

# 一种适合方位建筑物的基于物理散射模型的极化 SAR 影像四分量分解方法

闫丽丽<sup>1,2</sup>, 张继贤<sup>1</sup>, 高井祥<sup>2</sup>, 黄国满<sup>1</sup>

(1. 中国测绘科学研究院, 北京 100830; 2. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116)

**摘要:** 针对走向与雷达飞行方向不平行的建筑物(简称为方位建筑物), 提出了一种基于物理散射模型的极化 SAR 影像四分量分解方法. 该方法用于区分散射类型易混淆的方位建筑物和植被. 本文首先对方位角补偿后的相干矩阵进行相位旋转; 然后构造一种修正的体散射模型, 该模型包含纯体散射模型和方位二面角散射模型; 最后加入两个能量限制条件, 有效避免了负能量像素点的出现. 实验结果表明, 与已有的四分量分解方法相比, 提出的分解方法有效解决了方位建筑物被误识别为植被等体散射类型的问题且消除了负能量, 有利于从植被中区分方位建筑物.

**关键词:** 极化 SAR; 四分量分解; 方位建筑物; 体散射模型; 相位旋转; 方位角补偿

**中图分类号:** TP753 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2015)01-0203-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2015.01.032

## Four-Component Model-Based Decomposition of Polarimetric SAR Data for Oriented Urban Buildings

YAN Li-li<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-xian<sup>1</sup>, GAO Jing-xiang<sup>2</sup>, HUANG Guo-man<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China;

2. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

**Abstract:** This paper presents an improvement to a four-component model-based decomposition scheme of polarimetric synthetic aperture radar (SAR) images for oriented urban buildings. Techniques to discriminate the ambiguity between oriented buildings and vegetation are proposed. First, phase rotation (PR) of the coherency matrix after orientation angle compensation (OAC) is derived to minimize the cross-polarization component. Second, an alternative volume scattering model with a criterion for pure randomness scatterers and/or oriented dihedral structures is introduced in the proposed decomposition. Finally, power constraints are appended to the scheme to prevent negative powers. It is shown that the oriented urban buildings are well distinguished as double bounce objects from vegetation areas compared to those from the existing four component decompositions and the negative powers are eliminated.

**Key words:** polarimetric synthetic aperture radar (SAR); four-component decomposition; oriented buildings; volume scattering model; phase rotation (PR); orientation angle compensation (OAC)

## 1 引言

极化目标分解在全极化 SAR 影像的分类、变化检测、目标识别和地表参数反演中起着重要的作用<sup>[1]</sup>. 基于物理模型的非相干分解技术是当前极化分解研究的热点. Freeman 和 Durden<sup>[2]</sup>假设散射体满足互易性和反射对称性, 提出了基于表面散射、偶次散射和体散射三种散射模型的非相干目标分解方法. Yamaguchi 等人<sup>[3]</sup>扩展了 Freeman 三分量的散射分解, 加入螺旋散射作为第四分量并且考虑不同情况下的分布提出新的体散射

模型.

然而, 在城市建筑物区域使用 Yamaguchi 分解存在以下两个问题. 一个问题是走向与雷达方位向有一个倾斜角度的建筑物, 即方位建筑物, 被分解为如树木或者植被的体散射类型, 这是由于在倾斜照射情况下交叉极化分量 HV 的增加引起的. 另一个问题是 Yamaguchi 分解会出现负能量像素点. 这表明对于这些负能量像素点而言, Yamaguchi 分解模型和地物的实际散射机理不一致. 为了解决这些问题, 部分国内外研究人员已经开展了这方面的研究工作. Lee 和 Ainsworth<sup>[4]</sup>阐述了极化方

