

双站 SAR 图像的极化分析

徐 丰 金亚秋*

(复旦大学波散射与遥感信息教育部重点实验室 上海 200433)

摘 要: 该文对双站 SAR(BISAR)模拟图像不同地物的极化特征分析,发现传统单站极化特征参数(α, β, γ)在 BISAR 图像上不再能有效地表现地物散射的极化特征。由此,提出了统一双站极化基变换,重新定义了极化特征参数 α, β, γ ,使其保持原有的分离取向关联等优点。经统一双站极化基变换后,不同地物散射的极化特征更明显,重新定义的 α, β, γ 能反应不同散射机制,提供了 BISAR 图像解译和地表分类的初步手段。

关键词: 双站极化 SAR; 模拟双站 SAR 图像; 极化特征分析

中图分类号: TP722.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0182-06

Bistatic SAR Polarimetric Analysis

Xu Feng Jin Ya-qiu

(Key Laboratory of Wave Scattering and Remote Sensing Information, Ministry of Education,
Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Making use of bistatic SAR image simulation, polarimetric characteristics of BISAR image are studied. It is found that some conventional polarimetric parameters, such as Cloude's α, β, γ , for interpretation of monostatic SAR image lose their effectiveness for bistatic case. A transform of the unified bistatic polar bases for BISAR image is presented, and the polarimetric parameters, i.e. α, β, γ , are redefined to preserve their merits of orientation independence. Image simulations show that the polarimetric characteristics of different terrain surfaces are well described using these unified bistatic polar bases, and newly redefined α, β, γ are also applicable to interpret different scattering mechanism. It provides a new way for bistatic image interpretation and information retrievals.

Key words: Bistatic polarimetry SAR; Bistatic SAR image simulateion; Polarimetric characteristics analysis

1 引言

高分辨率、全天候、全天时运作的合成孔径雷达(SAR)已成为空间遥感与对地监测的重要手段。常规的单站(monostatic)SAR接收机和发射机在同一平台上,接收地物场景的后向散射。与单站 SAR 不同,双站(bistatic)SAR(BISAR)的接收和发射在不同的平台上,因此具有获取更丰富的方位信息、作用距离远、安全性隐蔽性高等优点^[1,2],逐渐成为当前 SAR 研究的一个热点。

近几年来, BISAR 的硬件技术、信号处理技术、平台技术等已有较成熟的研究。现有 BISAR 的研究大多关于信号处理和技术实现^[3,4],也有少量地物双站散射的地面实验和对应的理论建模研究^[5,6]。但是,双站极化散射信息的解读和定量分析是 BISAR 观测技术应用的最终的关键问题。

为自然场景的 SAR 成像模拟,映射投影算法(Mapping and Projection Algorithm, MPA)^[7]给出了一种快速有效的方法,考虑了典型地物如植被、建筑物、粗糙地面散射,以

及相干斑、原始信号的生成。该算法已进一步推广到双站 SAR 成像的模拟^[8]。本文借助 BISAR 成像模拟,对 BISAR 图像的成像、极化散射特征进行分析,提出了统一双站极化基变换,重新定义了适用于 BISAR 的极化特征参数,为 BISAR 图像解译和地表分类提供一个初步的手段。

2 模拟 BISAR 图像

首先用 MPA 算法^[7,8]模拟典型自然场景的 BISAR 图像,然后进行地物极化特征分析。本文模拟 3 种配置情况:第 1 种为单站(简称 MS),入射角为 45° ;第 2 种为平飞正视(简称 AT),入射角为 45° ,散射角为 25° ;第 3 种为一般平飞斜视(简称 TI),入射角为 $(46^\circ, 15^\circ)$,散射角 $(28^\circ, 150^\circ)$ 。具体参数如表 1 所示。下面给出的模拟例子中各种地物模型的参数取值参照文献^[8]。

设计一个综合虚拟场景,如图 1 所示。这是一个按实际情况设计的居民区场景,包含树木、草地、房屋、道路、池塘,其中树木 A、C 和 B、D 分别为针叶林和阔叶林,树林中树木的分布不重叠地随机生成。

图 2 给出了 3 种配置的模拟 SAR 图像。为了更具有直观性, SAR 图像相对于场景翻转了 90° ,使得雷达视向为从上往下。可以看出,由于入射角配置的不同导致粗糙地面散

