

基于高分辨率全极化SAR图像的取向角校正方法

孙翔^{*①②} 宋红军^① 王宇^{①②} 李宁^③

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

^②(中国科学院大学 北京 100049)

^③(河南大学 开封 475004)

摘要: 城市地区极化分解对于监测城市扩张速度并研究其对生态环境的影响非常重要。全极化合成孔径雷达(PolSAR)允许我们使用极化目标分解方法来检测地物散射机制,是一种对城区变化进行监测的手段。然而,目标的极化方向角(POA)会影响极化分解结果,导致体散射过估等问题,使得极化分解结果不能正确地体现目标的散射机理。传统的去取向方法只对主导极化方向角较小的地区起到去取向的作用,对取向角较大区域没有明显的效果。该文针对以上问题提出了一种基于高分辨率城市区域图像的POA校正方法。首先,高分辨率图像中城市建筑区域的POA会因为地物变化出现跳变的现象,可以利用POA的随机性对城市地区的范围进行估计。其次,使用线性逼近方法来获取城区中使交叉极化项最小的POA。利用该文提出的POA校正算法,可以使取向角导致的误分解问题得到缓解,提高分解结果的准确度。该算法使用2009年于四川都江堰地区获取的机载X波段全极化数据进行验证,得到了明显的改进结果,城市区域的体散射分量得到了显著的提升。

关键词: 合成孔径雷达; 全极化; 高分辨率; 极化取向角; 城区目标分解

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 2095-283X(2018)04-0465-10

DOI: 10.12000/JR18026

引用格式: 孙翔, 宋红军, 王宇, 等. 基于高分辨率全极化SAR图像的取向角校正方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(4): 465-474. DOI: 10.12000/JR18026.

Reference format: Sun Xiang, Song Hongjun, Wang Robert, *et al.*. POA correction method using high-resolution full-polarization SAR image[J]. *Journal of Radars*, 2018, 7(4): 465-474. DOI: 10.12000/JR18026.

POA Correction Method Using High-resolution Full-polarization SAR Image

Sun Xiang^{①②} Song Hongjun^① Wang Robert^{①②} Li Ning^③

^①(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

^②(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

^③(*Henan University, Kaifeng 475004, China*)

Abstract: Polarimetric decomposition in urban areas is important for monitoring the speed of city expansion and studying its ecological environmental influence. Using fully Polarimetric Synthetic Aperture Radar (PolSAR) is a method for consistent observation of large-range urban changes. In the last two decades, most research on decomposition methods have stated that Polarization Orientation Angle (POA) would affect the results of decomposition by overestimating the volume scattering contribution of urban areas. The available deorientation methods cannot rotate built-up areas with large POAs. This paper proposes an algorithm for decomposition of high-resolution urban area images based on a POA correction method. First, for high-resolution images of built-up areas, the POA changes radically pixel by pixel. An approximate assessment of urban areas can be accomplished using POA randomness. Then, to search for the true POA of large dominant POA areas (most built-up regions), the linear approximation method is used to locate POAs that can minimize

收稿日期: 2018-03-23; 改回日期: 2018-07-02; 网络出版: 2018-07-25

*通信作者: 孙翔 feixiang19913@163.com

基金项目: 国家高分重大专项

Foundation Item: The Key Standard Technologies of National High Resolution Special

cross-polarized terms. Thereby, the inaccurate decomposition that occurs by the deviation of POA can be fixed, and the accuracy of results improves. The fully PolSAR data of the Dujiangyan area in Sichuan Province, China are used to confirm the algorithm's effectiveness. The data are acquired by an X-band airborne SAR sensor designed by the Institute of Electronics, China Academy of Sciences (IECAS).

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Full-polarization; High-resolution image; Polarization Orientation Angle (POA); Urban target decomposition

1 引言

极化合成孔径雷达(Polarimetric Synthetic Aperture Radar, PolSAR)是一种获取丰富地物散射信息的手段,在军事和民用领域有着广泛的应用和研究价值^[1]。极化目标分解是极化SAR图像解译的一个重要分支,是目标特征参数反演、目标识别和图像分类的理论基础^[2]。极化散射矩阵将目标散射的能量特性、相位特性以及极化特性统一起来,相对完整地描述了雷达目标的电磁特性^[3]。目标分解理论最早由Huynen提出,它利用极化散射矩阵揭示散射体的物理机理,促进极化信息的充分利用^[4]。而后Krogager^[5]、vanZly^[6]、Cloude^[7]和Pottier^[8]等人做了大量的研究,为极化分解理论奠定了基础。

然而,地形目标(散射体)的散射依赖于散射取向、形状、介电特性、散射机制等。复杂地形表面的散射目标往往是随机取向的,会引起随机起伏的回波。随机取向和随机分布的散射目标难以分类。不同散射机制的不同取向的散射粒子可能会产生类似的散射;反之,相同散射机制的散射体则在随机的取向角下会造成不同的散射,导致混乱的分解结果与分类结果^[9]。去取向概念的引入是为了减少随机波动取向的影响,将目标自身的物理特点突出地表现出来^[10]。去取向的概念类似于斜坡补偿的概念,不同的是去取向适用于各种目标,包括目标和目标所在的背景。

2011年,为了将大片植被区域与城市建筑区域区分开来,Yamaguchi提出了使用根据取向角大小旋转相干矩阵后,再进行分解的方法^[11]。该方法首次将去取向角引入了分解算法中。然而,城区取向角早在2000年就受到了科学家们的关注,那时就已经对方位向斜坡变化的补偿方法进行了研究^[12]。他们提出了两种补偿方法,并利用反射对称的概念对估计算法进行了统一分析^[13]。尤其针对建筑物地区的取向角变化利用了后向散射模型进行了重点的研究^[14]。偶次散射模型与奇次散射模型被推广使用于交叉极化项与非对角项中^[15]。

为了研究不同特点的建筑物区域,2013年陈思伟等人提出了主导极化方向角(Dominant Polarization Orientation Angle, D_{POA})的概念^[16]。 D_{POA} 定义为