位角补偿(Orientation Angle Compensation,简称 OAC)对相干矩阵的影响和对基于散射模型的 Freeman-Durden<sup>[2]</sup>和 Yamaguchi<sup>[3]</sup>分解的影响. Yamaguchi 等人<sup>[5]</sup>又通过极化方位角补偿旋转相干矩阵,进而扩展了先前的四分量分解方法<sup>[3]</sup>.该方法改善了对极化方位角(Polarization Orientation Angle,简称 POA)为 0°或 90°附近的方位建筑物的识别.单子力等人<sup>[6]</sup>提出一种基于模型的极化 SAR 影像四分量分解方法,用于处理极化方位角为 45°左右的建筑物. Sato 等人<sup>[7]</sup>提出一种适合奇次或偶次散射的体散射模型用于其改进的四分量散射能量分解方法,该方法减少了城市建筑物区域的体散射能量. Singh 等人<sup>[8]</sup>利用对相干矩阵的相位旋转(Phase Rotation,简称 PR)最小化旋转矩阵元素  $T_{33}$ ,且减少了负能量的发生.安文韬等人<sup>[9]</sup>提出了改进的 Freeman 分解方法,利用 OAC 和一种新的体散射模型消除了负能量的发生.在城区应用方面,单子力等人<sup>[10]</sup>扩展了安文韬的三分量分解方法<sup>[9]</sup>,消除了 Yamaguchi 分解中负能量的发生. Singh 等人<sup>[11]</sup>提出了一种基于相干矩阵酉变换的四分量分解方法.该分解方法采用了一种扩展的体散射模型,用于区分偶极子体散射类型和二面角散射结构体散射类型.然而,对于城区方位建筑物,仍然存在体散射能量的过高估计问题,即由交叉极化分量的误分配引起的散射机理的模糊仍然存在.对城区中具有较大 POA 的方位建筑物,这一模糊现象极其突出.然而,在 Singh 方法<sup>[11]</sup>中作为体散射模型之一的偶极子云并不能充分地描述实际的体散射结构.

因此,本文构建更符合实际地物散射机理的修正的体散射模型,提出一种适合方位建筑物的四分量分解方法.经实验验证,该分解方法可有效区分方位建筑物区与植被区.

## 2 相干矩阵的旋转

### 2.1 相干矩阵的极化方位角补偿

对于相干矩阵  $\mathbf{T}$ ,极化方位角补偿(OAC)的表达式见式(1):

$$\mathbf{T}(\theta) = \mathbf{R}(\theta) \mathbf{T}[\mathbf{R}(\theta)]^\dagger = \begin{bmatrix} T_{11}(\theta) & T_{12}(\theta) & T_{13}(\theta) \\ T_{12}^*(\theta) & T_{22}(\theta) & T_{23}(\theta) \\ T_{13}^*(\theta) & T_{23}^*(\theta) & T_{33}(\theta) \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中,上标<sup>†</sup>表示复共轭转置,上标<sup>\*</sup>表示复共轭,OAC 的旋转矩阵  $\mathbf{R}(\theta)$ 的表达式见式(2):

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

由于发射波的极化方位角 POA 随着散射体的几何

结构的不同而产生改变,使得极化方位角偏移与地形坡度和雷达入射角有关<sup>[12]</sup>.极化方位角包含地形坡度和人工建筑物方位等信息. Yamaguchi 等人<sup>[5]</sup>通过最小化  $T_{33}(\theta)$ 元素,推导出了相干矩阵的旋转角  $\theta$ .该方法不仅简单,而且其表达式与已有的论文<sup>[12~17]</sup>推导的表达式相同.因此,本文在提出的分解中采用该方法来估计 POA.利用相干矩阵计算该旋转角的表达式,见式(3):

$$\theta = \frac{1}{4} \arctan\left(\frac{2\operatorname{Re}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} + \pi\right) \quad (3)$$

当  $\theta > \pi/4$  时,将  $\theta$  替换为  $\theta - \pi/2$ .

极化方位角补偿通过最小化  $T_{33}(\theta)$ 值,降低了体散射能量  $P_v$ ,同时  $T_{23}(\theta)$ 元素的实部变为 0.然而,这样会引起负能量出现在  $P_v$ 分量的像素点的增加.为了更进一步地降低在城区方位建筑物区的体散射能量,同时减少负能量的像素点,本文将引入相干矩阵的相位旋转 PR,该旋转是通过基于复数形式的酉变换实现的.