2007-07-02 收到, 2008-04-03 改回

国家重点基础研究(2001CB309400)和国家自然科学基金(40637033, 60571050)资助课题

*通信作者

表 1 平台与雷达参数设置

平台位置		雷达参数	
(1)	单站 MS	Rx: (0, 3000, 3000) Tx: (0, 3000, 3000)	脉宽 5 μ s 带宽 150MHz
(2)	平飞正视 AT	Rx: (0, 1400, 3000) Tx: (0, 3000, 3000)	采样率 180MHz 距离分辨率 1m
(3)	平飞斜视 TI	Rx: (-800, 1400, 3000) Tx: (800, 3000, 3000)	飞行速度 100m/s 合成孔径 \approx 102m
Rx-接收机, Tx-发射机		脉冲重复频率	120Hz
载频 C 波段- 5.31GHz		方位分辨率	1m

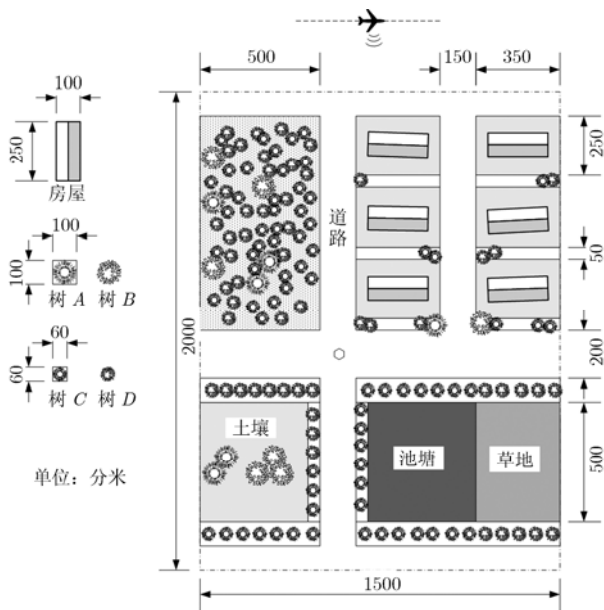


图 1 虚拟场景地物分布图

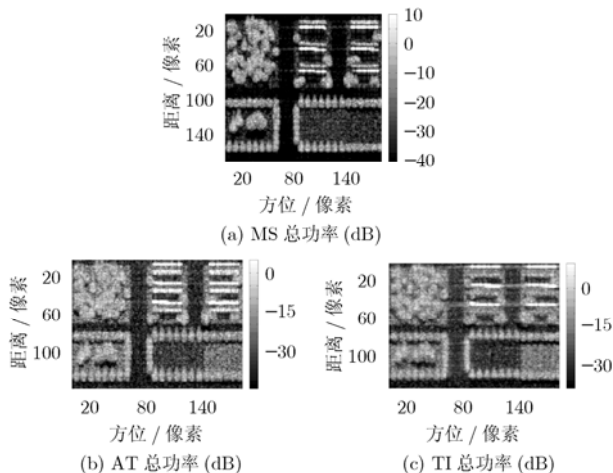


图 2 复杂场景模拟单站与双站 SAR 图像

射强度有明显区别。在单站情况下, 建筑物的二次散射更强, 在平飞正视情况下屋顶直接散射更强, 而在平飞斜视情况下二次散射变得很弱。单从散射强度上看, 散射元随机分布的植被受双站配置的影响很小。对于平飞斜视配置, 由于压缩方法所采用的近似失效, 导致聚焦出现模糊。

3 BISAR 图像的极化特征

未经多视处理或空域平均的极化 SAR 图像的每个像素就是一个散射矩阵 \mathbf{S} (这里定义在天线坐标系下), 包含 $S_{hh}, S_{hv}, S_{vh}, S_{vv}$ 4 个极化分量, 经过 Pauli 分解可以得到散射矢量^[9]:

$$\mathbf{k}_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} S_{hh} + S_{vv} \\ S_{hh} - S_{vv} \\ S_{hv} + S_{vh} \\ iS_{hv} - iS_{vh} \end{bmatrix} \quad (1)$$