在某一区域内所有像素点POA分布直方图的顶点所对应的POA值。在研究了多个不同 D_{POA} 值的建筑物区域去取向结果后,他们发现 D_{POA} 的大小与去取向角后建筑物地物分解的结果有较大的关系。经过去取向操作后基于模型的目标分解方法在 $|D_{POA}| < 22.5^\circ$ 时较为有效,体散射分量过估的问题得到有效解决,二面角散射分量得到了大幅度提升,由11%提升到44%。然而,当 $|D_{POA}| > 22.5^\circ$ 时,分解结果中体散射分量只有小幅度的减少^[16]。即使经过了常规去取向处理,在纯粹的建筑区域中体散射分量仍占主导地位^[17]。

分解算法针对取向角问题改进至今,虽然误解问题得到了一定的改善,但是由于基于模型的分解算法过于强调体散射分量,代表建筑物的偶次散射机制依然无法在城区占主导地位。为了解决这一问题,本文提出了基于高分辨率全极化SAR图像的取向角校正方法,使用了四川都江堰地区机载全极化图像进行算法验证。

2 极化取向角对极化分解结果的影响

极化方向角(Polarization Orientation Angle, POA)即极化取向角,定义为极化椭圆长轴与水平轴之间的夹角,如图1所示。

在经历极化基变换后,目标的散射相关信息不会发生变化。假设将目标散射矩阵变换极化基,变换后的极化基是原本的极化基沿视线旋转 ψ 后得到的,那么新的极化基下的散射矩阵与旧极化基下的散射矩阵之间的关系为:

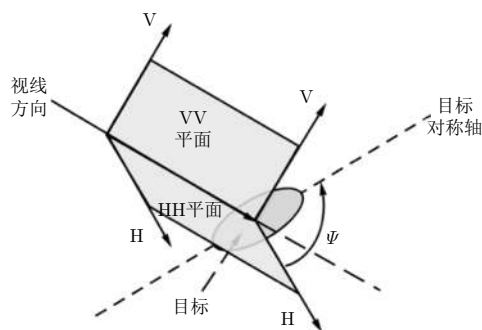


图 1 极化方向角示意图

Fig. 1 Polarization orientation angle

$$\mathbf{S}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{R}^H \quad (1)$$

其中, \mathbf{R} 为基变换酉矩阵, 它与旋转角 Ψ 之间的关系是:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos\Psi & -\sin\Psi \\ \sin\Psi & \cos\Psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

将此极化基变换扩展到相干矩阵之间后, 得到:

$$\mathbf{T}' = \mathbf{R} \cdot \mathbf{T} \cdot \mathbf{R}^H \quad (3)$$

此时, \mathbf{R} 为3阶极化基变换酉矩阵:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\Psi & -\sin 2\Psi \\ 0 & \sin 2\Psi & \cos 2\Psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

POA的传统计算方法是找到使得相干矩阵中交叉极化项 T_{33} 达到最小值的旋转角。当交叉极化项达到最小值时, 可以使得散射矩阵对角化, 从而把散射信息集中在同极化分量上。这样可以更有效地描述目标特征。假设旋转角为 θ , 那么旋转前后的相干矩阵之间的关系可以通过式(5)得到。

$$\mathbf{T}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix} \cdot \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & -\sin 2\theta \\ 0 & \sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}^H \quad (5)$$

经过变换获得的相干矩阵的参数为:

$$\begin{cases} T_{11}(\theta) = T_{11} \\ T_{12}(\theta) = T_{12} \cos 2\theta + T_{13} \sin 2\theta, T_{21}(\theta) = T_{12}^*(\theta) \\ T_{13}(\theta) = -T_{12} \sin 2\theta + T_{13} \cos 2\theta, T_{31}(\theta) = T_{13}^*(\theta) \\ T_{22}(\theta) = T_{22} \cos^2 2\theta + T_{33} \sin^2 2\theta + \operatorname{Re}(T_{23}) \sin 4\theta \\ T_{23}(\theta) = i \operatorname{Im}(T_{23}), T_{32}(\theta) = -i \operatorname{Im}(T_{23}) \\ T_{33}(\theta) = T_{33} \cos^2 2\theta + T_{22} \sin^2 2\theta - \operatorname{Re}(T_{23}) \sin 4\theta \end{cases} \quad (6)$$

当旋转后的交叉极化项 T_{33} 的1阶导数等于0时, $T_{33}(\theta)$ 达到极小值。通过求解得到POA的值为:

$$\theta = \frac{1}{4} \tan^{-1} \frac{2 \operatorname{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}}, \quad -\frac{\pi}{4} \leq \theta \leq \frac{\pi}{4} \quad (7)$$

为了确定式(7)中求得的POA能够使得 T_{33} 达到最小值, 还需要满足以下条件^[18], 不然可能出现 $T_{33}(\theta)$ 被错误地最大化的现象。

$$T_{33}'(\theta) > 0 \quad (8)$$

本文使用的数据是中科院电子所使用机载X波段全极化合成孔径雷达于2009年获得的四川省都江堰地区高分辨率数据。图像的斜距分辨率和方位分辨率均为0.5 m。入射角范围在20°到70°之间变化。图2(a)展示了该地区数据的Pauli分解结果。

