

# 基于极化合成的目标分类算法

汪 洋<sup>1,2</sup>, 鲁加国<sup>2</sup>, 张 芬<sup>1</sup>

(1. 安徽大学 计算智能与信号处理教育部重点实验室, 安徽 合肥 230039;

2. 中国电子科技集团 第 38 研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:**极化合成是极化 SAR 图像处理的一种重要方法,它能在成像处理后,利用已获得的 Sinclair 矩阵重新生成任意极化方式下的雷达接收功率图像,并能通过选取收发天线极化状态相同或正交,分别得到描述目标散射特性的共极化特征图和交叉极化特征图。根据极化合成理论和极化特征图的概念,可以获取目标的最佳极化。将其作为分类器的输入特征量,提出了一种基于极化合成的目标分类算法,并对实测极化 SAR 数据进行了分类实验。结果表明,该算法对于从极化 SAR 数据中获取目标的最佳极化,进而对目标进行分类是可行和有效的。

**关键词:**极化合成;最佳极化;目标分类;最小距离分类器

中图分类号:TN957.52

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2007)03-0030-03

## Algorithm of Target Classification Based on Polarization Synthesis

WANG Yang<sup>1,2</sup>, LU Jia-guo<sup>2</sup>, ZHANG Fen<sup>1</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing,

Anhui University, Hefei 230039, China;

2. 38th Research Institute, China Electronic Technology Corporation, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Polarization synthesis is an important way to polarimetric SAR image processing. It can get receiver power image in arbitrary polarization states using Sinclair matrix after imaging processing. By selecting different antenna states, co-polarization and cross-polarization signature can represent target scattering characteristic. Optimum polarization of targets can be obtained based on polarization synthesis theory and polarization signatures. Algorithm of target classification based on polarization synthesis is proposed, when it is acted as input value of classifier. Then, polarimetric SAR data is applied to classification experiment. The results indicate this algorithm is feasible and efficient to obtain optimum polarization of targets from polarimetric SAR data and classify targets.

**Key words:** polarization synthesis; optimum polarization; target classification; minimum distance classifier

## 0 引 言

1952 年, Kennaugh 提出了目标最佳极化的概念,即在单静态、互易及相干情况下,任意目标都有四个最佳极化:两个共极化零点和两个交叉极化零点。共极化零点指的是当以某种极化状态发射时,回波中不再有同极化分量而只有正交极化分量,即此时目标的共极化接收功率为零;交叉极化零点指的是当以某种极化状态发射时,回波中只有同极化分量而无正交极化分量,即此时目标的交叉极化接收功率为零。到了 20

世纪 60 年代, Huynen 发展了 Kennaugh 的最佳极化概念,提出了著名的极化叉的概念,并进一步地利用唯象学方法研究了这四个最佳极化,给出了它们的唯象学参数表征。80 年代初期, Boerner<sup>[1]</sup>所领导的研究小组将目标最佳极化的概念推广到一般的双静态、非互易及非相干情况。

1981 年, Poelman<sup>[2]</sup>根据矢量合成原理提出一种新的方法:极化合成,即在成像处理后,利用已获得的 Sinclair 矩阵重新生成任意极化方式下的雷达图像。从目标的 Sinclair 矩阵中只可获得四种基本极化组合下的雷达图像,而根据目标的 Mueller 矩阵,通过极化合成就可获得在任意极化方式下雷达的接收功率图像,这对全面地分析地物目标的散射特性是十分有益的。文中即是基于极化合成理论和极化特征图的概念,获取目标的最佳极化,提出一种目标分类算法,对

收稿日期:2006-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69971001)

作者简介:汪 洋(1979-),男,安徽六安人,博士研究生,研究方向为极化合成孔径雷达图像处理及其应用;鲁加国,副总工程师,研究员,博士生导师,研究方向为雷达天线系统设计。