进一步经过多视处理或平均, 得到相干矩阵

$$\mathbf{T} = \langle \mathbf{k}_p \cdot \mathbf{k}_p^H \rangle \quad (2)$$

上标 H 表示共轭转置。Cloude 用 \mathbf{T} 的 4 个特征值定义了熵 H 表征地物的随机程度, 定义了角度 α, β, γ 表征 \mathbf{k}_p 的 4 个分量的相对大小^[9]:

$$\mathbf{k}_p = \|\mathbf{k}_p\| \cdot \begin{bmatrix} \cos \alpha e^{j\phi_1} \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\phi_2} \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma e^{j\phi_3} \\ \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma e^{j\phi_4} \end{bmatrix} \quad (3)$$

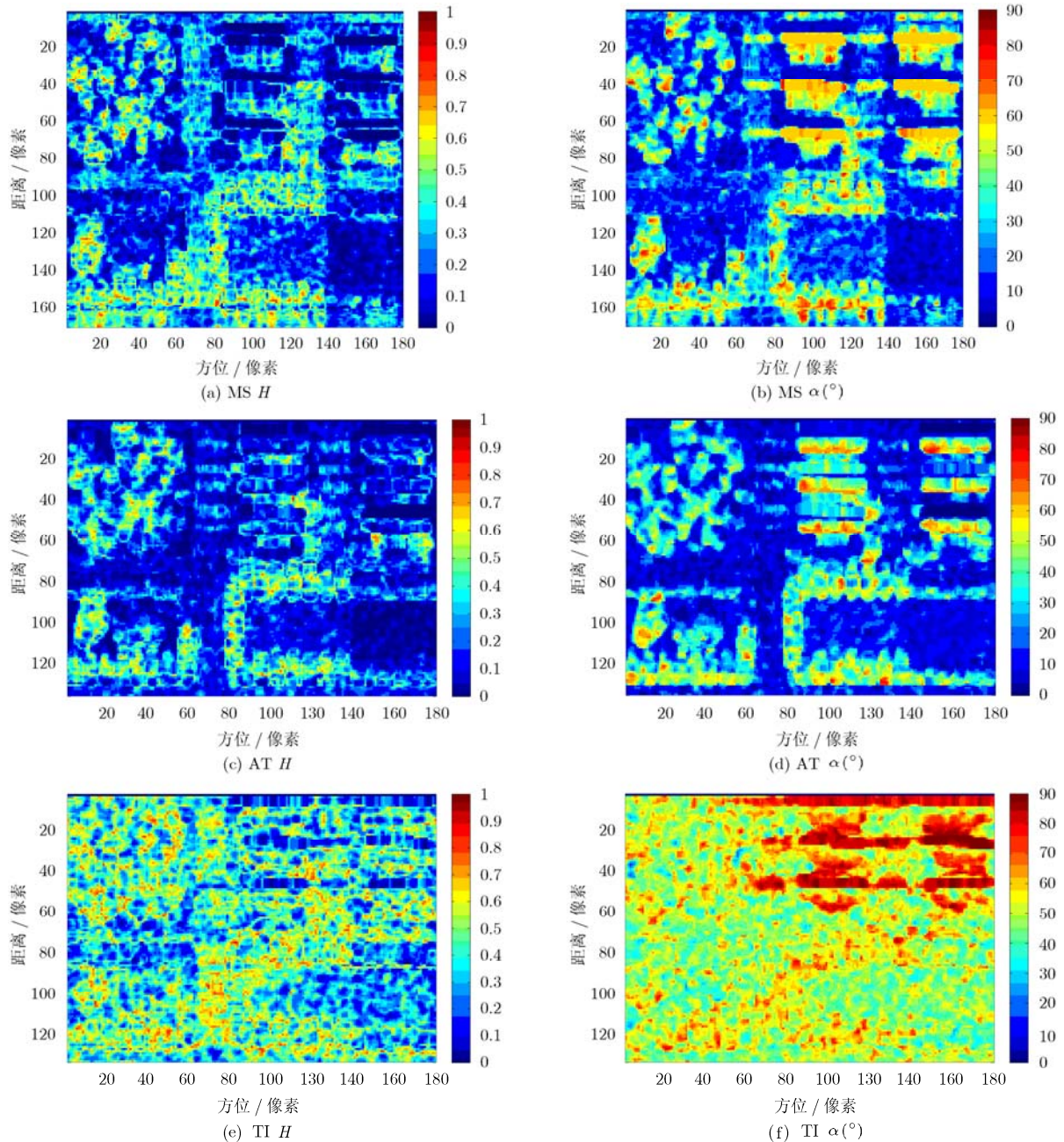
在单站情况下, \mathbf{k}_p 的第 4 个分量 $k_{p,4}$ 为零, \mathbf{T} 退化为 3×3 维, 此时 α 从 $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ$ 分别表征散射机制从面散射到体散射再到二次散射, β 表征地物的取向, H 反映散射的随机程度。