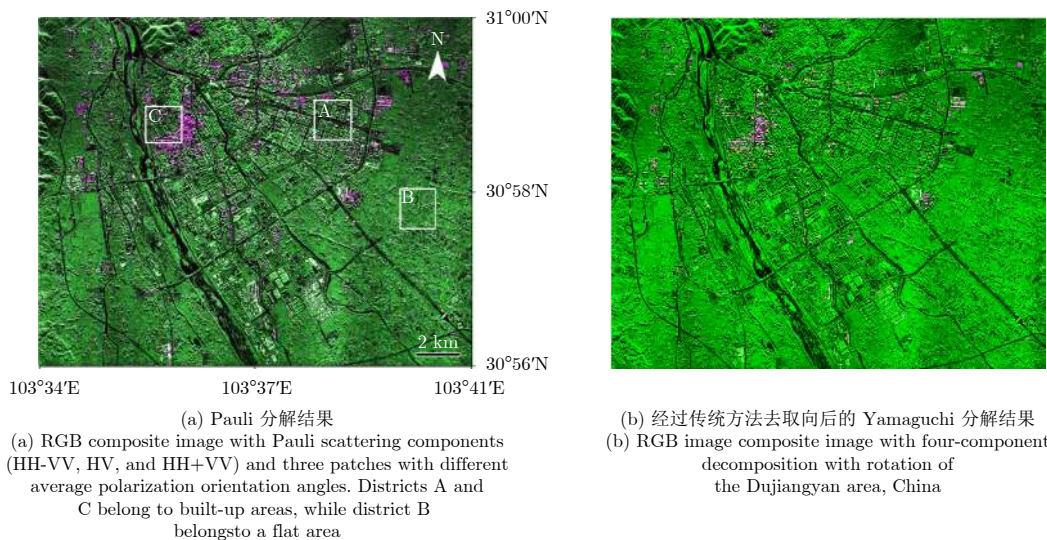


图2 四川省都江堰地区全极化图像

Fig. 2 Polarimetric image of the Dujiangyan area, China

图中用白色的边框标出了A, B, C 3个区域以便进行定量分析, 其中A, C都是城市建筑物区域, B区域是平原低矮植被区域, 存在少量独立的房屋建筑。从Pauli分解图可以看出, 有大片的建筑物区域呈现绿色, 反映的是体散射机制的性质, 只有在C区域周边存在一大部分较为整块的紫红色区域,

反映了建筑物应显示的二面角散射特性。为了解决这一问题, 常用的解决方式是去除使得 T_{33} 最小的取向角后再重新分解, 去除的取向角大小如式(7)所示。

由于计算取向角是使用了相干矩阵, 所以去除取向角后进行分解时直接采用了基于相干矩阵的非

相干目标分解方法, Yamaguchi分解方法。去取向后的Yamaguchi分解结果如图2(b)所示。

可以看出经过取向角旋转后的Yamaguchi分解图像依旧呈现大片绿色区域, 即呈现了体散射特性, 这与该区域的真实地貌不相符。出现该问题的原因在上节已经介绍。在这片区域中, 大多数的建筑物与飞行方向之间的夹角较大, 导致了极化旋转角度较大。大部分建筑物区域 $|D_{POA}| > 22.5^\circ$, 使得传统的去取向角方法不再适用。为了解决这一问题, 必须利用图像的其他特性将建筑物的取向角进行校正。

3 高分辨率图像POA校正算法

本文针对传统的去取向角方法无法校正由于取向角导致的分解体散射过估问题进行了研究, 提出了新的适用于高分辨率图像的POA校正算法。算法分为两个部分: 第1部分利用高分辨率图像在城区取向角跳变的现象对需要进行POA校正的区域进行大致提取; 第2部分针对提取出的区域进行迭代逼近的方法找出新的使得 T_{33} 最小的POA。完整的算法流程图如图3所示。

下面将对算法的两个部分进行详细地介绍:

第1部分: 大致提取需要进行取向角重校正区域, 将无法通过常用POA计算方法去除取向角影响的区域选取出来。这个部分利用了POA的随机性进行研究。POA随机性的差异是对城市和其他

地区进行分类的适当指标。基于POA的跳变现象, 提出一个区分城市地区和平原地区的算法。算法流程如下:

步骤1 将POA分为5个部分。分界线分别为 $24^\circ, 15^\circ, 3^\circ, -3^\circ, -15^\circ$ 和 -24° (图4(a)所示);

步骤2 按照传统方法计算每个像素点的POA大小。将每个像素点根据POA的大小参照5类进行编号;

步骤3 假设一个像素为参考像素(Reference pixel)A, 将其上下左右4个像素的编号与A的编号进行比较。此时定义一个新的跳变参数(Outburst Parameter, OP)。如果所有4个相邻像素的编号都与A相邻或相同, 则参考像素A的跳变参数记为0; 否则, 记为1。如此计算图像中每个像素点的跳变参数(图4(b)所示);

步骤4 在图像中放入一个 9×9 的窗, 将这个窗中跳变参数为1的像素的个数记为窗中心像素的异构参数(Heterogeneous Parameter, HP);

步骤5 移动窗的位置, 再次执行步骤4, 直到得到所有像素点的异构参数为止;

步骤6 异构参数大于10的像素点被归入需要进行POA重新计算的区域。

以图4(b)中标记的A, B两个像素点作为示范, 进一步解释算法流程。参考像素A呈蓝色, 根据图4(a)被标注为4。参考像素A相邻的4个像素点分别呈橙、红、蓝、绿色, 表示它们分别被标注为1, 5,