### 2.2 相干矩阵的相位旋转

在四分量散射能量分解<sup>[4,5]</sup>中,体散射能量的过高估计是由于地形和方位建筑物引起的.相干矩阵的相位旋转是沿着雷达视向对相干矩阵进行复数形式的酉变换,该旋转可以减小地形和方位建筑物的影响.本文引入的最小化相位旋转矩阵元素  $T_{33}(\theta, \phi)$ 的思想<sup>[8]</sup>与推导 POA 的思想<sup>[5]</sup>相似.

对极化方位角补偿后的相干矩阵  $\mathbf{T}(\theta)$ ,进行相位旋转,表达式见式(4):

$$\mathbf{T}(\theta, \phi) = \mathbf{R}(\phi) \mathbf{T}(\theta) [\mathbf{R}(\phi)]^\dagger = \begin{bmatrix} T_{11}(\theta, \phi) & T_{12}(\theta, \phi) & T_{13}(\theta, \phi) \\ T_{12}^*(\theta, \phi) & T_{22}(\theta, \phi) & T_{23}(\theta, \phi) \\ T_{13}^*(\theta, \phi) & T_{23}^*(\theta, \phi) & T_{33}(\theta, \phi) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,以复数形式表示的相位旋转矩阵表达式,见式(5):

$$\mathbf{R}(\phi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(2\phi) & \operatorname{jsin}(2\phi) \\ 0 & \operatorname{jsin}(2\phi) & \cos(2\phi) \end{bmatrix} \quad (5)$$

最小化元素  $T_{33}(\theta, \phi)$ 得到的相位旋转角  $\phi$ ,见式(6):

$$\phi = \frac{1}{4} \arctan\left(\frac{2\operatorname{Im}(T_{23})}{T_{22} - T_{33}} + \pi\right) \quad (6)$$

当  $\phi > \pi/4$  时,将  $\phi$  替换为  $\phi - \pi/2$ .

在相干矩阵进行相位旋转后,元素  $T_{23}(\theta, \phi)$ 的虚部变为 0,实部为旋转不变量,因此,元素  $T_{23}(\theta, \phi)$ 变为 0,即螺旋散射能量接近于 0,使得四分量分解的输出变成三分量.为了解决 Freeman 分解和 Yamaguchi 分解存在的几个问题,下面将对体散射模型进行改进,同时提出了改进的分解方案.

### 3 一种适合方位建筑物的基于物理散射模型的四分量分解方法

#### 3.1 一种修正的体散射模型

在 Freeman 分解<sup>[2]</sup>和 Yamaguchi 分解<sup>[3,5]</sup>中,交叉极化 HV 分量被分配为由植被引起的体散射类型,体散射模型为方位随机分布的偶极子云.实际上,体散射是几种散射机理的组合,例如植被的体散射和方位建筑物的偶次散射.Sato 等人<sup>[7]</sup>基于偶极子云,提出了一种修正的体散射模型,该模型包含二面角结构和方位随机偶极子散射体,有利于从植被中区分方位建筑物.然而,偶极子云并没有准确描述实际的体散射.因此,提出一种修正的体散射模型,该模型包含纯体散射和方位二面角散射.

相干矩阵经过方位角补偿 OAC 和相位旋转两次旋转后,由  $\text{Re}\{\langle S_{HH}S_{VV}^* \rangle\}$  (其中,  $\langle \cdot \rangle$  表示多视平均)的正负号确定占主导的散射机制.通过扩展协方差矩阵元素  $C_{13}$  且忽略体散射项,判断条件也可重新写成式(7)形式:

$$C_0 = T_{11}(\theta, \phi) - T_{22}(\theta, \phi) + \frac{1}{2}P_c \quad (7)$$

根据  $C_0$  的正负号,体散射模型被分配成纯随机体散射或者方位二面角结构体散射,判断条件见式(8)、(9):

$$C_0 > 0: \text{纯随机体散射} \quad (8)$$

$$C_0 \leq 0: \text{方位二面角结构体散射} \quad (9)$$

当  $C_0 > 0$  时,体散射模型为纯随机体散射,用于描述植被的整体随机性,表达式见式(10):

$$T_V^r = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

该模型为单位矩阵,具有最高的极化熵<sup>[9]</sup>,即  $H = 1$ ,是非常适合于植被区域的体散射模型.