在双站极化散射, 根据 Cloude 对 H, α 等参数的解释^[9,10], 计算该场景 BISAR 图像的 H, α , 结果如图 3 所示, 这里采用 3×3 的窗口进行空域多视平均处理。

在单站(MS)情况下, 不同地物的 H, α 呈现的特征与传统解释合理, 植被区的 H 较高、 $\alpha \rightarrow 45^\circ$, 建筑物的二次散射像 $\alpha \rightarrow 90^\circ$ 。

在平飞正视(AT)情况下, H, α 分布与单站(MS)基本一致, 说明同一入射面不同入射、散射角的情况下, 地物双站散射的极化散射特征与单站差别不大, 主要体现在散射强度上的差异。

在平飞斜视(TI)情况下, H 普遍要比其他两种配置高, 这主要是因为由于双站角较大展示目标的随机程度较高, 导致能量在各极化分量上分配更均匀, 相干矩阵 $\bar{\mathbf{T}}$ 的 4 个特征值也更均匀。值得提到, 该配置下各种地物都呈现 $\alpha > 45^\circ$ 的现象, 观察它们的散射矩阵可以发现, 该配置下, 散射能量主要集中在 $\bar{\mathbf{k}}_p$ 的第 4 个分量上, 而造成这一现象的主要原因是入射角和散射角的不同设置。

图3 单站和双站 SAR 图像的 H, α 参数

由此,在双站情况下, α 更多地依赖于入射和散射角度的设置,而非地物本身的散射特性。 α 依赖于角度配置是不方便的,需要分离极化特征参数对于双站角度配置的依赖关系。而在某些角度配置下, α 可能丢失表现地物极化特性的能力。此时极化信息量可能会转移到其他角度上,比如 Cloude 定义的 β, γ 等^[0]。为此,图4给出了平飞斜视(TI)配置下的 β, γ 参数,可以看出,某些在 α 图上不明显的地物差异在 β, γ 上相对更清晰。但是,总体来说 α, β, γ 依然无法像在单站极化 SAR 图像上清晰反应不同地物散射特征。

双站情况下,相干矩阵 T 扩展到 4×4 维,Pauli 分解散射矢量 \bar{k}_p 的 4 个分量均不为 0,此时不便使用前 3 个分量或

3 种极化 HH, VV, HV 合成 RGB 伪彩色图。本文考虑将 Pauli 分量对散射强度进行归一化,表示为

$$P_i = |k_{p,i}| / |k_p|, \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4)$$

归一化后的 4 个分量中独立的只有 3 个量,取全图平均后的最大的 3 个分量作为 RGB 通道来合成伪彩色图,以表现地物的极化特征。图5示出了 3 种配置下的 Pauli 分量合成的伪彩色图,图中标注的各个 Pauli 分量之后括号内的字母表示其对应的 RGB 颜色通道。在单站(MS)和平飞正视(AT)配置下都是 $P_1 > P_2 > P_3$ 的顺序,而在平飞斜视(TI)配置下 P_4 代替了 P_2 ,且地物表现出的极化特征更随机和多样化。

