

# 基于瞬态极化时频分布及奇异值特征提取的 雷达目标识别

曾勇虎<sup>1,2</sup>, 王雪松<sup>1</sup>, 肖顺平<sup>1</sup>, 庄钊文<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073; 2. 洛阳市 061 信箱, 河南洛阳 471003)

**摘要:** 本文介绍了瞬态极化时频分布的概念, 并给出了瞬态极化 Wigner Ville 分布及伪 Wigner Ville 分布的定义, 用以刻画雷达目标回波在时频域上的极化特性. 然后, 由回波的瞬态极化伪 Wigner Ville 分布各分量的奇异值组成特征矢量, 以 BP 神经网络作为分类器进行了目标识别实验. 实验结果表明, 与传统的对目标极化回波的两个分量分别作时频分析的处理方法相比, 文中方法具有更好的目标识别性能.

**关键词:** 瞬态极化; 时频分布; 目标识别

中图分类号: TN957; TN959 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 03-0571-03

## Radar Target Recognition Based on Instantaneous Polarization Time-Frequency Distribution and Singular Values Feature Extraction

ZENG Yong-hu<sup>1,2</sup>, WANG Xue-song<sup>1</sup>, XIAO Shun-ping<sup>1</sup>, ZHUANG Zhao-wen<sup>1</sup>

(1. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;  
2. P. O. Box 061, Luoyang, Henan 471003, China)

**Abstract:** This paper introduces the concept of instantaneous polarization time frequency distribution (InPol TFD), and presents the definition of instantaneous polarization Wigner Ville distribution (WVD) and pseudo Wigner Ville distribution (PWD), which are used to describe the polarization property of radar target's return in time frequency domain. Next, a feature vector, formed by the singular values of each component of the InPol PWD of target's return, is used as input vector for the classifier based on BP neuron network. The target recognition results show that the proposed method has better performance than conventional one.

**Key words:** instantaneous polarization; time frequency distribution; target recognition

### 1 引言

Fourier 变换在雷达信号及成像处理中得到了广泛的应用, 但是当雷达信号具有时变或频变行为时, 能够在时频联合域上表示强度或能量分布的分析是最需要的. 此时, 时频分析是改善雷达信号及成像处理的一个非常有用的工具<sup>[1]</sup>. 极化雷达目标回波包含两个正交极化分量, 若直接应用常规的时频分析方法对两个分量分别进行处理, 得到两个分量各自的时频分布, 描述的是各分量在时频域上的能量分布情况. 在对时变电磁波作时频分析时, 我们不仅要得到其能量在时频域上的分布, 还希望得到其极化状态在时频域上的分布. 王雪松在其博士论文中提出了一种瞬态极化时频分布的定义, 不仅描述了电磁波在时频域上的能量分布情况, 还描述了其极化状态分布情况, 从而更加完整地刻画了电磁波在时频域上的特性<sup>[2]</sup>.

本文以瞬态极化时频分析的思想为指导, 导出了瞬态极化 Wigner Ville 分布和伪 Wigner Ville 分布的表示形式, 并将其用以刻画宽带极化雷达目标回波在时频域上的特性. 然后, 分

别对回波的瞬态极化伪 Wigner Ville 分布各分量作奇异值分解, 由这些奇异值组成特征矢量, 以 BP 神经网络作为分类器进行了目标识别实验. 实验结果表明, 与通常的对目标极化回波两个分量分别作时频分析的处理方法相比, 文中方法具有更好的目标识别性能.

### 2 瞬态极化 Wigner Ville 分布及伪 Wigner Ville 分布的定义

信号的 Wigner Ville 分布是一种最基本、也是应用最多的时频分布, 其定义为信号的瞬时相关函数  $R(t, \tau)$  关于变量  $\tau$  的 Fourier 变换<sup>[3]</sup>. 类似地, 对于时变电磁波  $e(t)$ , 可以定义其时域瞬态相关 Stokes 矢量为

$$j \begin{pmatrix} t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2} \end{pmatrix} = R \left[ e \begin{pmatrix} t + \frac{\tau}{2} \end{pmatrix} \odot e^* \begin{pmatrix} t - \frac{\tau}{2} \end{pmatrix} \right] \quad (1)$$