当  $C_0 \leq 0$  时,本文引入一种扩展的相干矩阵作为方位二面角结构的体散射模型<sup>[7]</sup>.通过对方位二面角反射器的相干矩阵和概率密度函数  $p(\theta)$  乘积的积分,得到该扩展矩阵,见式(11):

$$T_V^d = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7 & 0 \\ 0 & 0 & 8 \end{bmatrix} \quad (11)$$

#### 3.2 提出的四分量分解构成

本文提出的四分量分解用相干矩阵来表示,见式(12),该分解利用了提出的修正的体散射模型,即纯随机散射体和/或方位二面角

结构的体散射模型.

$$T(\theta, \phi) = P_s T_s + P_d T_d + P_c T_c + \begin{cases} P_v T_v^r, & \text{for } C_0 > 0 \\ P_v T_v^d, & \text{for } C_0 \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $T_s$ 、 $T_d$ 、 $T_c$  与 Yamaguchi 分解中对应的模型一样,  $T_v^r$  和  $T_v^d$  的表达式分别见式(10)和式(11).总能量  $P$  被分解为表面散射能量  $P_s$ 、偶次散射能量  $P_d$ 、来自纯随机散射体和/或方位二面角结构的体散射能量  $P_v$ 、螺旋散射能量  $P_c$ .

#### 3.3 提出的四分量分解方法

本文提出的四分量分解流程图,见图 1.首先,在分解前,为了最小化交叉极化分量,先对相干矩阵进行极化方位角补偿与相位旋转.经过两次旋转,元素  $T_{23}(\theta, \phi)$  变为 0,使得螺旋散射能量接近于 0.然后,通过判断  $C_0$  的正负号来分配主导散射机制.如果表面散射占主