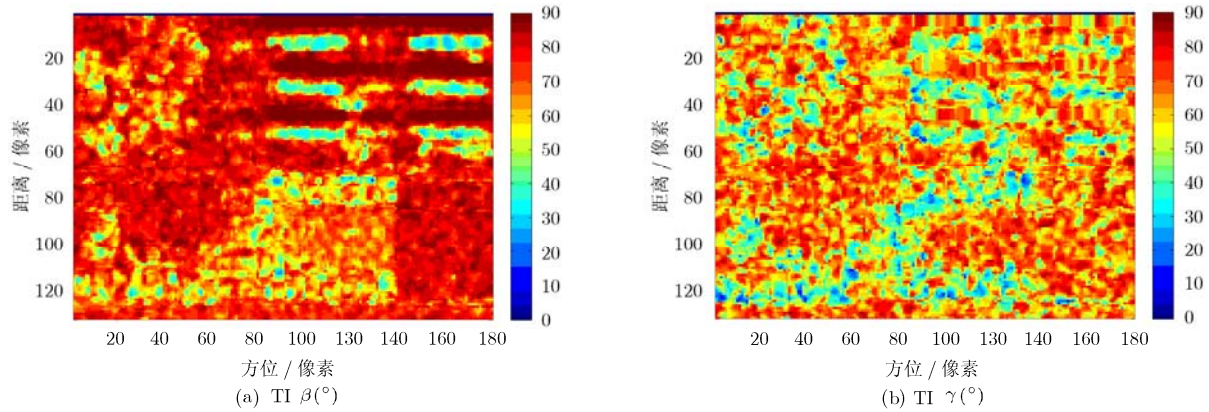


图 4 TI 配置下双站 SAR 图像的 β, γ 参数

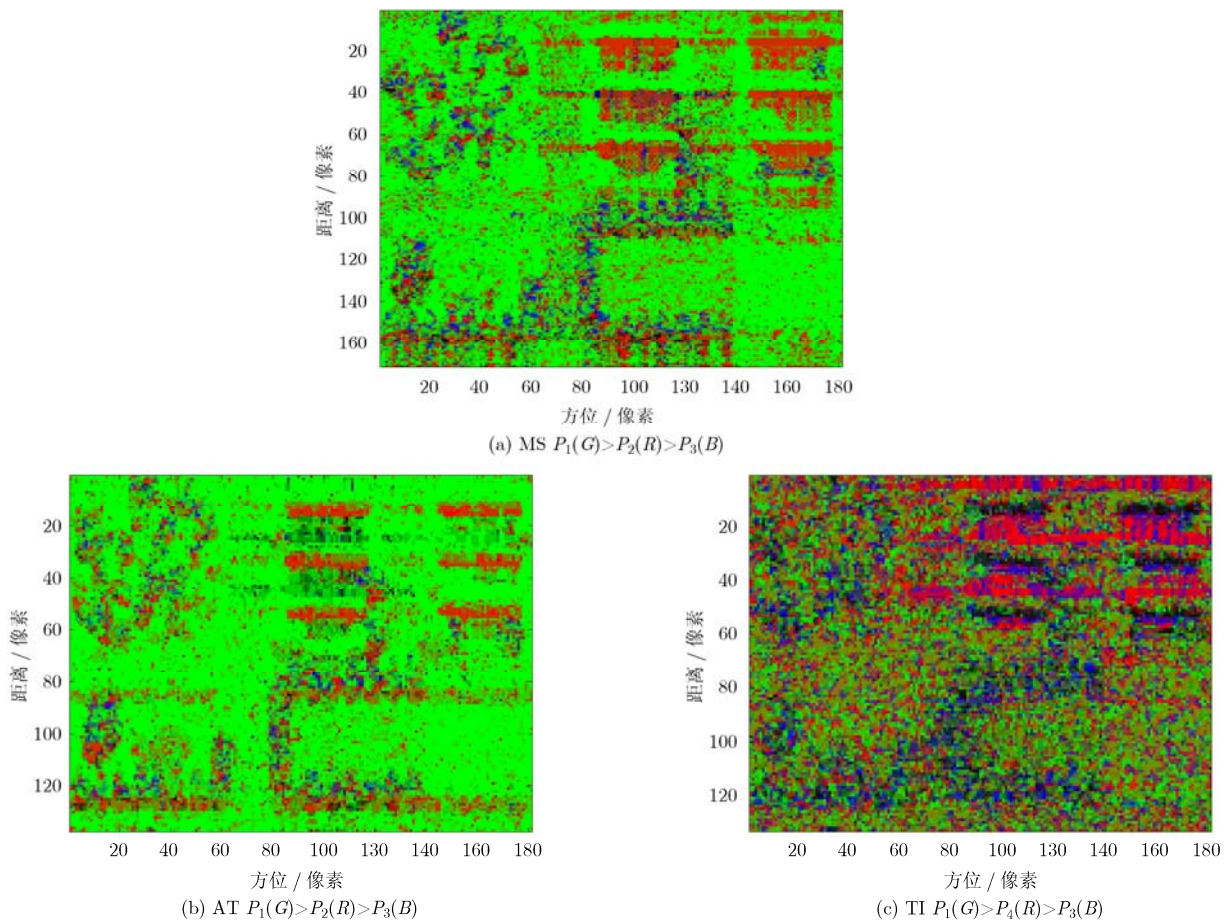


图 5 单站和双站 SAR 的归一化 Pauli 分量合成伪彩色图

单站设置采用的极化参数(如 α, β, γ)直接在 BISAR 图像的表现受入射与散射角度影响很大, 而且在一般平飞斜视配置(TI)下显得比较混乱。这是因为双站角度(入射角和散射角)、双站极化基以及目标取向等多个独立的因素同时在影响着散射能量在极化通道间转移。若按双站角度重新定义统一的极化基, 使双站极化基密切依赖于双站角度, 将会使极化信息变得更清晰有序, 如文献[11]给出的对应与互易、对称目标的相干矩阵的形式。

