

文章编号: 1001-9014(2004)05-0455-04

基于瞬态极化 WVD 相关的高分辨雷达目标识别

曾勇虎, 王雪松, 肖顺平, 庄钊文, 郭桂蓉
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:研究了毫米波高分辨极化雷达的目标识别问题,提出了瞬态极化 Wigner-Ville 分布(WVD)的概念,导出了瞬态极化 WVD 莫耶公式,证明了瞬态极化 WVD 时频域相关与极化信号时域相关的等价关系.在此基础上,提出了基于高分辨极化雷达目标回波瞬态极化 WVD 相关的目标识别方法,并利用五种飞机缩比模型外场测量数据进行了目标识别实验,实验结果表明该方法是一种有效的高分辨极化雷达目标识别方法.

关键词:高分辨;毫米波;极化;目标识别;瞬态极化

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A

HIGH-RESOLUTION RADAR TARGET RECOGNITION BASED ON CORRELATION OF INSTANTANEOUS POLARIZATION WVD

ZENG Yong-Hu, WANG Xue-Song, XIAO Shun-Ping, ZHUANG Zhao-Wen, GUO Gui-Rong
(School of Electronic Science and Engineer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The problem of target recognition with millimeter-wave high-resolution polarimetric radar was studied. The definition of instantaneous polarization Wigner-Ville distribution(InPolWVD) was given, and its Moyal's formula was derived, which implies the equivalence between the correlation of InPolWVDs in time-frequency domain and the correlation of polarimetric signals in time domain. Then, a novel target recognition method was proposed based on the correlation of InPolWVDs. Experiments of demonstrating recognition with five kinds of aircraft targets were presented. The results show that it is an effective target recognition method of high-resolution polarimetric radar.

Key words: high-resolution; millimeter waves; polarization; target recognition; instantaneous polarization

引言

在高距离分辨探测信号照射下,由于减小了分辨单元的尺寸,目标表面的强散射点能够有效地被孤立出来,称为散射中心,它们在径向距离上的分布又称为目标一维距离像^[1]. 目标一维距离像是光学区雷达目标识别所依据的最基本的目标特征之一,它的一个显著特点是距离像的结构随目标姿态的变化而变化. 直接应用一维距离像进行目标识别是目前研究的较多的一种方法^[2-5],这类方法通常利用未知目标的距离像特征与模板库中的各目标数据进行相关. H. J. Li 和 S. H. Yang 提出了直接利用高分辨目标一维距离像作为特征矢量用于目标识别的思

路^[2]; S. Hudson 研究了利用一维距离像识别目标时相关滤波器的设计方法^[3]; H. J. Li 等人还研究了用高分辨距离像进行目标识别之前所需要的预处理技术^[4]; S. P. Jacobs 等研究了利用高分辨距离像序列来跟踪和识别目标的问题^[5]. 随着高分辨极化雷达体制的迅速崛起,基于宽带极化信息处理的雷达目标识别得到了越来越多的应用,极化与高分辨技术相结合成为目标识别问题的一条极富潜力的途径.

本文以瞬态极化理论^[6]为基础,提出了瞬态极化 WVD 的概念,导出了瞬态极化 WVD 莫耶公式,证明了瞬态极化 WVD 时频域相关与极化信号时域相关的等价关系. 在此基础上,把距离像匹配方法推广到时-频-极化域,提出了基于瞬态极化 WVD 相关

收稿日期: 2003-09-25, 修回日期: 2004-05-21

Received date: 2003-09-25, revised date: 2004-05-21

基金项目: 全国优秀博士论文专项资金(08100101), 国家自然科学基金(69902010)和“十五”国防预研计划项目(41303517)资助项目

作者简介: 曾勇虎(1972-), 男, 江西龙南人, 国防科学技术大学电子科学与工程学院博士生, 主要研究方向为极化信息处理和综合电子战.

的高分辨极化雷达目标识别方法.