地物目标进行分类。

## 1 极化合成理论

通常情况下,雷达目标在远场区的电磁散射是一个线性过程,如果选定了散射空间坐标系以及相应的极化基,那么雷达照射波和目标散射波的各极化分量之间存在着线性变换关系,因此,目标的变极化效应可以用一个复二维矩阵的形式来表示<sup>[3]</sup>:

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{S} \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} \\ s_{21} & s_{22} \end{bmatrix} \mathbf{E}_i \quad (1)$$

式(1)中的 $\mathbf{S}$ 即为 Sinclair 矩阵,它代表了特定姿态和观测频率下目标的全极化信息。在单静态、互易及相干情况下, Sinclair 矩阵是对称的,即  $s_{12} = s_{21}$ 。如果雷达照射波和目标散射波均用 Stokes 矢量的形式来表示,则:

$$\mathbf{J}_s = \mathbf{M} \mathbf{J}_i = \mathbf{R} \mathbf{W} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_i = \mathbf{R} (\mathbf{S} \otimes \mathbf{S}^*) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{J}_i \quad (2)$$

式(2)中的 $\mathbf{M}$ 即为 Mueller 矩阵,“ $\otimes$ ”表示 Kronecker 积,上标“ $*$ ”表示共轭, $\mathbf{R} = (1001; 100-1; 0110; 0i-i)$ 。

由于极化合成可以得到任意极化方式下雷达的接收功率图像,因而能够提供更多的目标信息。对于确定的接收天线,其接收功率可以表示为天线的有效面积与接收波能流密度的乘积,即<sup>[4,5]</sup>:

$$P = \frac{\lambda^2}{4\pi} g(\theta, \phi) \cdot \left| \frac{\mathbf{E}_r \times \mathbf{H}_r^*}{2} \right| \quad (3)$$

其中  $(\lambda^2/4\pi) \cdot g(\theta, \phi)$  是天线的有效面积,  $|\mathbf{E}_r \times \mathbf{H}_r^*|/2$  是接收波的能流密度。因此,可以得到接收功率极化合成公式:

$$P(\chi_t, \Psi_t, \chi_r, \Psi_r) = k(\lambda, \theta, \phi) \cdot \mathbf{J}_r^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{J}_t = k(\lambda, \theta, \phi) \cdot$$

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\chi_r \cos 2\Psi_r \\ \cos 2\chi_r \sin 2\Psi_r \\ \sin 2\chi_r \end{bmatrix}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \cos 2\chi_t \cos 2\Psi_t \\ \cos 2\chi_t \sin 2\Psi_t \\ \sin 2\chi_t \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)中的上标“ $T$ ”表示转置,  $\mathbf{K} = \mathbf{U}_4 \mathbf{M}$ , 其中:  $\mathbf{U}_4 = \text{diag}\{1, 1, 1, -1\}$ ,  $k(\lambda, \theta, \phi)$  是与天线有效面积和波阻抗有关的常数,  $\mathbf{J}_t$  和  $\mathbf{J}_r$  分别对应发射天线和接收天线归一化的 Stokes 矢量,  $\chi$  和  $\Psi$  分别为极化椭圆的椭圆率角和倾角。

可见,雷达的接收功率是发射天线和接收天线极化状态的函数,即是其椭圆率角和倾角的函数。将其

绘制成雷达的接收功率图形,称其为极化特征图<sup>[6,7]</sup>。通常有两种典型的极化特征图:共极化特征图(接收天线与发射天线的极化状态相同)和交叉极化特征图(接收天线与发射天线的极化状态正交)。由于极化合成得到的是任意极化方式下的雷达接收功率,利用共极化特征图和交叉极化特征图可以求出共极化极值点和交叉极化极值点,而目标最佳极化能够描述目标的散射特性,因此,基于极化合成得到极化特征图,并最终利用最佳极化特征设计目标分类算法进行目标分类是可行的。

