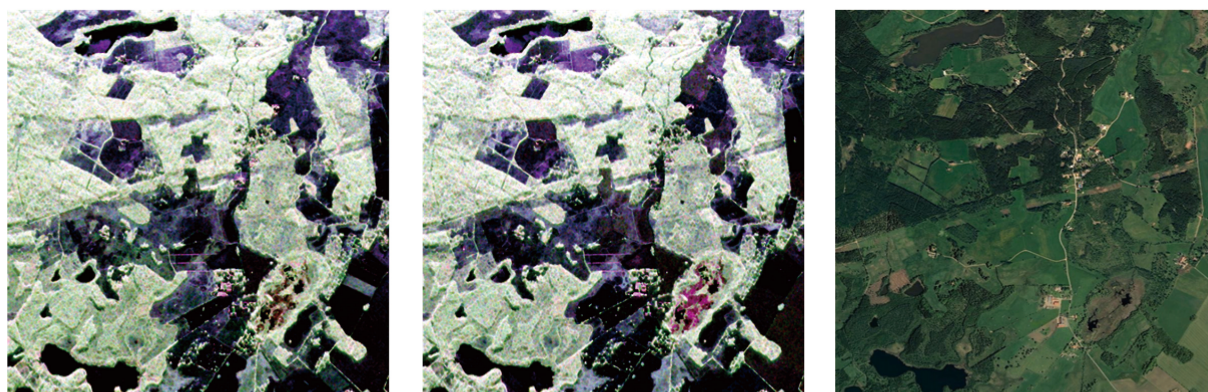


图2 极化CCD统计量



(a) 变化前极化Pauli分解图像

(b) 变化后极化Pauli分解图像

(c) 光学对比图像

图3 场景示意图

域中的部分区域在1个月的时间内受土壤翻修，草地修剪，冰雪消融等因素影响发生变化；同时，场景中存在较大面积的高大植被区域，受风吹以及生长因素影响发生变化。我们将前者看作待检测的目标变化区域，将后者连同场景中低信噪比引起的低相干区域看作不感兴趣的干扰区域，按照第3节极化CCD方法进行检测。

首先，结合式(3)与式(5)计算实验场景的加权迹相干统计量。根据3.1节 $\alpha$ 值的计算方法，结合图6(a)，图6(b)体散射响应度的统计结果，算得本场景中取 $\alpha=0.38$ 。图4为加权迹相干变化差异图结果，图中可见在植被覆盖区域存在大量低相干干扰。

然后，使用式(6)建立的极化通道间相干统计量 $\rho_G$ 处理场景变化前后的两幅极化SAR图像，得到图5所示的直方图统计结果，可见，场景大体上被分成两类。我们本文将混合GEV分布的模型分

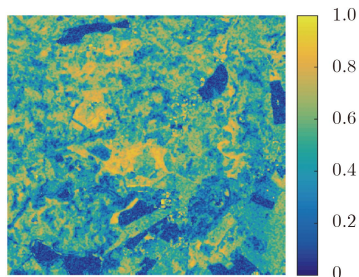


图4 加权迹相干变化差异图(在0~1范围内取值)