1 瞬态极化 WVD

1.1 瞬态极化 WVD 的定义

设一个空间传播平面电磁波为 $e(t)$, 其对称形式的时域瞬态相关 Stokes 矢量定义为

$$j(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}) = R[e(t + \frac{\tau}{2}) \otimes e^*(t - \frac{\tau}{2})], \quad (1)$$

上式中 R 为 4 阶准酉矩阵^[6]

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

$j(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2})$ 关于变量 τ 的 Fourier 变换就是文献 [6] 中定义的电磁波的瞬态极化时频分布, 记为 $W_j(t, f)$, 这里称之为瞬态极化 Wigner-Wille 分布 (WVD), 即

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

若有 2 个同向传播的平面电磁波 $e_a(t)$ 和 $e_b(t)$, 可定义两者的瞬态极化互 Wigner-Ville 分布 (XWVD). 为此首先定义这两个电磁波的时域瞬态互相关 Stokes 矢量为

$$j_{ab}(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}) = R[e_a(t + \frac{\tau}{2}) \otimes e_b^*(t - \frac{\tau}{2})]. \quad (4)$$

则这两个电磁波的瞬态极化 XWVD 定义为

$$W_{j_{ab}}(t, f) = \int j_{ab}(t + \frac{\tau}{2}, t - \frac{\tau}{2}) e^{-j2\pi f\tau} d\tau. \quad (5)$$

在文献 [6] 中详细讨论并证明了瞬态极化 WVD 的主要性质, 还针对一些典型电磁波, 得到了电磁波的瞬态极化 WVD, 表明了瞬态极化 WVD 是在时频域上刻画时变电磁波极化特性的一个有力工具.

1.2 瞬态极化 WVD 的莫耶公式

在 WVD 检测理论中, 莫耶公式 (Moyal's formula) 是一个很重要的公式^[7]. 对任意的解析信号 $z_1(t)$, $z_2(t)$, $z_3(t)$, $z_4(t)$, 莫耶公式表明如下关系式成立:

$$\begin{aligned} & \iint W_{z_1 z_2}(t, f) W_{z_3 z_4}^*(t, f) dt df \\ &= \int z_1(t) z_3^*(t) dt \int z_2^*(t) z_4(t) dt. \quad (6) \end{aligned}$$

莫耶公式说明了时域相关与 WVD (XWVD) 相关之间具有等价性. 因此, 适用于许多经典检测问题的时

域相关方法可以等价地用 WVD (XWVD) 相关来代替, 这样就可更方便地使用可变滤波器来解析信号的时频特征并压制噪声, 尤其是当信号的波形未知时^[7].

应用 WVD 的莫耶公式, 可以推得瞬态极化 WVD 的莫耶公式. 对任意的平面电磁波为 $e_1(t) = [h_1(t) v_1(t)]^T$, $e_2(t) = [h_2(t) v_2(t)]^T$, $e_3(t) = [h_3(t) v_3(t)]^T$, $e_4(t) = [h_4(t) v_4(t)]^T$, 瞬态极化 WVD 中的莫耶公式表明如下关系式成立:

$$\begin{aligned} & \iint W_{j_{12}}^T(t, f) W_{j_{34}}^*(t, f) dt df \\ &= 2 \int h_1(t) h_3^*(t) dt \int h_2^*(t) h_4(t) dt \\ &+ 2 \int v_1(t) v_3^*(t) dt \int v_2^*(t) v_4(t) dt \\ &+ 2 \int h_1(t) h_3^*(t) dt \int v_2^*(t) v_4(t) dt \\ &+ 2 \int v_1(t) v_3^*(t) dt \int h_2^*(t) h_4(t) dt, \quad (7) \end{aligned}$$

若令 $e_1(t) = e_2(t)$, $e_3(t) = e_4(t)$, 则式 (7) 变为

$$\begin{aligned} & \iint W_{j_{11}}^T(t, f) W_{j_{33}}(t, f) dt df \\ &= 2 \left| \int h_1(t) h_3^*(t) dt \right|^2 + 2 \left| \int v_1(t) v_3^*(t) dt \right|^2 \\ &+ 2 \int h_1(t) h_3^*(t) dt \int v_1^*(t) v_3(t) dt \\ &+ 2 \int v_1(t) v_3^*(t) dt \int h_1^*(t) h_3(t) dt, \quad (8) \end{aligned}$$

若令 $e_3(t) = e_4(t) = e_1(t)$, 则式 (7) 变为

$$\begin{aligned} & \iint W_{j_{12}}^T(t, f) W_{j_{11}}(t, f) dt df \\ &= 2(A_{h_1} + A_{v_1}) \left(\int h_1(t) h_2^*(t) dt + \int v_1(t) v_2^*(t) dt \right). \quad (9) \end{aligned}$$

其中 $A_{h_1} = \int h_1(t) h_1^*(t) dt$, $A_{v_1} = \int v_1(t) v_1^*(t) dt$.