## 2 目标分类算法的提出

根据极化合成理论,极化特征图可以描述任意极化方式下的雷达接收功率。二面角反射器的 Sinclair 矩阵为:  $\mathbf{S} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ , 图1所示为二面角反射器的共极化特征图和交叉极化特征图,从中容易得到交叉极化接收功率最大值点发生在  $(\chi, \Psi) = (0^\circ, \pm 45^\circ)$ 。可见,通过极化特征图能够获得目标的最佳极化,将其作为分类器的输入特征量,可以对地物目标进行分类。

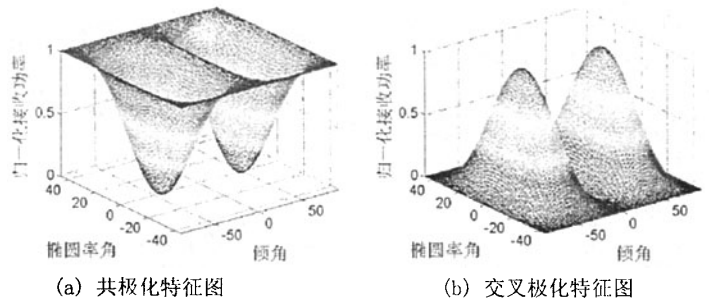


图1 二面角反射器的极化特征图

基于极化合成的目标分类算法包括以下几个步骤(如图2所示):首先通过极化合成得到极化特征图,接着根据极化特征图得到共极化接收功率和交叉极化接收功率情况下目标的最佳极化,最后选取最佳极化特征设计分类器对目标进行分类并计算分类错误率。

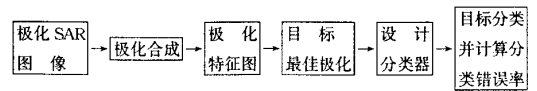


图2 目标分类算法流程图

识别系统中通常用总的分类错误率来评价系统性能好坏。如果对  $M$  类目标  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$  进行分类,其样本数分别为  $N_1, N_2, \dots, N_M$ , 定义总的分类错误率为<sup>[8]</sup>:

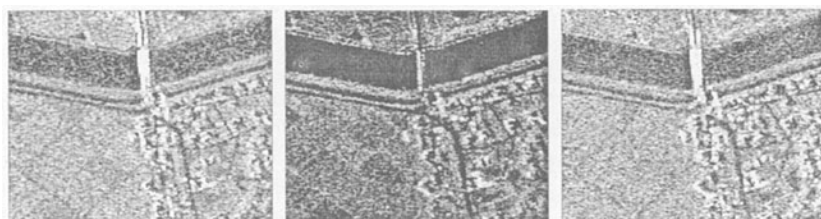
$$P_e = \sum_{i=1}^M \frac{N_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_M} P_{ei}, P_{ei} = \frac{N_i^e}{N_i} \quad (5)$$

式(5)中的  $P_{ei}$  为第  $i$  类目标的分类错误率,  $N_i^e$  为第  $i$  类目标错分的样本数。

### 3 实验结果及分析

极化合成孔径雷达可以同时获得地面场景在不同极化组合下的雷达图像。典型的极化合成孔径雷达发射、接收水平(H)和垂直(V)方向上的线极化电磁波,并可得到四种基本极化组合下的雷达图像:HH, HV, VH 和 VV。这里以实测极化 SAR 数据为例来进行分类实验,图 3 所示为某地区的基本极化组合图像,图像尺寸为  $300 \times 300$ ,从中可以分析不同类型地物目标在基本极化组合下的散射特性。

可见,该地区能够粗略地概括为三类典型目标:桥梁、植被和水域,图 4 所示为三类典型目标的共极化特征图和交叉极化特征图示例。根据式(4)得到共极化特征图和交叉极化特征图并计算目标的最佳极化,图 5 所示分别为部分样本的共极化接收功率最大值点和交叉极化接收功率最大值点在  $(\chi, \Psi)$  平面上的分布情况。可以看到:桥梁目标的共极化接收功率最