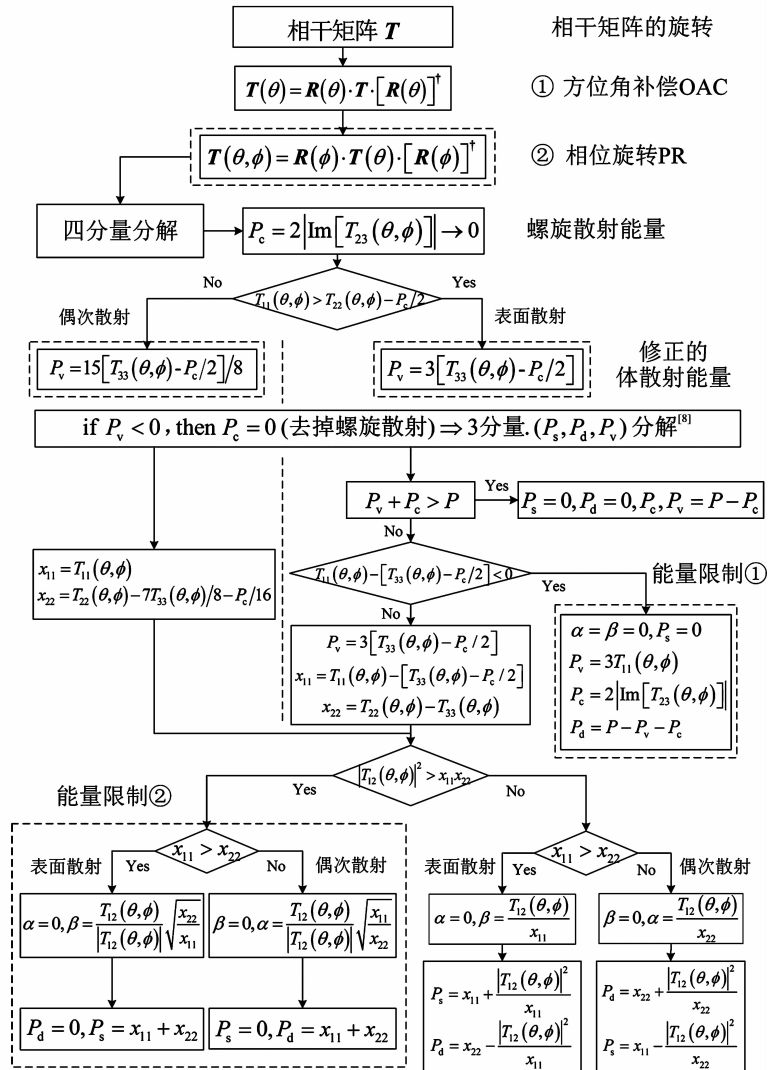


图1 提出的四分量分解流程图

导,采用式(10)中的单位矩阵体散射模型;如果偶次散射占主导,采用式(11)中方位二面角结构的体散射模型.在确定了修正的体散射模型后,就可确定体散射能量.

为了避免当表面散射占主导时负表面散射能量  $P_s$  的出现,加入第一个能量限制条件  $C_1 = T_{11}(\theta, \phi) - [T_{33}(\theta, \phi) - P_c/2] < 0$ . 此时,体散射能量又变为式(13):

$$P_v = 3\min[T_{11}(\theta, \phi), T_{33}(\theta, \phi) - P_c/2] \quad (13)$$

从两次旋转后的相干矩阵  $\mathbf{T}(\theta, \phi)$  中减去体散射分量. 如果  $C_1 < 0$ , 表面散射能量为 0, 且将剩余能量认为是偶次散射能量, 见式(14):

$$P_d = T_{22}(\theta, \phi) + T_{33}(\theta, \phi) - 2T_{11}(\theta, \phi) - P_c \quad (14)$$

如果  $C_1 \geq 0$ , 将  $T_{11}(\theta, \phi)$  和  $T_{22}(\theta, \phi)$  中的剩余部分分别写成  $x_{11}$  和  $x_{22}$ , 见式(15):

$$\begin{aligned} x_{11} &= T_{11}(\theta, \phi) - [T_{33}(\theta, \phi) - P_c/2] \\ x_{22} &= T_{22}(\theta, \phi) - T_{33}(\theta, \phi) \end{aligned} \quad (15)$$

当偶次散射占主导时,则没有必要使用第一个能量限制条件. 从  $\mathbf{T}(\theta, \phi)$  中减去体散射能量后,可得到分别表示  $T_{11}(\theta, \phi)$  和  $T_{22}(\theta, \phi)$  剩余部分的  $x_{11}$  和  $x_{22}$ , 见式(16):

$$\begin{aligned} x_{11} &= T_{11}(\theta, \phi) \\ x_{22} &= T_{22}(\theta, \phi) - 7T_{33}(\theta, \phi)/8 - P_c/16 \end{aligned} \quad (16)$$

最后,为了避免负的表面散射能量  $P_s$  或负的偶次散射能量  $P_d$  的出现,加入第二个能量限制条件  $C_2 = |T_{12}(\theta, \phi)|^2 - x_{11}x_{22} > 0$ . 通过  $C_2$  和  $C_3 = x_{11} - x_{22}$  的正负号,再次判断占主导的散射机制. 如果  $C_2 > 0$ , 在  $\mathbf{T}(\theta, \phi)$  的剩余部分里只有一种类型的散射机制. 当  $C_3 > 0$  时,剩余分量只有  $P_s$ ; 反之,剩余分量只有  $P_d$ . 如果  $C_2 \leq 0$ , 则表面散射和偶次散射中的一种散射类型占主导. 当  $C_3 > 0$  时,表面散射占主导; 反之,偶次散射占主导. 提出的四分量分解中的散射能量满足能量之和等于  $P$  的条件,且每个散射能量全都是非负的.

## 4 实验结果与分析

实验采用的极化 SAR 数据为国产 X 波段机载极化干涉 SAR 系统(X-SAR)在海南省陵水县获取的 X 波段极化 SAR 数据. 该系统由中国电子科技集团公司第三十八研究所(简称中国电科 38 所)研制完成. 影像大小为  $1068 \times 1200$ . 距离向和方位向的视数分别为 1 和 4, 原始影像分辨率为 1 米, 雷达中心入射角约为  $46^\circ$ . 图 2(a) 为陵水民族中学附近对应的 Google earth 光学影像灰度图, 可以看出, 该区域的地物主要包含方位建筑物、茂密的植被、操场、农田和海南环岛高速公路等. 图 2(b) 所示为所选区域精细极化 Lee 滤波<sup>[18]</sup>后的总功率

图, 方位向和距离向分别标注于影像的顶部和左侧.