上式中  $R$  为 4 阶准酉矩阵<sup>[2]</sup>

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & j & -j & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$j \left[ t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2} \right]$  关于变量  $\tau$  的 Fourier 变换就是文献[2]中定义的电波瞬态极化时频分布, 记为  $W_j(t, f)$ , 本文称之为瞬态极化 Wigner Ville 分布, 简称为瞬态极化 WVD, 即<sup>[4]</sup>

$$W_j(t, f) = \int j \left[ t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2} \right] e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (3)$$

若  $e(t)$  的两个正交极化分量分别为  $e_h(t)$ 、 $e_v(t)$ , 即  $e(t) = [e_h(t) \quad e_v(t)]^T$ , 则由式(1)和(3)容易推得

$$W_j(t, f) = R \begin{bmatrix} W_h(t, f) \\ W_{hv}(t, f) \\ W_{vh}(t, f) \\ W_v(t, f) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中  $W_h(t, f)$ 、 $W_v(t, f)$  分别为  $e_h(t)$ 、 $e_v(t)$  各自的 Wigner Ville 分布,  $W_{hv}(t, f)$ 、 $W_{vh}(t, f)$  为它们之间的互 Wigner Ville 分布, 并且有  $W_{hv}(t, f) = W_{vh}^*(t, f)$ <sup>[3]</sup>. 由此可知,  $W_j(t, f)$  同时包含了两个极化分量各自的 Wigner Ville 分布和它们之间的互 Wigner Ville 分布, 不仅描述了电磁波在时频域上的能量分布情况, 还描述了两个极化分量在时频域上的相关信息, 也就是电磁波的极化特性. 因此,  $W_j(t, f)$  比  $W_h(t, f)$  和  $W_v(t, f)$  更加完整地刻画了电磁波在时频域上的分布特性.

伪 Wigner Ville 分布(PWD)是 Wigner Ville 分布的一种变型, 它是通过对瞬时相关函数中的滞后变量加窗函数来达到减小交叉项的目的<sup>[3]</sup>. 类似地, 我们对式(3)中的变量  $\tau$  加窗函数  $h(\tau)$ , 便可得到瞬态极化伪 Wigner Ville 分布, 简称为瞬态极化 PWD, 如下式所示

$$PWD_j(t, f) = \int j \left[ t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2} \right] h(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

在电磁波的瞬态极化 WVD 中, 不仅包含了电磁波两个分量各自的 WVD, 还包含了两个分量之间的 XWVD, 在 WVD 及 XWVD 中均会出现交叉项. 交叉项本身并无好坏之分, 在有些重要的信号处理应用中, 如信号检测或目标识别中, 交叉项反而是有用的财富<sup>[3]</sup>. 瞬态极化 PWD 通过对滞后变量  $\tau$  加窗函数, 使之在时间上成为局部的, 可以部分地抑制多散射点引起的交叉项, 因为各散射点在时间上一般是分开的. 本文应用瞬态极化 PWD 来刻画宽带极化雷达目标回波在时频域上的能量分布和极化状态分布特性, 并在此基础上提取奇异值特征用于目标识别.

### 3 奇异值特征提取及目标识别

#### 3.1 目标特征矢量的构成

由前面定义可知, 瞬态极化 PWD 由四个分量组成, 其中每个分量均为时频平面上一个二维图像, 为将瞬态极化 PWD 应用于目标识别, 必须减小特征空间的维数, 提取适当的特征参量. 在提取二维图像(矩阵)特征量方面, 通常采用计算矩阵的特征值、奇异值, 或者计算图像的矩特征等方法<sup>[5-7]</sup>. 本文提取特征量的思路及目标识别器的结构与文献[8]中的一样, 选取矩阵的奇异值作为目标识别特征, 采用 BP 神经网络作为分类器.

选取矩阵的奇异值作为目标识别特征, 是因为矩阵的奇异值具有如下一些特性<sup>[6,7]</sup>:

- (1) 矩阵的奇异值具有非常好的稳定性, 当矩阵的元素发生小的变动时, 奇异值的变化很小;
- (2) 奇异值是矩阵的固有特性;
- (3) 矩阵的奇异值按大小排列, 往往前面一些奇异值就能详细地刻画矩阵的特征.