4 统一双站极化基

由上一节可以看出, 在平飞斜视(TI)情况下, 由于入射与散射角度配置, 使得交叉极化通道的能量增强, 这不便于极化特征提取。本文考虑将双站配置下的极化基统一定义在与双站角度关联的坐标系中, 使其对齐。如图 6 所示, 在传统的 xyz 坐标系中, 入射极化基定义为

$$\hat{h}_i = \frac{\hat{z} \times \hat{k}_i}{|\hat{z} \times \hat{k}_i|}, \quad \hat{v}_i = \hat{h}_i \times \hat{k}_i \quad (5)$$

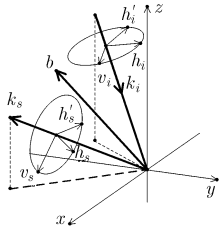


图6 统一双站极化基

其中 \hat{k}_i 入射方向, 下标 i 表示入射, 将 i 替换为 s 即为散射极化基定义(下文中形式相同下标不同的公式均仅给出下标为 i 的情况)。统一定义双站极化基如下

$$\hat{h}'_i = \frac{\hat{b} \times \hat{k}_i}{|\hat{b} \times \hat{k}_i|}, \quad \hat{v}'_i = \hat{h}'_i \times \hat{k}_i \quad (6)$$

其中 \hat{b} 为双站角平分线方向

$$\hat{b} = \frac{\hat{k}_s - \hat{k}_i}{|\hat{k}_s - \hat{k}_i|} \quad (7)$$

统一双站极化基与原极化基的关系通过极化基旋转来描述, 设电场矢量 \bar{E}_i 和 \bar{E}'_i 分别定义在 (v_i, h_i) 和 (v'_i, h'_i) 下, 则有关系

$$\bar{E}_i = \mathbf{U}_i \cdot \bar{E}'_i \quad (8)$$

其中 \mathbf{U}_i 为旋转矩阵, 写为

$$\mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} \hat{v}_i \cdot \hat{v}'_i & \hat{h}_i \cdot \hat{v}'_i \\ \hat{v}_i \cdot \hat{h}'_i & \hat{h}_i \cdot \hat{h}'_i \end{bmatrix} \quad (9)$$

可以看出 \mathbf{U}_i 与其转置 \mathbf{U}_i^T 互逆。

于是, 在统一双站极化基下的散射矩阵 \mathbf{S}' 与原散射矩阵 \mathbf{S} 有如下关系

$$\mathbf{S}' = \mathbf{U}_s \cdot \mathbf{S} \cdot \mathbf{U}_i^T \quad (10)$$

由式(10)容易验证, 在单站(MS)情况下, $\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_s$ 各元素均为0, 统一双站极化基没有意义。在平飞正视(AT)情况下, $\mathbf{U}_i, \mathbf{U}_s$ 为带符号的单位阵, 说明该变换仅会改变散射矩阵的符号, 不会影响极化特征参数。因此, 接下来只对平飞斜视(TI)的 BISAR 图像做统一双站极化基的变换, 即将散射矩阵进行式(10)的变换。

平飞斜视(TI)配置下的模拟 BISAR 图像在进行统一双站极化基变换后, 对应 Pauli 分量合成伪彩色图如图7所示, 这里我们将颜色顺序改变了一下使其更符合光学图像特征。可见, P_4 变为最大的分量, 这是因为占场景绝大部分的地面在统一双站极化基下具有一定取向, 从而使其交叉极化保持很强的水平, 在图上地面均呈现蓝色(P_4 较大); 而树木由于取向完全随机, 统一双站极化基下依然呈现各极化分量平衡的特征, 在图上树木呈现绿色(P_1 较大); 而图上的红色部分(P_3 较大)多为二次散射项区域。事实上, 我们已经知道二次散射机制在正对雷达的情况下会出现较大的 P_2 项^[12]; 而若该二次散射存在一定取向时, 根据极化基旋转公式^[12], 其能量会转移到 P_3 项, 这就是为什么在统一双站极化基下, 二次