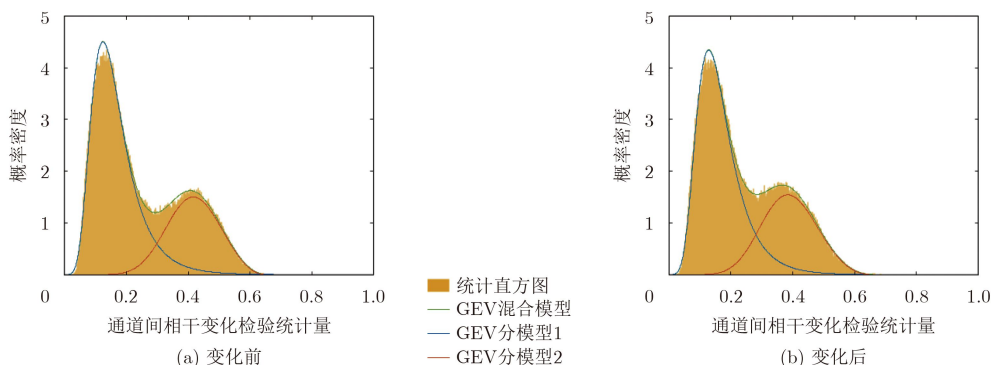


图5 直方图与拟合分布模型对比结果

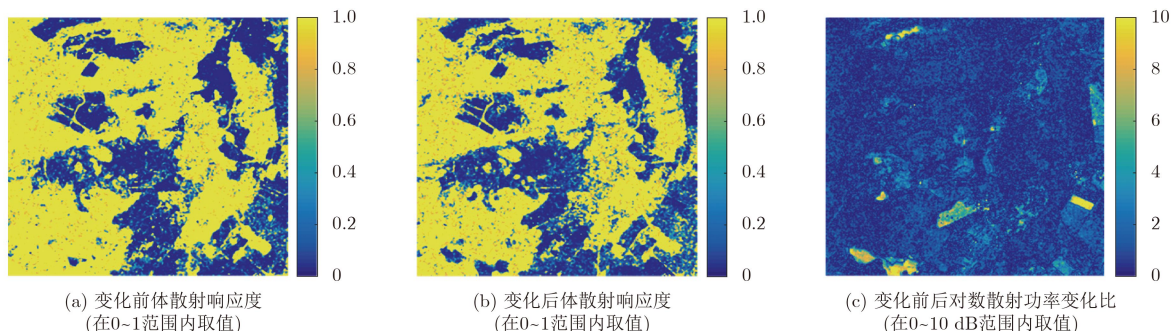


图6 约束项

量个数设为2，选定合适的初始值进行改进EM算法迭代，迭代中M步的GEV分布最小二乘拟合采用MATLAB函数gevfit实现。图5(a)，图5(b)分别给出了场景变化前后混合GEV分布模型以及模型中各分量的拟合结果。可以看出，使用改进EM算法能够较好地直方图进行拟合。

根据拟合所得各个GEV分布的参数计算场景中每个像素点分别对体散射分量与表面散射分量的响应度 $r_A$ 和 $r_B$ ，如图6(a)，图6(b)所示。对数散射功率变化比 $\eta$ 如图6(c)所示。

将各统计结果代入式(9)得到本文方法的总极化CCD统计量，其中参数 $l$ 取值为场景中 $|\gamma_{w, \text{tr}}|$ 均值0.47。图7给出极化CCD相干变化差异图结果，其中图7(a)为采用极化SAR复Wishart分布似然比统计量方法[3]所得结果，图7(b)为采用极化迹相干统计方法[9]所得结果，图7(c)为本文极化CCD方法所得结果，图7(d)给出场景地面真实值。

对比各方法结果可知，文献[3]方法仅利用了图像内不同极化通道间的极化相干信息，因此对于某些变化区域(如图7(a)中红框区)不具备检测能力；文献[9]方法利用了图像间极化相干信息，但是对于由植被及低信噪比区域引起的虚警不能很好地排除。本文方法兼顾了两类极化相干信息，使得场景内大面积体散射植被区域不再呈现低相干特性，同时，未发生变化的低信噪比区域也不再成为低相干

干扰项。

为了进一步说明本文极化CCD方法的优越性,采用受试者工作特征(Receiver Operating Characteristic, ROC)曲线和最优Kappa系数两个指标进行分析。ROC曲线即检测率 $P_d$ 随虚警率 $P_{fa}$ 的变化曲线,曲线右下方围成的面积越大,表明该方法检测性能越好。Kappa系数为衡量检测精度的指标,检测中每个门限值对应一个Kappa系数,其中最大值为最优Kappa系数。这里展示的方法除了文献[3]和文献[9]的方法外,还将本文方法中加权迹相干统计量中的权值参数 $\alpha$ 分别设为0, 0.38(本文方法)和1的3种情况进行比较。图8(a)给出不同极化CCD方法的ROC曲线,图8(b)给出设置不同检测门限时各种方法的Kappa系数。通过观察可知,本文方法相比于文献[3]与文献[9]方法具有更优异的ROC曲线特性及更大的Kappa系数,故其检测性能更优异。本文方法中,加权参数 $\alpha$ 的设置对ROC曲线性能差异

不明显,但通过观察最优Kappa系数发现, $\alpha = 0.38$ 时,最优Kappa系数为0.9300,大于 $\alpha = 0$ 和 $\alpha = 1$ 两种情况。采用峰谷法<sup>[16]</sup>对本文相干变化差异图进行变化检测门限值选取,结果为0.179,与图8(b)中最优Kappa系数对应的检测门限一致。以上分析验证了本文提出的极化CCD方法对减少体散射植被及低信噪比区域的虚警干扰,提高目标变化检测概率的正确性与有效性。

### 5 结论

本文针对场景中因体散射植被区域及低信噪比区域的存在对相干变化检测结果造成低相干干扰这一问题做了深入的研究,提出一种极化SAR相干变化检测方法。该方法利用场景变化前后SAR图像之间的极化相干信息建立加权迹相干统计量;利用各幅SAR图像极化通道间的相干信息,通过建立混合GEV分布模型,采用改进EM算法求解各分量参