利用其中第三条特性有利于抑制噪声, 同时实现特征压缩. 记雷达目标回波瞬态极化 PWD 各分量如下式所示:

$$PWD_j(t, f) = [g_0(t, f) \quad g_1(t, f) \quad g_2(t, f) \quad g_3(t, f)]^T \quad (6)$$

假设  $PWD_j(t, f)$  各分量的奇异值矢量分别为  $x_i$  ( $i = 0, 1, 2, 3$ ), 由于  $x_i$  的各元素从大到小排列, 保留其前面若干项, 舍去后面数值较小的项, 便可达到特征降维的目的. 在本文的实验中, 保留  $x_i$  前面 10 个元素, 并把降维后的  $x_i$  组合成一个总的特征矢量  $x$ , 即

$$x = [x_0^T(1:10) \quad x_1^T(1:10) \quad x_2^T(1:10) \quad x_3^T(1:10)]^T \quad (7)$$

这样用于目标识别的特征矢量的维数为 40.

若采用常规的时频分析方法, 分别求得目标极化回波的两个正交分量信号的伪 Wigner Ville 分布, 即  $PWD_H(t, f)$  和  $PWD_V(t, f)$  (H、V 分别表示水平极化通道和垂直极化通道), 然后分别对它们做奇异值分解得到它们的奇异值矢量为  $x_H$  和  $x_V$ , 取  $x_H$  和  $x_V$  的前 20 个元素组合成一个矢量, 也可作为目标识别的特征矢量, 记为  $x'$ , 即

$$x' = [x_H^T(1:20) \quad x_V^T(1:20)]^T \quad (8)$$

以上两种方法均可得到用于目标识别的特征矢量. 我们把前一种方法称为瞬态极化 PWD 方法, 后一种方法称为常规 PWD 方法.

#### 3.2 BP 神经网络分类器

近年来, 神经网络已被广泛应用于模式识别领域, 并取得了许多成果. 其中基于误差反向传播学习(BP)的多层感知器(即 BP 网络), 以其强映射能力、易于训练等优点, 成为最常用的分类器<sup>[9]</sup>. 本文选用

单隐层 BP 神经网络作为分类器: 输入神经元的数目等于特征矢量的维数; 网络中间层神经元的数目设定为输入神经元的两倍; 输出神经元的数目等于目标的类别总数. 中间隐层和输出层神经元的传递函数均选择对数 S 形函数, 网络的学习算法选择引入动量因子的变速率学习算法<sup>[9]</sup>. 神经网络分类器的结构如图 1 所示.

根据目标特征矢量的构成方式, 以及所选择的分类器, 可以得

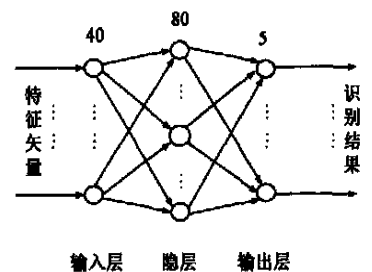


图 1 神经网络分类器结构

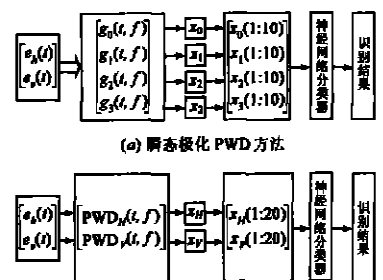


图 2 识别系统框图

到应用瞬态极化 PWD 方法或常规 PWD 方法的目标识别系统框图, 分别如图 2(a) 和 2(b) 所示。

#### 4 目标识别实验结果

本文实验数据为阶梯变频雷达对五类军用飞机目标缩比模型的测量数据, 测量系统的工作频率范围是 34.7GHz~35.7GHz, 频率步进间隔为 2MHz, 观测频率点数  $N = 500$ , 通过分时发射水平、垂直极化波和同时接收这两种正交极化波测得目标极化散射矩阵; 五种飞机的缩比模型长约 1.5~3.0 米, 宽约 1.0~1.8 米, 测试姿态为:  $\theta^0$  横滚角、 $\theta^0$  俯仰角, 方位角范围为  $0^\circ \sim 30^\circ$ , 方位角采样间隔为  $f$ 。在目标识别实验中, 应用偶数方位角下的测量数据来训练神经网络, 应用奇数方位角下的测量数据来测试识别系统的性能。