对图 2 中对应的极化 SAR 影像分解结果进行比较, 见图 3. 由于螺旋散射能量比其它散射能量更低, 在合成图中, 不显示螺旋散射能量, 偶次散射能量  $P_d$ 、体散射能量  $P_v$ 、表面散射能量  $P_s$  合成后以灰度图显示. 为了分析分解结果, 选择图 3 中标记为白色圈的三块区域作为典型区域. 图 2(a) 中所示, 植被区域位于影像的右下角. 植被区域在图 3(a) 和 (b) 中的颜色均为灰色, 如区域 3. 在图 3(c) 中, 植被区域由灰色变成了深灰色. 这是因为在茂密植被区域, POA 分布中心在  $0^\circ$  左右, 同时相位旋转角分布表现为噪声, 所以在该区域没有必要进行极化方位角补偿和相位旋转. 因此, 在图 3(d) 中, 采用单子力提出的分解<sup>[10]</sup>中, 利用 H/ $\alpha$ /A 分类方法将植被区域从其它地物中分离出来, 然后利用 Yamaguchi 分解方法进行处理. 从图 3(d) 可以看出, 植被区域的像素变为灰色, 与实际情况相符合, 如区域 3. 从图 2(a) 中可看出, 学校的方位建筑物区位于影像的中心. 在图 3(a) 的 Yamaguchi 分解结果图中, 方位建筑物区的大量像素显示为灰色. 在 OAC 后的 Yamaguchi 分解结果图 3(b) 中, 方位建筑物区仍然存在很多浅灰色像素, 如区域 1 和 2. Yamaguchi 分解结果和 OAC 后的 Yamaguchi 分解结果比较表明, 体散射仍然被过高估计且占主导. 因此, 这两种分解方法很难从植被区域中区分出方位建筑物区. 在提出的分解方法结果图 3(c) 和 (d) 中, 方位建筑物区域的像素由浅灰色变为白色, 尤其在区域 1 和区域 2 中最为明显. 这是因为提出的分解方法进行了式(4)中相干矩阵的极化方位角补偿和相位旋转, 同时采用了式(10)和(11)中修正的体散射模型, 使得最大限度地降低了体散射能量. 图 3 中显示的黑色区域分别代表农田、学校操场跑道和高速公路, 说明在这些区域表面散射占主导. 由于这些区域的散射能量比建筑物区和植被区的散射能量更低, 在图 3 中显示接近黑色. 在图 3 左侧的农田区域中, 存在少量的浅灰色像素区域, 这是由于由地面和农作物枝干组成的二面角结构引起的.