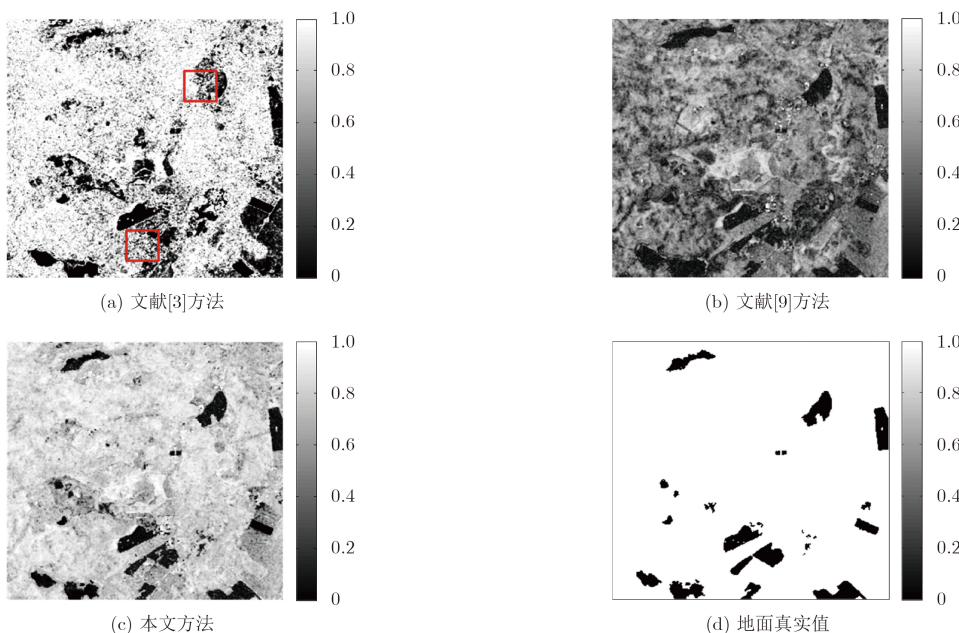


图7 极化CCD相干变化差异图(根据统计量性质,各图均在0~1范围内取值)

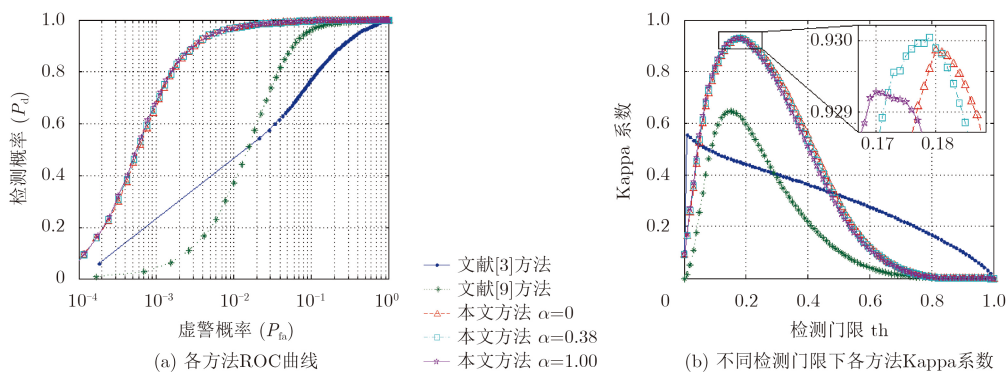


图8 各极化CCD方法指标分析结果

数,进而建立体散射约束项;再结合散射功率变化约束项构建总的极化CCD检验统计量。使用该统计量对场景进行检测,可以有效地排除体散射区域与低信噪比区域引起的低相干干扰。实验中利用L波段全极化SAR数据有效地检测出场景中发生变化的目标区域,通过与其它方法比较验证了本文提出方法在降低虚警率,提高检测率方面的优越性。最后的指标分析进一步证明了本文提出方法在相干变化检测方面具有较高的准确性。