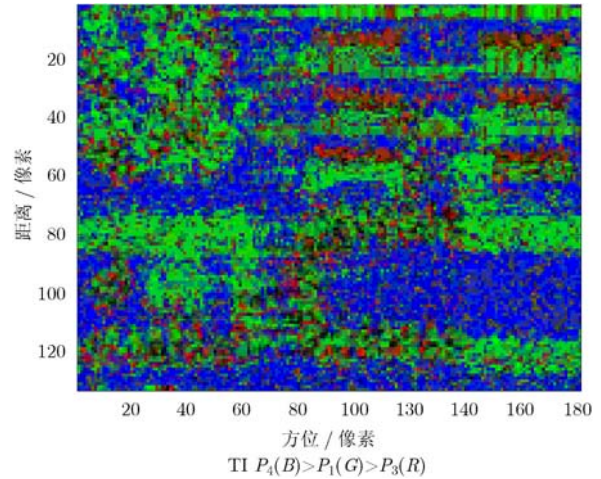


图7 统一双站极化基变换后的归一化 Pauli 分量合成伪彩色图

散射项(原在图5中较暗, 即 P_2 项较强)呈现红色(P_3 项较大)。可见, 在双站情况下, 目标的取向同样会严重影响极化特征参数的解译, 而由于统一双站极化基限制了旋转的参考坐标, 分离取向信息显得更困难, 对于这一论题需要更深入的研究。

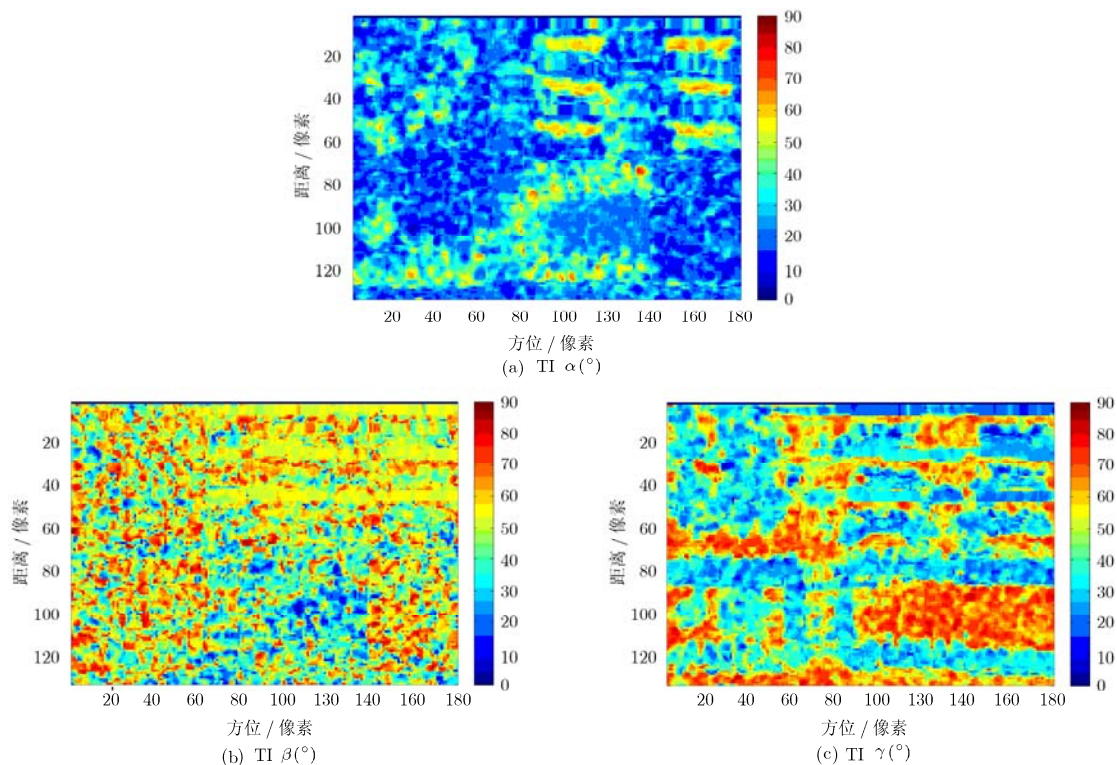
由图7中各 Pauli 分量的强度变换, 可以预见, α, β, γ 依然无法像在单站情况下明确地表现不同地物的特征。事实上, 从图7的分析可以初步看出: 由于目标旋转使得单次(奇数次)散射能量在 $P_1 \leftrightarrow P_4$ 、二次(偶数次)散射能量在 $P_2 \leftrightarrow P_3$ 间转换。所以, 原先 Cloude 的 α, β, γ 定义^[9]在单站情况下($P_4 = 0$)保持旋转不变等特性, 而在双站情况下将丢失这些特性。我们将其定义修改如下