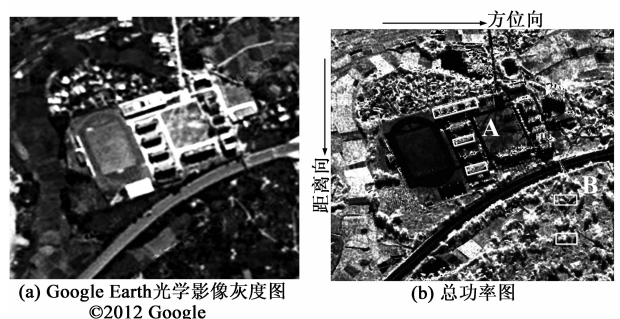


图2 海南省陵水民族中学附近机载SAR数据试验区

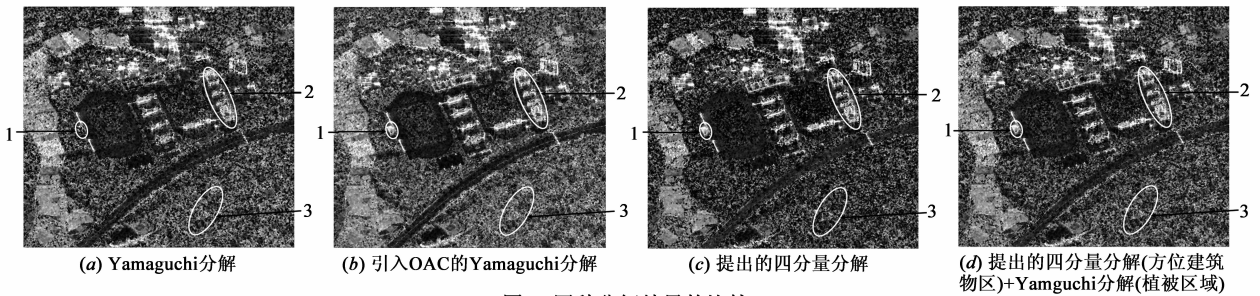


图3 四种分解结果比较

表 1 统计了不同的分解方法中出现负能量像素点的个数.很明显,当使用了 OAC、PR 和修正的体散射模型后,负能量像素点的个数从 32680 减少到 1092.当两个能量限制条件加入到提出的分解中时,负能量像素点个数减少为 0.

表 1 负能量像素点统计

分解方法	负能量像素点的个数
Yamaguchi 分解	32680
OAC + Yamaguchi 分解	22875
OAC + PR + Yamaguchi 分解	2263
OAC + PR + 修正的体散射模型 + Yamaguchi 分解	1092
提出的四分量分解	0

为了定量地验证提出的分解方法的有效性,对图 2 (b)中区域 A 方位建筑物区的不同分解方法的散射能量分布进行对比,见图 4(a)~(d).在图 4(a)中,体散射能量  $P_v$  占总能量的 32%.这就解释了在 Yamaguchi 分解结果中方位建筑物呈现灰色的原因.图 4(b)中,OAC 处理后,使得  $P_v$  的比例降低到 12%,偶次散射能量  $P_d$  却从 33% 增加到 51%.同时,  $P_d$  和  $P_v$  之间的比值从 1.03 增加到 4.25.在图 4(c)中,由于提出的分解方法中对相干矩阵进行了 OAC 和 PR,同时利用了修正

的体散射模型,  $P_d$  的比例略微减少到 48%,但  $P_d$  和  $P_v$  之间的比值却上升到 6.00,螺旋散射能量  $P_c$  变为 0.事实上,  $P_d$  和  $P_v$  的比值要比  $P_d$  和  $P_v$  本身更能很好地表征提出的方法对偶次散射和体散射的合理分配程度.在图 4(d)中,  $P_d$  和  $P_v$  各自占的比例均有轻微的变化,且  $P_d$  和  $P_v$  之间的比值降低到 5.44,  $P_c$  的比例为 1%.这是由于在提出的分解中将植被区域分离出去,对该区域仍然采用 Yamaguchi 分解所引起的.对于方位建筑物区,两次旋转和修正的体散射模型在很大程度上提高了分解的精度.因此,本文提出的分解方法在方位建筑物区有更加合理的结果,对于后期进行方位建筑物的检测提供了很好的特征依据.

## 5 结论

本文提出了一种适合方位建筑物的基于物理散射模型的极化 SAR 影像分解方法.该方法有效解决了已有分解方法存在体散射能量被过高估计、表面散射与偶次散射能量会出现负能量像素点、方位建筑物区被识别为体散射类型的三个问题.值得注意的是,本文提出的分解方法更适合于方位建筑物区,所以在使用本文分解方法时,需将植被区域分离开,对于植被区域仍采用 Yamaguchi 分解方法.本文采用国产机载 X 波段极化 SAR 影像进行实验验证,结果表明,提出的分解方法与实际地物散射机理更加符合,尤其在城市方位建筑物区获得了比已有基于模型的分解方法更加合理有效的实验结果,因此,提出的分解方法能更准确地获取方位建筑物区的极化散射信息.