**致谢** 本文作者感谢欧空局提供的ESAR机载L波段全极化重轨SAR图像数据。

### 参 考 文 献

- [1] PREISS M and STACY N J S. Coherent change detection: Theoretical description and experimental results[R]. DSTO-TR-1851, 2006.
- [2] PREISS M and STACY N J S. Polarimetric SAR coherent change detection[C]. The 7th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Friedrichshafen, Germany, 2008: 1–4.
- [3] CONRADSEN K, NIELSEN A A, SCHOU J, *et al.* A test statistic in the complex Wishart distribution and its application to change detection in polarimetric SAR data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(1): 4–19. doi: [10.1109/TGRS.2002.808066](https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.808066).
- [4] NIELSEN A A, CONRADSEN K, and SKRIVER H. Change detection in full and dual polarization, single-and multifrequency SAR data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2015, 8(8): 4041–4048. doi: [10.1109/JSTARS.2015.2416434](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2416434).
- [5] NIELSEN A A, CONRADSEN K, and SKRIVER H. Corrections to “change detection in full and dual polarization, single-and multi-frequency SAR data”[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(11): 5143–5144. doi: [10.1109/JSTARS.2017.2761038](https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2761038).
- [6] RATHA D, DE S, CELIK T, *et al.* Change detection in polarimetric SAR images using a geodesic distance between scattering mechanisms[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(7): 1066–1070. doi: [10.1109/LGRS.2017.2696158](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2696158).
- [7] 韩萍, 丛润民, 张在吉. 基于极化状态提取的极化SAR图像变化检测算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(7): 1526–1530. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.10).
- [8] HAN Ping, CONG Runmin, and ZHANG Zaiji. Change detection algorithm of polarimetric SAR image based on polarization state extracting[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(7): 1526–1530. doi: [10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.10](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-506X.2015.07.10).
- [9] NOVAK L M. Coherent change detection for multi-polarization SAR[C]. *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers (ASILOMAR)*, Pacific Grove, USA, 2005: 568–573. doi: [10.1109/ACSSC.2005.1599813](https://doi.org/10.1109/ACSSC.2005.1599813).
- [10] MARINO A. Trace coherence: a new operator for polarimetric and interferometric SAR images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(4): 2326–2339. doi: [10.1109/TGRS.2016.2641742](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2641742).
- [11] BARBER J. A generalized likelihood ratio test for coherent change detection in polarimetric SAR[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(9): 1873–1877. doi: [10.1109/LGRS.2015.2433134](https://doi.org/10.1109/LGRS.2015.2433134).
- [12] MUHURI A, RATHA D, and BHATTACHARYA A. Seasonal snow cover change detection over the Indian Himalayas using polarimetric SAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2017, 14(12): 2340–2344. doi: [10.1109/LGRS.2017.2764123](https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2764123).
- [13] 刘云龙, 梁兴东, 李焱磊, 等. 一种补偿时变姿态的Whitt极化定标改进算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(10): 2354–2359. doi: [10.11999/JEIT170177](https://doi.org/10.11999/JEIT170177).
- [14] LIU Yunlong, LIANG Xingdong, LI Yanlei, *et al.* Improved time-variant attitude compensating Whitt polarimetric calibration algorithm[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(10): 2354–2359. doi: [10.11999/JEIT170177](https://doi.org/10.11999/JEIT170177).
- [15] 冀广宇, 董勇伟, 李焱磊, 等. 一种基于概率图模型的多时相SAR相干变化检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(12): 2912–2920. doi: [10.11999/JEIT170208](https://doi.org/10.11999/JEIT170208).
- [16] JI Guangyu, DONG Yongwei, LI Yanlei, *et al.* A multi-temporal SAR coherent change detection method based on probabilistic graphical models[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(12): 2912–2920. doi: [10.11999/JEIT170208](https://doi.org/10.11999/JEIT170208).
- [17] LEE J S and POTTIER E. *Polarimetric Radar Imaging: From Basics to Applications*[M]. Boca Raton: Taylor & Francis Group, CRC Press, 2009: 143–146.
- [18] JIN Tingting, SHE Xiaoqiang, QIU Xiaolan, *et al.* Intertidal area classification with GEV-distribution and Markov

- random field in quad-polarimetric SAR imagery[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2018(99): 1–14. doi: [10.1631/FITEE.1700462](https://doi.org/10.1631/FITEE.1700462).
- [16] 谢凤英, 赵丹培. Visual C++数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 279–290.
- XIE Fengying and ZHAO Danpei. Visual C++ Digital Image Processing[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 279–290.
- [17] 赵军香, 梁兴东, 李焱磊. 一种基于似然比统计量的SAR相干变化检测[J]. 雷达学报, 2017, 6(2): 186–194. doi: [10.12000/JR16065](https://doi.org/10.12000/JR16065).
- ZHAO Junxiang, LIANG Xingdong, and LI Yanlei. Change detection in SAR CCD based on the likelihood change statistics[J]. *Journal of Radars*, 2017, 6(2): 186–194. doi: [10.12000/JR16065](https://doi.org/10.12000/JR16065).
- 冀广宇: 男, 1988年生, 博士生, 研究方向为机载合成孔径雷达信号处理.
- 梁兴东: 男, 1973年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为阵列干涉SAR系统技术、微波光子成像雷达系统技术、片上雷达微系统技术.
- 董勇伟: 男, 1982年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为高分辨率小型化合成孔径雷达系统技术、雷达低慢小目标探测技术.
- 李焱磊: 男, 1983年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为穿墙雷达成像技术.