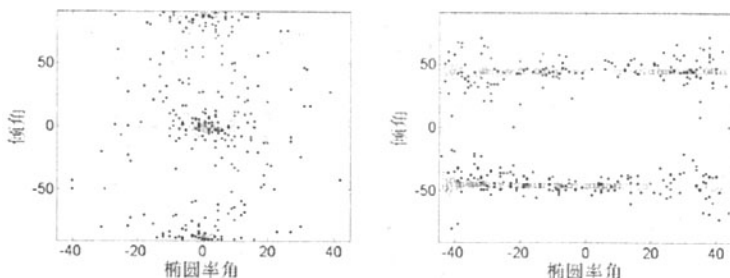
HH 极化

HV 极化

VV 极化

图 3 某地区基本极化组合图像

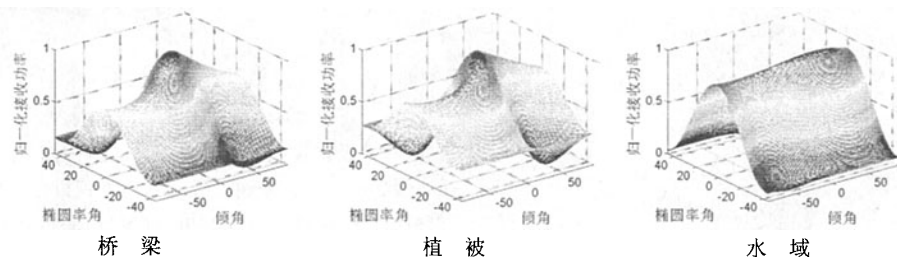
大值点集中在  $(\chi = 0^\circ, \Psi = 0^\circ, \pm 90^\circ)$  点上,植被和水域的集中程度较差;桥梁目标的交叉极化接收功率最大值点集中在  $\Psi = 45^\circ$  直线上,植被的集中程度次之,水域的集中程度最差。可见,三类典型目标的最佳极化存在着明显的差异,这为从中提取特征量进而对地物目标进行分类提供了依据。



(a) 共极化接收功率最大值点

(b) 交叉极化接收功率最大值点

图 5 三类典型目标的最佳极化分布

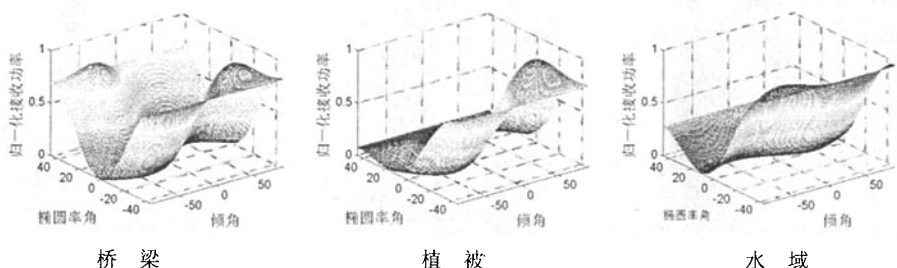


桥 梁

植 被

水 域

(a) 共极化特征图



桥 梁

植 被

水 域

(b) 交叉极化特征图

图 4 三类典型目标的极化特征图示例

(下转第 36 页)

TVM 实现自动协议转换,生成随机事务方便、灵活,并且高度可重用。

传统激励产生,选取待测试信号创建测试向量,需要手动输入测试激励信号,随机测试向量较难产生,而且可重用性差。

### 3) 分析调试。

基于事务的调试是按事务类型和属性识别事务,可以自动记录和管理事务,对于高抽象层事务级调试相对简单。

而传统调试技术通过提取合适的信号,手动组合或分解信号数值以决定其内容,抽象层次越高,基于信号的调试越困难。

### 4) 功能覆盖率分析。

基于事务的验证,只要待测功能模块抽象的事务完整,就可以通过工具搜寻模拟数据库,得到事务执行情况,易于分析功能覆盖率。而传统的验证方法只能提供代码覆盖率或条件覆盖率,很难分析功能覆盖率。