**致谢** 非常感谢中国电科 38 所和中国测绘科学研究院提供国产机载 X 波段极化 SAR 数据.

## 参考文献

[1] 陈强,蒋咏梅,等.一种基于目标散射鉴别的 POLSAR 图像地物无监督分类新方法[J].电子学报,2011,39(3):613-618.

Chen Qiang, Jiang Yongmei, et al. A new scattering-identification based unsupervised terrain classification for POLSAR im-

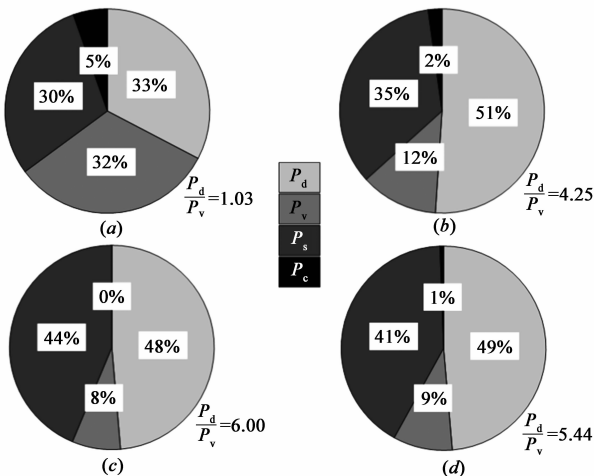


图4 散射能量比例的对比图.(a) Yamaguchi分解;(b)引入OAC的Yamaguchi分解;(c)提出的四分量分解;(d)提出的四分量分解(方位建筑物区)+Yamaguchi分解(植被区域)

- age[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3): 613 – 618. (in Chinese)
- [2] A Freeman, S L Durden. A three-component scattering model for polarimetric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(3): 963 – 973.
- [3] Y Yamaguchi, T Moriyama, et al. Four component scattering model for polarimetric SAR image decomposition [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2005, 43(8): 1699 – 1706.
- [4] J S Lee, T L. Ainsworth. The effect of orientation angle compensation on coherency matrix and polarimetric target decompositions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(1): 53 – 64.
- [5] Y Yamaguchi, A Sato, 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.
- [6] Z Shan, H Zhang, et al. Four-component model-based decomposition of polarimetric SAR data for special ground objects [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(5): 989 – 993.
- [7] A Sato, Y Yamaguchi, et al. Four-component scattering power decomposition with extended volume scattering model [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(2): 166 – 170.
- [8] G Singh, Y Yamaguchi, et al. 4-Component scattering power decomposition with phase rotation of coherency matrix [A]. 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium [C]. Vancouver, BC, 2011. 4103 – 4106.
- [9] W An, Y Cui, et al. Three-component model-based decomposition for polarimetric SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(6): 2732 – 2739.
- [10] Z Shan, C Wang, et al. Improved four-component model-based target decomposition for polarimetric SAR data [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(1): 75 – 79.
- [11] G Singh, Y Yamaguchi, et al. General four-component scattering power decomposition with unitary transformation of coherency matrix [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(5): 3014 – 3022.
- [12] J S Lee, D L Schuler, et al. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2153 – 2163.
- [13] D L Schuler, J S Lee, et al. Measurement of topography using polarimetric SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(5): 1266 – 1277.
- [14] J S Lee, D L Schuler, 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.
- [15] J S Lee, E Pottier. Polarimetric Radar Imaging from Basics to Applications [M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009. 336 – 337.
- [16] S R Cloude, E Pottier. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(2): 498 – 518.
- [17] J S Lee, M R Grunes, et al. Unsupervised classification using polarimetric decomposition and the complex Wishart classifier [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2249 – 2257.
- [18] J S Lee, M R Grunes, et al. Polarimetric SAR speckle filtering and its implication for classification [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2363 – 2373.

## 作者简介



闫丽丽 女, 1985 年生于山西霍州. 博士, 中国测绘科学研究院博士后. 主要研究方向为极化/极化干涉 SAR 影像信息提取.

E-mail: yanlili116@gmail.com



张继贤 男, 1965 年生于陕西商洛. 中国测绘科学研究院研究员, 博士生导师, 主要从事摄影测量与遥感、地理信息系统等领域的研究工作.