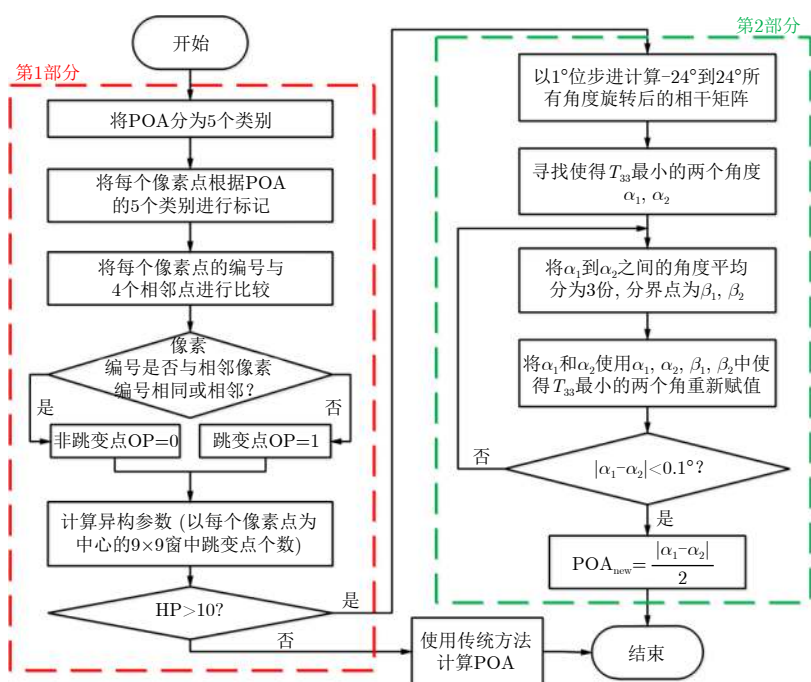


图 3 基于取向角旋转的高分辨率图像分解方法流程图

Fig. 3 The flowchart of POA correction method

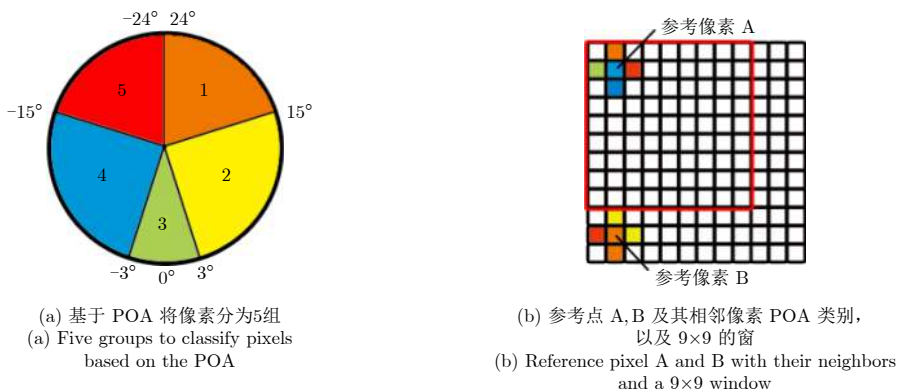


图 4 算法流程第1部分OP计算工具图

Fig. 4 The images used to count OP in the first part of the flowchart

4, 3。其中左、右两个像素点的编号与参考像素 A 的编号相邻, 下面的像素点与参考点的编号相同, 位于参考点 A 上方的像素的编号与 A 的编号既不相邻也不相同, 所以像素点 A 相邻像素中存在不连续的点, 故 A 的跳变参数为 1。同理, 参考点 B 也按照同样的步骤进行分析。参考像素 B 的编号为 1, 它相邻 4 个像素点的编号分别为 2, 2, 1, 5。对比图 4(a) 可以看出参考像素 B 的编号与其 4 个相邻像素的编号相邻或者相同, 所以像素点 B 的跳变参数为 0。

跳变参数的数值象征了像素点是否为跳变点, 异构参数的大小表征的是像素点的 POA 随机性, 异构参数的范围为 [0, 81]。理论上, 异构参数在城市建筑物密集地区较大, 在平坦的草原等地区较小。图 5 展示了都江堰地区数据的异构参数值。图中像素点越亮, 异构参数越大。可以看出在城市区域像素点的异构参数较大, 在平原地区, 高亮度的像素点明显减少。这与都江堰地区光学图像 (图 6) 展现的地物相符。

在算法的第 1 部分中存在两个关键点。首先, POA 种类数量的确定十分关键, 种类的多少, 如

何划分会影响到跳变点个数的多少与跳变的可信程度。如果划分的种类数量过少, 城市地区就无法体现 POA 频繁变化的特征。如果划分种类的数量较多, 平坦区域将显示出与城市区域相同的随机性。因此, 组的数量和它们之间的边界是至关重要的。图 2(a) 中 3 个区域分别代表不同的地物, 研究这 3 个区域的 POA 分布对确定 POA 种类与分类原则十分重要。

图 7 展示了 A, B, C 3 个区域的 POA 分布情况。其中图 7(b) 代表了平原区域的取向角分布。可以看出, 在平原区域, 大多数像素点的 POA 都处于 -15° 到 15° 之间。因此, POA 不属于该范围内的像素点基本属于城市建筑区。代表区域 B 的直方图的顶点位于 0° , 而在图 7(a) 与图 7(c) 中, 直方图的顶点分别位于 -3° 和 2° 处。因此, POA 处于 -3° 到 3° 的像素点, 多属于 B 区域所代表的类型, 而 A 区域所代表地物类型的像素点的 POA 大多处于 -15° 到 -3° 之间, C 区域所代表地物类型的像素点的 POA 大多处于 3° 到 15° 之间。综合以上所述的情况, POA 以 $24^\circ, 15^\circ, 3^\circ, -3^\circ, -15^\circ$ 和 -24° 为分界线分为 5 大类是合理的。

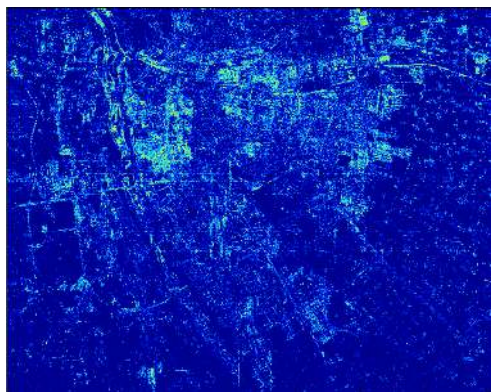


图 5 异构参数数值

Fig. 5 Statistical graph of heterogeneous parameter

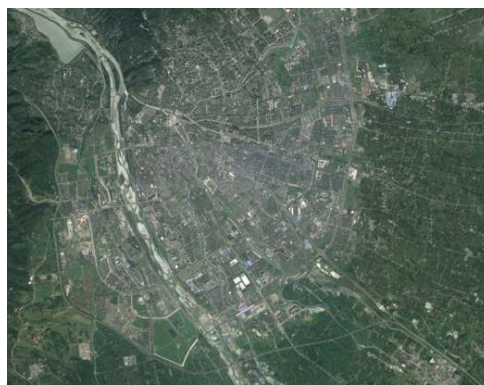


图 6 都江堰地区光学图像

Fig. 6 Optical map of the Dujiangyan area, China

算法第1部分中另一个关键点是异构参数的阈值。根据上述步骤,在理想平原区域内,异构参数应为0;在另一极端情况下,异构参数应达到81的最大值。如果阈值设置得太低,会将平原区域一些较高大且密集的植被像素归类为城市像素;相反,若阈值设置太高,建筑边缘的像素将不被算入城市区域。所以确定阈值非常重要。因此需要对典型城区和平原区进行研究,图8显示了A、B和C区域的异构参数分布情况。

通过比较图8中的3个直方图可以看出,B区域像素的异构参数多处于0到10之间,而在图8(a)与图8(c)中异构参数相对平均地分布在0到30之间。为了确定阈值,在整个图像上尝试了从7到12的异构参数阈值,并将结果与光学照片(图6)进行了比较。图9中给出了7到12的异构参数阈值时,都江堰地区图像的状态。考虑到相对集中的大面积城市建筑区域以及平原地区的零散分布的建筑物,最终选择了10作为异构参数的阈值。