图 3 为采用瞬态极化 PWD 方法或常规 PWD 方法时五类目标平均正确识别率与信号噪声比(SNR)的关系曲线。从图 3 可以看出, 采用瞬态极化 PWD 方法时的平均正确识别率比采用常规 PWD 方法时高出大约 10%。目标识别实验结果表明, 与通常的对极化信号的两个正交分量分别作时频分析的常规处理方法相比, 采用瞬态极化时频分析技术的目标识别方法具有更好的性能。

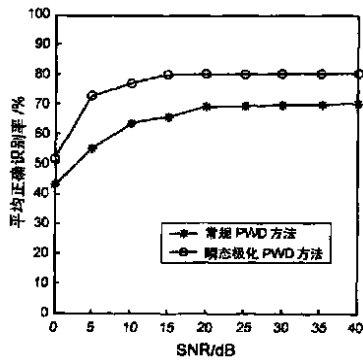


图 3 平均正确识别率与 SNR 的关系曲线

#### 5 结论

本文及文献[8]中的研究表明, 采用瞬态极化时频分析方法时的目标识别系统的性能比采用常规时频分析方法时有明显提高, 其原因可以解释为: 常规时频分析方法的处理过程是对两个分量分别进行处理, 得到两个分量各自的时频分布, 描述的是目标回波在时频域上的能量分布情况, 实际上并没有利用蕴含在回波中的极化信息; 与此不同的是, 瞬态极化时频分析方法同时得到了回波极化分量各自的时频分布和它们之间的互时频分布, 不仅描述了回波在时频域上的能量分布信息, 还描述了其在时频域上的极化状态分布信息。由于瞬态极化时频分析方法对目标回波的信息开发和利用更加全面, 从而使得在此基础上提取的目标识别特征及相应的识别

方法具有更好的性能。

#### 参考文献:

- [1] Chen V C, Ling H. Joint time frequency analysis for radar signal and image processing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1999, (3): 81-93.
- [2] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 长沙: 国防科技大学电子科学与工程学院, 1999.
- [3] 张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 曾勇虎. 极化雷达时频分析与目标识别的研究[D]. 长沙: 国防科技大学电子科学与工程学院, 2004.
- [5] 王蕴红, 刘国岁, 李奎, 等. 基于短时傅里叶变换及奇异值特征提取的目标识别方法[J]. 信号处理, 1998, 14(2): 123-127.
- [6] 冯瑞林. 基于时频分析的目标回波识别方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2001.
- [7] 范建, 李孝昌. 奇异值特征抽取目标识别方法[J]. 系统工程与电子技术, 1993, 15(3): 14-17.
- [8] 曾勇虎, 王雪松, 肖顺平, 等. 瞬态极化短时 Fourier 变换及其在雷达目标识别中的应用[J]. 无线电工程, 2004, 34(12): 40-42.
- [9] 许东, 吴铮. 基于 MATLAB6. x 的系统分析与设计-神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.

#### 作者简介:



曾勇虎 男, 1972 年 12 月生于江西龙南, 分别于 1997 年、2004 年获国防科技大学工学硕士、博士学位, 现为电子装备试验中心博士后, 已在国内外期刊及会议上发表论文 20 余篇, 主要研究方向为综合电子战技术、雷达极化信息处理、系统仿真试验与评估等。E-mail: zengyonghu@sina.com



王雪松 男, 1972 年 10 月生于内蒙古包头, 1994 年毕业于国防科技大学电子技术系, 1999 年 6 月获国防科技大学工学博士学位, 博士学位论文被评为教育部 2001 年度“全国百篇优秀博士学位论文”, 现为国防科技大学教授, 博士生导师, 中国电子学会高级会员, 合作出版专著 2 部, 在国际、国内期刊及学术会议上发表论文 100 余篇, 其中 30 多篇进入 SCI、EI 等国际著名检索, 主要研究方向为雷达极化信息处理、信号处理与目标识别、导弹攻防对抗等。E-mail: wxs1019@sina.com