$$\mathbf{k}_p = \|\mathbf{k}_p\| \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \gamma e^{j\phi_1} \\ \sin \alpha \cos \beta e^{j\phi_2} \\ \sin \alpha \sin \beta e^{j\phi_3} \\ \cos \alpha \sin \gamma e^{j\phi_4} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中散射矢量 \mathbf{k}_p 也可以为相干矩阵的某个特征矢量^[9]。可见, 在单站情况下式(11)的定义与原定义式(3)保持一致。重新定义的 α, β, γ 如图8所示, 对比图3、图4, 显然重新定义后 α, β, γ 更能体现地物的极化特征: α 仍然按 $0^\circ \rightarrow 45^\circ \rightarrow 90^\circ$ 依次表征单次散射、体散射、二次散射; β 表征二次散射机制的取向; γ 表征单次散射机制的取向。关于双站散射的极化特征解译将在我们将来的工作中进一步深入研究。

5 结论

本文以 BISAR 成像模拟, 分析了 BISAR 图像上不同地物的极化特征, 发现传统极化特征参数在双站散射观测的条件下不再能清晰反映不同的散射机制。因此, 提出统一双站极化基变换, 将极化基统一定义在与双站角关联的坐标系中, 重新定义了 Cloude 的极化特征参数 α, β, γ , 使其在双站情况下依然保持取向无关特性。结果显示, BISAR 图像像

图 8 统一双站极化基变换后的重新定义的 α, β, γ 参数

统一双站极化基变换后极化特征更明显, 重新定义的 α, β, γ 能有效反映不同散射机制和取向信息, 提供了 BISAR 图像解译和地表分类的一个初步的手段。

参 考 文 献

- [1] 汤子跃, 张守融. 双站合成孔径雷达系统原理. 北京: 科学出版社, 2003, 第 1 章.
- [2] Krieger G and Moreira A. Multistatic SAR satellite formations: Potentials and challenges. Proc. IGARSS '05, Seoul, Korea, July 25-28 2005, 4(25-29): 2680-2684.
- [3] Loffeld O, Nies H, Peters V, and Knedlik S. Models and useful relation for bistatic SAR processing. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2004, 42(10): 2031-2038.
- [4] Younis M, Metzger R, and Krieger G. Performance prediction and verification for bistatic SAR synchronization link. The 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR06), Dresden, Germany May 16-18 2006.
- [5] McLaughlin D, et al. Fully polarimetric bistatic radar scattering behavior of forested hills. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2002, 50(2): 101-110.
- [6] Liang P, Pierce L E, and Moghaddam M. Radiative transfer model for microwave bistatic scattering from forest canopies. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2005, 43(11): 2470-2483.
- [7] Xu F and Jin Y Q. Imaging simulation of polarimetric synthetic aperture radar for comprehensive terrain scene using the mapping and projection algorithm. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2006, 44(11): 3219-3234.
- [8] 徐丰. 全极化合成孔径雷达的正向与逆向遥感理论. [博士论文], 复旦大学, 2007.
- [9] Cloude S and Pottier E. A review of target decomposition theorems in radar polarimetry. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 1996, 34(2): 498-518.
- [10] Cloude S R. On the status of bistatic polarimetry theory. Proc. IGARSS'05, Seoul, South Korea, 25-29 July 2005.
- [11] Cloude S R. Information extraction in bistatic polarimetry. The 6th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR06), Dresden, Germany May 16-18 2006.
- [12] Xu F and Jin Y Q. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification. *IEEE Trans. on Geosci. Remote Sens.*, 2005, 43(10): 2351-2364.

徐 丰: 男, 1982 年生, 博士后, 研究方向为微波遥感.

金亚秋: 男, 1946 年生, 教授, 研究方向为电磁散射传输、空间微波遥感、计算电磁等.