第2部分:在上文中提到当 $|D_{POA}| > 22.5^\circ$ 时,使用传统取向角计算方法获得的取向角无法使得交叉极化项 T_{33} 达到最小值。

在使用传统去取向方法是,无论是相干分解还

是非相干分解都无法在网格状的城市建筑物地区得到正确的分解结果。如图2所示,图像中的大部分建筑物都显示出典型体散射机制的特点。所以,为了找到一种使得交叉极化项最小化的方法,需要采用迭代逼近法来获得最适合的取向角。针对每个像素点的具体操作流程如下:

步骤1 在 -24° 到 24° 之间以 1° 的步长逐次对相干矩阵进行旋转,获得不同角度旋转下的相干矩阵;

步骤2 比较根据不同角度旋转后的所有相干矩阵的交叉极化 T_{33} 项,记录下使得 T_{33} 最小的两个角度值标记为 α_1, α_2 ;

步骤3 将 α_1, α_2 之间的角度等分为3份,将两个等分点记做 β_1 和 β_2 ;

步骤4 将初始相干矩阵根据 $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$ 和 β_2 进行旋转,比较4个矩阵的 T_{33} 值。将最小的两个 T_{33} 值所对应的角度定义为新的 α_1, α_2 ;

步骤5 返回步骤3进行计算,直到 $|\alpha_1 - \alpha_2| < 0.1^\circ$ 跳出循环;

步骤6 定义 $\frac{|\alpha_1 - \alpha_2|}{2}$ 为重新校正的取向角 POA_{new} 。

根据上述的步骤,可以计算需要重校正区域的

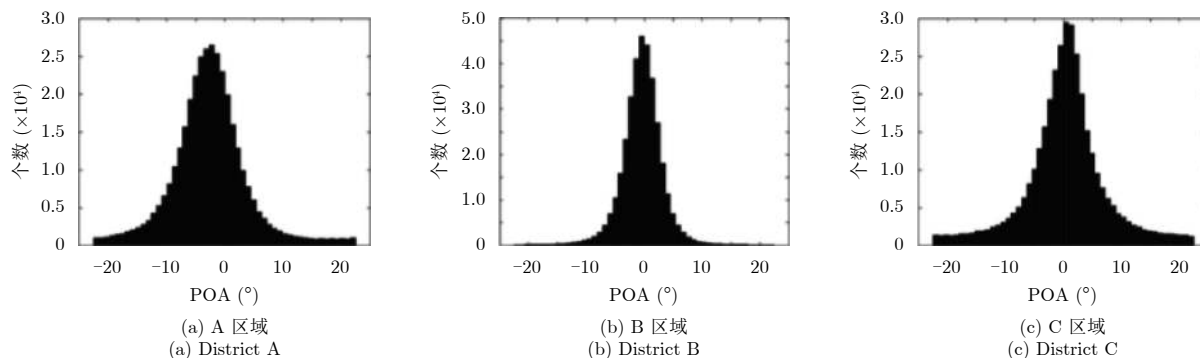


图7 A、B、C区域POA分布图

Fig. 7 Distribution diagram of POA in district A, B and C

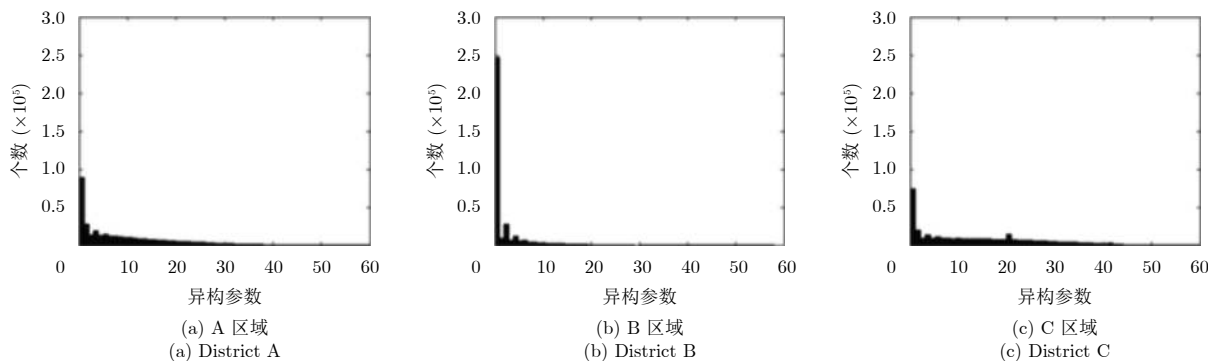


图8 A、B、C区域异构参数分布图

Fig. 8 Distribution diagram of heterogeneous parameter in district A, B and C

合适取向角，并使得交叉极化项 T_{33} 达到真正
的最小值。该方法使得城市建筑物区域的体散射分量减少，二面角散射增强，显示出城区地物应属于的散射机理。

4 实验结果分析

通过本文提出的取向角校正方法计算得到的取向角与传统方法得到的结果在城区的差别较大，如图10所示。

使用 POA_{new} 进行去取向操作后对都江堰地区全极化SAR图像进行分解，结果如图11所示。与使用传统算法计算POA后使用Pauli分解(图2(a))与

Yamaguchi(图2(b))分解算法后得到的分解结果相比，新算法针对体散射过估的城市建筑物区域进行了POA校正，优化了解析结果，有效减轻了解析后城区显示体散射特性的现象。

本文提出的校正算法使得分解结果在保持平原、草坪以及植被地区的体散射机制处于主导地位的同时，将城市建筑物区域受到的POA影响降到最小，使得城区的二面角散射分量处于主导地位。图12展示了A, B, C 3个具有代表性的区域使用传统方法和本文方法计算取向角，旋转后的交叉极化 T_{33} 项。