式 (8) 和式 (9) 说明, 瞬态极化 WVD (XWVD) 时频域相关与极化矢量信号的各分量信号的时域相关之间存在等价关系, 因此在对极化矢量信号进行检测或分类时, 可以采用瞬态极化 WVD (XWVD) 相关滤波器. 这样带来的好处在于, 对于非平稳极化信号, 采用瞬态极化时频分析技术, 可以在时频域上刻画极化信号的特片, 并可应用时频域极化滤波技术来压制噪声, 从而有利于极化信号的检测和分类.

2 基于瞬态极化 WVD 相关的目标识别算法

2.1 一维距离像相关

由于同一目标的不同距离像具有一些共同的特征, 这就有可能为每一类目标构造一个滤波器, 使得

它在平均意义上与同一目标的距离像相关性比与其它目标的距离像的相关性更强. 在识别目标时, 计算未知目标的距离像与所有目标的距离像模板的归一化相关峰值 (Matching-Score), 将未知目标判为最大相关系数峰值对应的目标^[2,3].

为了利用雷达回波识别目标, H. J. Li 和 S. H. Yang 提出了直接将目标的距离像作为特征矢量的思想^[2], 设 $f(t)$ 、 $g(t)$ 为复数形式的两个雷达回波, $t \in [a, b]$, 其归一化相关系数 $C(f, g)$ 定义为

$$C(f, g) = \frac{|\int_a^b f(t)g^*(t)dt|}{|\int_a^b |f(t)|^2dt \cdot \int_a^b |g(t)|^2dt|^{1/2}} \quad (10)$$

其中 * 表示复共轭. 由许瓦兹不等式可知 $0 \leq C(f, g) \leq 1$, 当且仅当 $f(x) = ag(x)$, a 为一常数时, $C(f, g) = 1$. 对于目标识别问题, $f(t)$ 和 $g(t)$ 被称之为特征矢量, 匹配度定义为这两个特征矢量的所有线性位移之间的相关系数的最大值.

2.2 瞬态极化 WVD 相关

极化测量雷达可以获得目标的极化散射信息, 此时的一维距离像包括两个正交极化接收通道的回波. 假设雷达发射水平极化, 而水平极化、垂直极化同时接收, 则该极化雷达的目标一维距离像为

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_{hh}(t) \\ e_{vh}(t) \end{bmatrix}, \quad t \in [a, b] \quad (11)$$

为充分利用雷达回波的极化信息, 根据瞬态极化 WVD 的莫耶公式, 可将基于一维距离像相关的目标识别方法加以拓广, 设计基于瞬态极化 WVD 相关的目标识别方法.

设 $e_1(t)$ 、 $e_2(t)$ 为极化雷达的 2 个回波, $t \in [a, b]$, $e_1(t)$ 、 $e_2(t)$ 的瞬态极化 WVD 分别为 $W_{j_1}(t, f)$ 、 $W_{j_2}(t, f)$, 其归一化相关系数 $C(e_1(t), e_2(t))$ (或记为 $C(W_{j_1}, W_{j_2})$) 定义为

$$C(e_1(t), e_2(t)) = \frac{|\iint W_{j_1}^*(t, f)W_{j_2}(t, f)dt df|}{[\iint W_{j_1}^*(t, f)W_{j_1}(t, f)dt df \cdot \iint W_{j_2}^*(t, f)W_{j_2}(t, f)dt df]^{1/2}} \quad (12)$$

由定义式易知 $0 \leq C(e_1(t), e_2(t)) \leq 1$, 当且仅当 $e_1(t)$ 、 $e_2(t)$ 之间相差一个复常数时, $C(e_1(t), e_2(t)) = 1$.