## 5 小 结

随着 SoC 设计规模和复杂度的不断增加,重用的 IP 模块越来越多,传统的功能验证方法已经成为 IC 设计的“瓶颈”。基于事务的验证方法成为 SoC 设计中

功能验证最有效的途径。它使得验证工程师编写验证程序、调试变得相对简单,提高了验证工程师的设计效率;更重要的是事务验证模块的重用大大提高了验证平台的设计效率,减少了验证所需要的时间和成本,增强了设计者的信心,提高了整个 SoC 设计的效率。

### 参考文献:

- [1] Keating M, Bricaud P. Reuse Methodology Manual for System-on-A-Chip Designs[M]. 3rd Edition. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [2] Paterson P R P, Singh L. 系统芯片 (SoC) 验证方法与技术[M]. 孙海平, 丁 健译. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [3] Steffora A. DAI Enters Transaction-Based Verification Market[EB/OL]. 1998. <http://www.findarticles.com/p/articles/mi-m0EKF/is-1998-Nov-16/ai-53231093>. November 16.
- [4] Eve-team. Fast, Transaction-Based Verification[EB/OL]. 2006. [www.eve-team.com](http://www.eve-team.com).
- [5] Xu Susan, Pollitt-smith H. Creating a Reusable TestBench Using Cadence's Testbuilder and AMBA TVM[M]. Mon-trkal:[s. n.], 2003.
- [6] 杨 羽, 张 溯, 周 萌, 等. 验证重用中的监视器设计[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(7): 173-176.
- [7] 孟 庆, 何乐年, 沈海斌, 等. 基于事务的 SoC 验证策略[J]. 半导体技术, 2002, 27(6): 29-32.

(上接第 32 页)

由目标的最佳极化组成分类器的输入特征量,设计选择最小距离分类器对上述三类典型目标进行分类,分类结果如表 1 所示。可以看到,从极化特征图中获取目标的最佳极化,将其作为特征量对地物目标进行分类,总的分类错误率只有 3.96%,效果显著。

表 1 三类典型目标分类结果

	桥梁	植被	水域	总计
分类错误率(%)	5.33	6.25	0.63	3.96

## 4 结束语

极化合成可以得到任意极化方式下雷达的接收功率图像,并且若使接收天线与发射天线极化方式相同和正交可以分别得到共极化特征图和交叉极化特征图。将根据极化特征图获得的目标最佳极化作为分类器的输入特征量,提出了一种基于极化合成的目标分类算法,并对实测极化 SAR 数据进行了分类实验。实验结果及分析表明,将基于极化合成获得的目标最佳极化应用于极化 SAR 图像目标分类中是可行和有效的。

### 参考文献:

- [1] Davidovitz M, Boerner W M. Extension of Kennaugh's optimal polarization concept to the asymmetric matrix case[J]. IEEE Transactions Antennas and Propagation, 1986, 34(4): 569-574.
- [2] Poelman A J. Virtual polarization adaptation: a method of increasing the detection capability of a radar system through polarization-vector processing[J]. IEE Proceedings Communications, Radar and Signal Processing, 1981, 128(5): 261-270.
- [3] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- [4] Zebker H A, Van Zyl J J, Held D N. Image radar polarimetry from wave synthesis[J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(1): 686-700.
- [5] 梁淮宁. 全极化 SAR 地形高度测量技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2001.
- [6] Van Zyl J J, Zebker H A, Elachidf C. Imaging radar polarization signatures—theory and observation[J]. Radio Science, 1987, 22(4): 528-545.
- [7] 齐向阳. 极化合成孔径雷达的模拟研究[D]. 北京: 中国科学院电子学研究所, 2001.
- [8] 代大海, 王雪松, 李永楨, 等. 基于目标分解的极化图像分类研究[J]. 无线电工程, 2004, 34(1): 7-11.