3个区域的 T_{33} 平均值如表1所示。

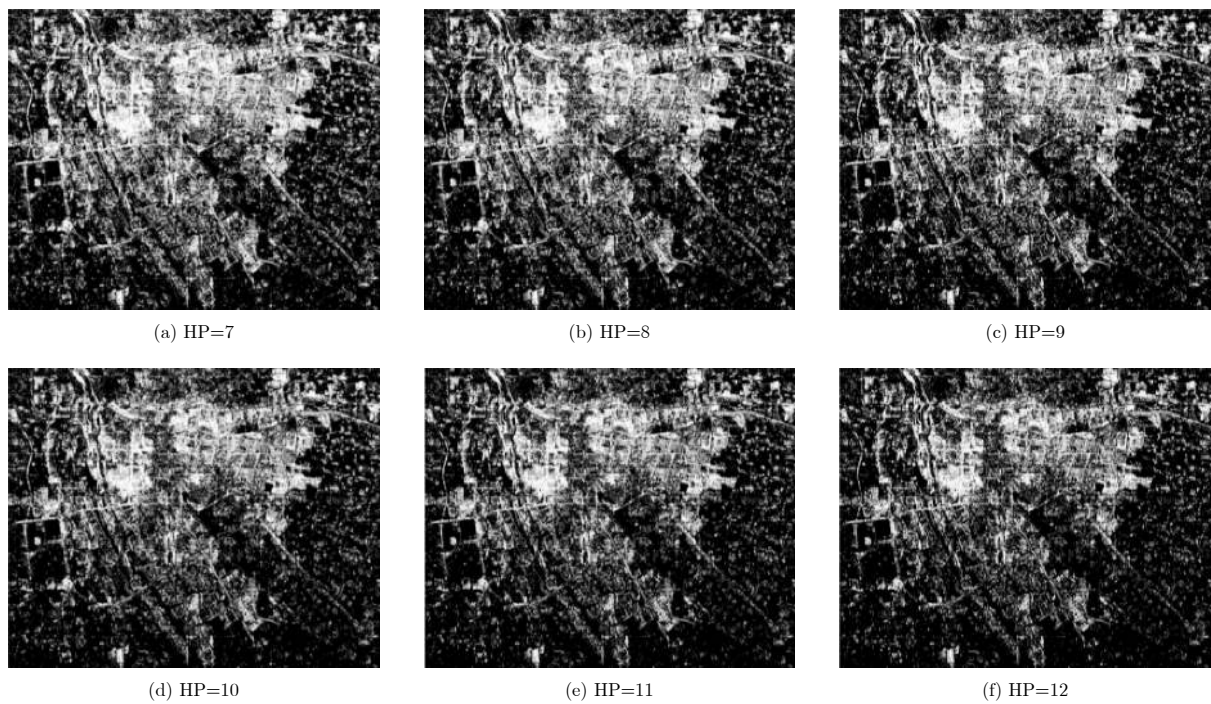
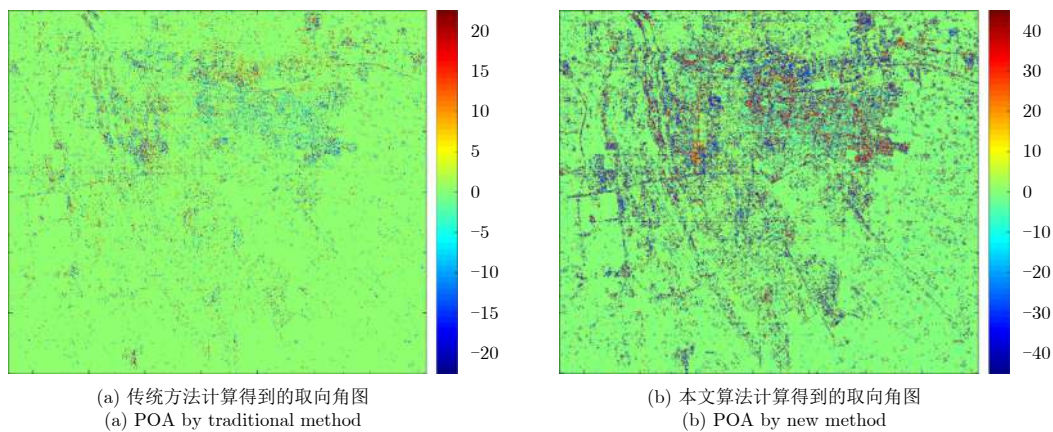


图9 异构参数阈值为7到12时都江堰地区图像状态

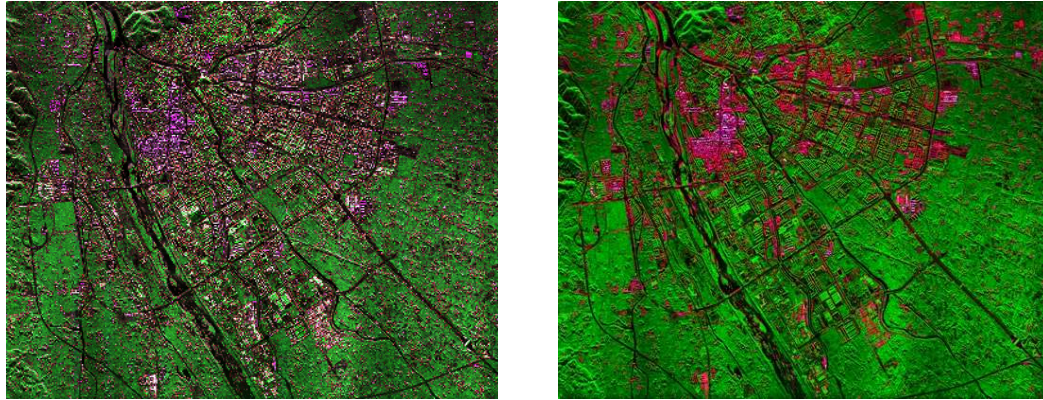
Fig. 9 Approximate results of distinguished built-up areas with different threshold values of the heterogeneous parameter. (a)–(f) Show the results with the thresholds of 7 to 12, respectively



(a) 传统方法计算得到的取向角图
(a) POA by traditional method
(b) 本文算法计算得到的取向角图
(b) POA by new method

图10 传统方法和本文方法计算得到的都江堰地区的取向角

Fig. 10 POA of the Dujiangyan area calculated by the traditional method and the new method



(a) Pauli 分解结果
(a) Result of Pauli decomposition
(b) Yamaguchi 分解结果
(b) Result of four-component decomposition

图 11 使用基于高分辨率图像的POA校正算法进行去取向后的分解结果

Fig. 11 Result of Dujiangyan image decomposition using POA correction method proposed in this paper