根据以上定义及识别准则, 可得目标识别算法的流程图如图 1 所示.

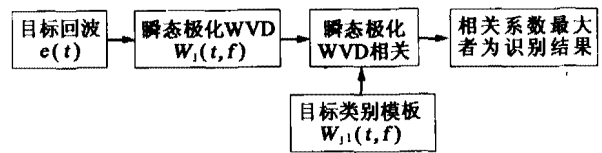


图 1 目标识别系统原理图

Fig. 1 Schema of target recognition system

3 目标识别实验结果

目标识别实验的数据为五类飞机目标模型的外场静态测量数据. 测量系统为阶梯变频全极化体制雷达, 工作频率范围为 34.7GHz ~ 35.7GHz, 频率步进间隔为 2MHz, 观测频率点数 $N = 500$; 测量系统通过交替发射水平、垂直极化, 并且同时接收这两种正交极化就可以获得全极化信息. 5 类目标模型分别是: F117A 隐形战斗机 (F), 幻影 2000 战斗机 (H), 轰炸机 (J), 无人驾驶飞机 (W), 运输机 (Y); 5 种飞机的缩比模型长约 1.5 ~ 3.0m, 宽约 1.0 ~ 1.8m, 高约 0.2 ~ 0.5m, 测试姿态为: 0° 横滚角, 0° 及 15° 俯仰角, 方位角范围为 $0^\circ \sim 30^\circ$, 方位角采样间隔为 1° .

图 2 为目标 F 分别在 10° 方位角的距离像与目标识别数据库中 5 类目标各方位角下的距离像相关的结果. 其中左边为根据式 (12) 计算一维距离像相关所得结果, 而右边为根据式 (14) 计算极化雷达距离像瞬态极化 WVD 相关所得结果. 从图 2 中可以看出, 应用基于瞬态极化 WVD 相关的识别算法时, 匹配目标和失配目标的匹配度相差较大, 因而可以提供更加可靠的识别.

在目标识别实验中, 根据测量系统的带宽, 并结合测量数据的实际情况, 把方位角范围每隔 5° 分成 6 个区间, 对每一类目标在每一个方位角区间构造一个滤波器, 这样五类目标共有 30 个滤波器. 0° 俯仰角的测量数据用来构造滤波器, 然后输入来自 15° 俯仰角的测量数据, 用来测试和评估目标识别算法的性能. 滤波器的构造方法为每一个方位角区间内各方位角下目标回波瞬态极化 WVD 的平均, 在计算相关系数时, 由于测量条件为外场静态, 测量数据已经过距离对准, 因此计算过程中省去了这一步骤. 目标识别结果如表 1 ~ 表 2 所列.

从表 1 ~ 表 2 可以看出, 利用基于瞬态极化 WVD 相关的目标识别算法, 用 0° 俯仰角的数据构造识别数据库, 用 15° 俯仰角的测量数据输入目标识别系统进行目标识别实验, 可以达到平均为 73% 的识别率; 并且, 识别性能对于信噪比并不敏感. 究

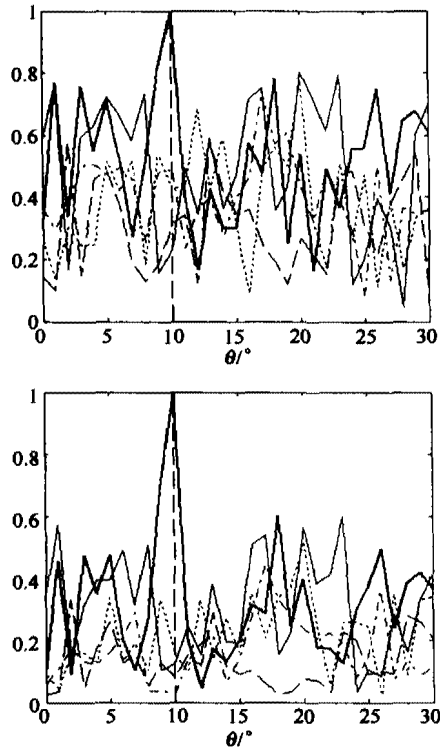


图2 目标F的匹配度(左边:距离像相关,右边:瞬态极化WVD相关)