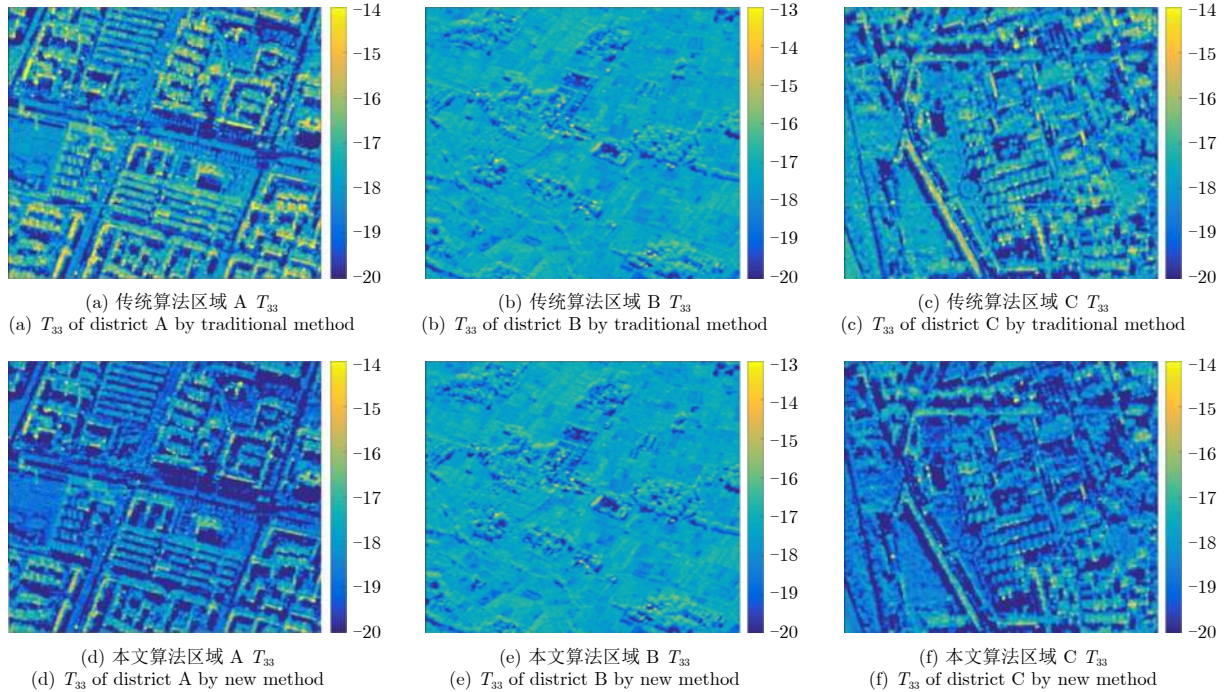


图 12 A, B, C地区使用传统算法和本文算法后得到的 T_{33} 值

Fig. 12 T_{33} of districts A, B and C after rotation using POAs calculated by the traditional method and the new method

表 1 A, B, C区域中交叉极化 T_{33} 项平均值

Tab. 1 Average T_{33} of districts A, B and C after rotation using POAs calculated by the traditional method and the new method

区域	传统方法 T_{33} 平均值	本文方法 T_{33} 平均值
A	4.6321e-08	1.5611e-08
B	3.5252e-08	3.5252e-08
C	2.9456e-08	1.3435e-08

通过图12和表1对 T_{33} 的分析可以看出，在经过本算法进行取向角校正之后， T_{33} 在建筑物区域(A, B区域)有明显的下降，在平原地区(C区域)基本保

持不变。验证了本文提出的算法能够有针对性地对城市区域的POA进行校正，并获取最小交叉极化分量的结果。

使用新算法进行取向角校正后的分解结果与传统算法的分解结果对比如图13所示。

首先针对城市区域进行结果分析，区域A与区域C是城市区域。在使用Pauli分解算法时，区域A完全体现了体散射特性，呈绿色(图13(a))；在Pauli分解的区域C中，右半部分的的建筑物呈紫红色，体现了二面角散射机制的散射特性，而左下角的建筑物呈现绿色(图13(c))。通过本文提出的

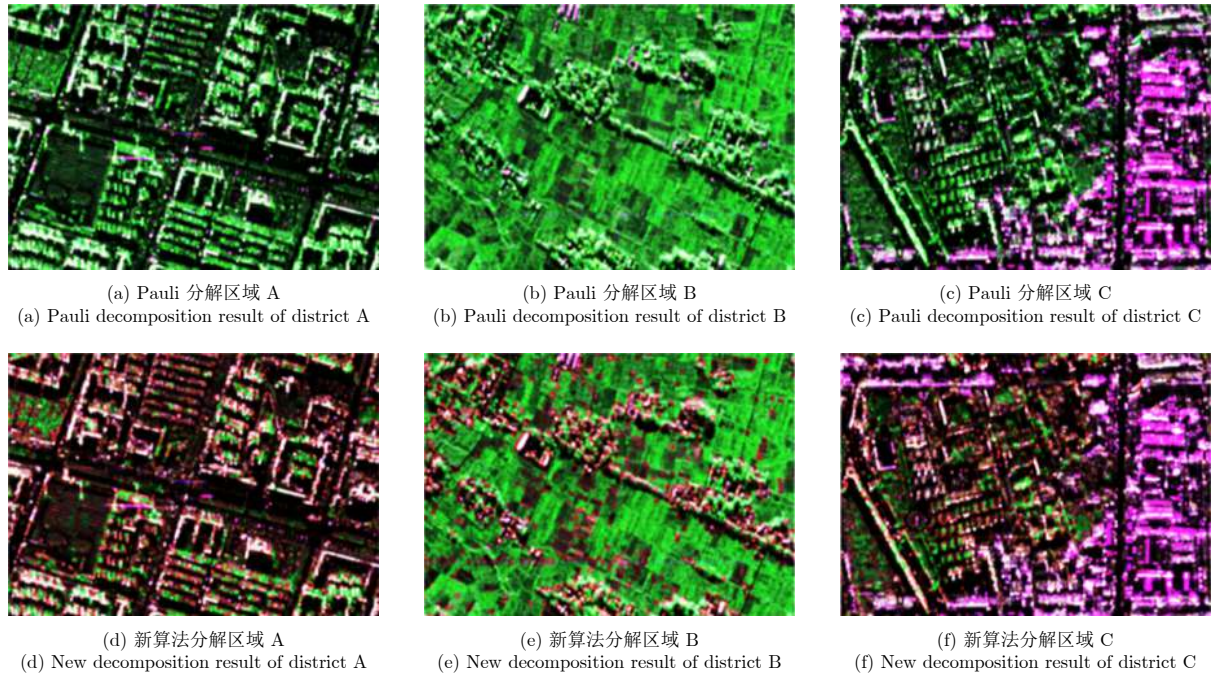


图 13 A, B, C地区使用新算法进行POA校正后分解结果与Pauli分解算法对比图

Fig. 13 Pauli decomposition results and results of decomposition using POA correction method proposed in this paper of districts A, B and C, respectively