Fig. 2 Matching scores of target F (Left: corr. of range profile, right: corr. of InPol WVD)

表1 识别结果(SNR = 20dB)

Table 1 Recognition result(SNR = 20dB)

| 模板 测试 | F | H | J | W | Y | 正确 识别率 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| F | 260 | 0 | 40 | 0 | 0 | 86.7% |
| H | 0 | 179 | 104 | 17 | 0 | 59.7% |
| J | 0 | 0 | 300 | 0 | 0 | 100% |
| W | 37 | 0 | 17 | 196 | 50 | 65.3% |
| Y | 132 | 0 | 0 | 0 | 168 | 56.0% |
| 平均 识别率 | | | | | | 73.5% |

表2 识别结果(SNR = 10dB)

Table 2 Recognition result(SNR = 10dB)

| 模板 测试 | F | H | J | W | Y | 正确 识别率 |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----------|
| F | 266 | 0 | 34 | 0 | 0 | 88.7% |
| H | 0 | 193 | 96 | 11 | 0 | 64.3% |
| J | 0 | 0 | 300 | 0 | 0 | 100% |
| W | 45 | 0 | 19 | 182 | 54 | 60.7% |
| Y | 142 | 0 | 0 | 0 | 158 | 52.7% |
| 平均 识别率 | | | | | | 73.3% |

其原因是因为,如图2中的曲线所表现的那样,基于瞬态极化WVD相关算法,匹配目标与失配目标相比

匹配度相差较大,因而其性能对信噪比不那么敏感,可以实现较为可靠的识别;但是,从图2中也可看出,匹配度对方位角比较敏感,而构造识别数据库时方位角间隔为 5° ,且建立数据库的数据与用来测试目标识别系统的数据分别来自不同的俯仰角,其差值为 15° ,因此识别率并不太高.若测试数据与样本数据的俯仰角间隔能更小一些,有可能获得更高的识别率.

4 结语

目标一维距离像是光学区雷达目标识别所依据的最基本的目标特征之一,而利用极化信息处理可以进一步提高目标识别系统的性能,极化信息处理技术与雷达高分辨成像技术相结合是雷达目标识别研究领域一条极富潜力的技术途径.

从目标识别实验结果可看出,基于瞬态极化WVD相关的目标识别算法,可以更加可靠地对目标进行识别.但是,为提高目标识别系统的性能,还需进一步研究识别数据库的构造以及姿态不敏感特征的提取问题.本文的研究表明,运用电磁波瞬态极化时频分析技术,可以更加完整和细致地刻画极化信号的时变特性;瞬态极化时频分析技术为在时频联合域上研究电磁信号的极化特性提供了数学工具,为宽带极化信息处理提供了新的思路和方法.

REFERENCES

- [1] ZHUANG Zhao-Wen, XIAO Shun-Ping, WANG Xue-Song. *Radar Polarization Information Processing and Application* [M]. Beijing: National Defense Industry Press (庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及其应用. 北京:国防工业出版社), 1999.
- [2] Li Hsueh-Jyh, Yang Sheng-Hui. Using range profiles as feature vectors to identify aerospace objects [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1993, **41**(3): 261—268.
- [3] Hudson Scott, Psaltis Demetri. Correlation filters for aircraft identification from radar range profiles [J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Syst.*, 1993, **29**(3): 741—748.
- [4] Li Hsueh-Jyh, Wang Yung-Deh, Wang Long-Huai. Match score properties between range profiles of high-resolution radar targets [J]. *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, 1996, **44**(4): 444—452.
- [5] Jacobs Steven P, O'Sullivan Joseph A. Automatic target recognition using sequences of high resolution radar range-profiles [J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Syst.*, 2000, **36**(2): 364—381.
- [6] WANG Xue-Song. Study on wide-band polarization information processing [D]. Ph. D. Thesis. National University of Defense Technology (王雪松. 宽带极化信息处理的研究. 国防科技大学博士学位论文), 1999.
- [7] Flandrin Patrick. A time-frequency formulation of optimum detection [J]. *IEEE Trans. Acoustics Speech, and Signal Processing*, 1988, **36**(9): 1377—1384.