POA校正算法后进行分解，区域A与区域C都呈现了红色，即建筑物区域都正确地显示出了二面角散射特性(图13(d)，图13(f))。

区域B是典型的平原地区，在区域B中存在少数独立的建筑，在图13(b)中可以看出，在Pauli分解结果中，区域B呈现了绿色；在使用本文提出的POA校正算法后进行分解，区域B的大部分像素点仍然呈绿色，体现了体散射特性，但是少量的建筑物呈现红色，准确地表现了建筑物的二面角散射特性(图13(e))。

图11(b)展示了使用本文算法进行取向角校正后的Yamaguchi分解结果，通过与图2(b)的对比可以看出，本文方法使得城市区域显示出了较明显的二面角散射特性，呈红色。下面对3个特定区域进行定量分析。表2给出了A, B, C 3个区域表面散射(Ps)，体散射(Pv)和二面角散射(Pd)占总功率的百分比。从表中可以看出，通过本文提出的POA校正算法后进行分解，3个区域的二面角散射功率占总功率百分比得到了提升，在建筑物较多的A, C两个区域提升幅度较大，变化尤为明显。

和传统的POA计算方法进行比较，对所获得的分解结果进行分析可以看出，本文提出的对高分辨率区域进行POA校正的算法，能够使得分解结果更准确。本算法可以有效缓解 $|D_{POA}| > 22.5^\circ$ 区域分解错误的问题。

表 2 A, B, C区域中各散射分量占总功率的百分比

Tab. 2 Percentage of scattering powers with traditional method and the new method

区域	算法	Ps	Pv	Pd
A	传统算法	1.04	84.83	2.69
	本文算法	20.29	62.84	2.84
B	传统算法	0.74	90.35	2.79
	本文算法	14.72	72.61	10.16
C	传统算法	29.34	23.60	43.85
	本文算法	18.35	20.73	56.06

5 结论

基于高分辨率图像取向角跳变的特性，本文提出了一种适用于城区体散射过估问题的取向角校正方法。该方法以取向角随机性为基础，考虑高分辨率图像地物分界明确，散射特性清晰对取向角的影响，分两步对城区取向角进行校正。本文使用X波段全极化机载SAR实验数据对算法进行了验证，获得了与真实地貌相符的分解结果，有效缓解了城区体散射分量占主导的问题，验证了算法的有效性。

参考文献

- [1] 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. DOI: 10.12000/JR16092.
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. DOI: [10.12000/JR16092](https://doi.org/10.12000/JR16092).
- [2] 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(2): 498–518. DOI: [10.1109/36.485127](https://doi.org/10.1109/36.485127).
- [3] 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. DOI: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
Wang Xue-song. Status and prospects of radar polarimetry techniques[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(2): 119–131. DOI: [10.12000/JR16039](https://doi.org/10.12000/JR16039).
- [4] 王超, 张红, 陈曦, 等. 全极化合成孔径雷达图像处理[M]. 北京: 科学出版社, 2008
Wang Chao, Zhang Hong, Chen Xi, *et al.* Full Polarimetric SAR Image Processing[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2008
- [5] Krogager E. New decomposition of the radar target scattering matrix[J]. *Electronics Letters*, 1990, 26(18): 1525–1527. DOI: [10.1049/el:19900979](https://doi.org/10.1049/el:19900979).
- [6] Van Zyl J J. Unsupervised classification of scattering behavior using radar polarimetry data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1989, 27(1): 36–45. DOI: [10.1109/36.20273](https://doi.org/10.1109/36.20273).
- [7] Cloude S R. Target decomposition theorems in radar scattering[J]. *Electronics Letters*, 1985, 21(1): 22–24. DOI: [10.1049/el:19850018](https://doi.org/10.1049/el:19850018).
- [8] Pottier E. Unsupervised classification scheme and topography derivation of POLSAR data based on the H/A/ α polarimetric decomposition theorem[C]. Proceedings of the 4th International Workshop on Radar Polarimetry, Nantes, France, 1998: 535–548
- [9] 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](https://doi.org/10.12000/JR17033).
Chen Si-wei, Li Yong-zhen, Wang Xue-song, *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](https://doi.org/10.12000/JR17033).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] Lee J S, Schuler D L, and Ainsworth T L. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(5): 2153–2163. DOI: [10.1109/36.868874](https://doi.org/10.1109/36.868874).
- [13] 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).
- [14] Kimura H. Radar polarization orientation shifts in Built-Up areas[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 217–221. DOI: [10.1109/LGRS.2008.915737](https://doi.org/10.1109/LGRS.2008.915737).
- [15] 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).
- [16] 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(2): 273–277. DOI: [10.1109/LGRS.2012.2203577](https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2203577).
- [17] 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(4): 79–89. DOI: [10.1109/MSP.2014.2312099](https://doi.org/10.1109/MSP.2014.2312099).
- [18] 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](https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2210050).

作者简介



孙翔(1990–), 女, 籍贯浙江绍兴, 中国科学院电子学研究所博士研究生, 主要研究方向为极化干涉合成孔径雷达系统及信号处理。

E-mail: feixiang19913@163.com



宋红军(1968–), 男, 中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR系统仿真、成像新体制研究、信号处理。

E-mail: hjsong@mail.ie.ac.cn



王宇(1980–), 男, 河南人, 现为中国科学院电子学研究所研究员, 博士生导师, 研究方向为SAR系统设计与信号处理技术。

E-mail: yuwang@mail.ie.ac.cn



李宁(1987–), 男, 安徽人, 毕业于中国科学院电子学研究所, 获得博士学位, 现为河南大学教授, 研究方向为多模式合成孔径雷达成像及其应用技术。

E-mail: lining_nuaa@163.com