

基于极化不变量特征的雷达目标识别技术

王福友^{1,2}, 罗 钉¹, 刘宏伟²

(1. 中航工业雷达与电子设备研究院, 江苏无锡 214063;

2. 西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验室, 陕西西安 710071)

摘 要: 极化是雷达目标具有的特性之一。以电磁散射计算仿真的圆锥形弹头模型、球形和圆柱形诱饵模型为研究对象,在极化不变量理论上对这些简单目标的极化特性进行了试验分析研究,提出了一种新的组合极化不变量特征(功率矩阵迹与行列式的比值)用于雷达目标识别,并给出了其对应实际的物理意义。文中以 SVM 为分类器,提出基于功率矩阵迹、去极化系数和功率矩阵迹与行列式的比值特征进行分类识别,结果表明,该方法可以有效地将弹头和诱饵进行分类识别。

关键词: 雷达目标识别; 极化; 功率矩阵迹; 去极化系数; 功率矩阵迹与行列式的比值

中图分类号: TN958 文献标识码: A 文章编号: 1672-2337(2013)02-0165-08

Radar Target Classification Based on Some Invariant Properties of the Polarization

WANG Fu-you^{1,2}, LUO Ding¹, LIU Hong-wei²

(1. AVIC Radar and Avionic Institute, Wuxi 214063, China; 2. National Key Lab of Radar

Signal Processing, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: Polarization is one of the main target features. This paper uses electromagnetic scattering computation to model cone warhead, bait(sphere and column). Experiment analysis of the invariant properties of the polarization scattering matrix(IPPSMs) for the simple targets is given. A new IPPSM(the ratio for trace of power scattering matrix to determinant) is first presented and its physical characteristic is also given. SVM is used as classifier, and trace of power scattering matrix, depolarization and TPSMD are presented for target classification. The recognition results validate the effectiveness of theoretical analysis.

Key words: radar target recognition; polarization; trace of power scattering matrix; depolarization; trace of power scattering matrix to determinant

重要的军事意义^[6-7]。

雷达回波的极化特征是继幅度、相位和多普勒频移之后的另一个重要特征。由于极化信息处理使用了雷达回波的矢量信息,使得许多在时域、频域、空域用常规手段难以解决的问题有了解决办法。利用极化信息能提高目标检测信噪比、抗干扰能力和目标识别能力^[8]等。因此,作为时域、频域和空域信号处理技术的补充,极化信息处理技术对目标识别具有潜在应用价值。

极化是电磁波的固有属性,被认为是与目标几何外形直接相关的一种特征,而全极化雷达往往被认为可以接收雷达回波的所有能量,得到了极化散射矩阵,更与目标特性紧密联系。极化用于目标识别的一个最简单的例子就是极化可以有

1 引言

作为战术打击和战略威慑武器的中、远程各型弹道导弹的研发一直受到各主要军事强国和新兴国家的重视^[1]。而从弹道导弹研制成功不久后的 1950 年开始,弹道导弹防御技术就成为美苏等国的研究热点。目前,美国等国已经建立起实用的弹道导弹防御系统^[2-5]。

弹道导弹防御面临的环境和技术日益复杂,如何实现在导弹自由飞行段和再入段的预警和识别,并引导我方导弹进行拦截,是弹道导弹防御的关键,雷达目标识别技术的研究对于导弹防御系统和战略、战术弹道导弹突防技术的发展均具有

效识别球形诱饵,其 RCS 可以和弹头迎头方向的 RCS 近似相等,运用传统的单一极化雷达很难区分弹头和球形诱饵,而全极化雷达可以有效区分弹头和球形诱饵,因为球在不同方位的极化散射矩阵近似相同,而弹头在不同方位的极化散射矩阵是和诱饵球不同的。

从公开的文献上看,当前国内外研究得比较多的是极化 SAR,主要是用于遥感等,取得了较成功的研究^[9]。国外鲜有报道极化用于弹道导弹目标识别,但据预测美国反导雷达具有极化识别的能力,目前国内具有极化能力的雷达较少,主要是成本较大,但随着科技的发展以及工艺的改进,相信具有全极化测量能力的极化雷达会得到进一步的应用。

Bickel 较早地提出极化不变量的理论^[10],但没有给出试验验证和分析,本文在电磁散射计算仿真数据基础上,对锥形弹头模型、球形和圆柱形诱饵模型的极化不变量特征进行了分析,提出了新的极化不变量特征,得出了一些实用的结论。

2 极化不变量目标识别原理

极化与目标的几何外形直接相关,因此本文主要是依据极化不变量特征进行目标分类识别。

分时极化或同时极化情况下,可以采用测量极化散射矩阵的方法进行目标识别。在 H-V 基下,信号的发射电场和散射电场存在以下线性关系:

$$E_s = [S]E_i \quad (1)$$

式中, E_i 和 E_s 分别为入射波和散射波的极化状态, $[S]$ 为 2×2 的复矩阵(Sinclair 矩阵),得到极化散射矩阵:

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (2)$$

对于互易性目标,可以近似地认为

$$S_{HV} \approx S_{VH} \quad (3)$$

通过极化散射矩阵进行相应变换可得到极化不变量:

(1) 行列式模值 $|\Delta|$

$$|\Delta| = |\det[S]| = |S_{HH}S_{VV} - S_{HV}^2| \quad (4)$$

(2) 功率矩阵迹 P_1

$$P_1 = |S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2 \quad (5)$$

(3) 去极化系数 D

$$D = 1 - \frac{|S_{HH} + S_{VV}|^2}{2P_1} \quad (6)$$

(4) 本征极化方向角 φ_0

$$\varphi_0 = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\operatorname{Re}(S_1^* S_{12})}{\operatorname{Re}(S_1^* S_2)} \quad (7)$$

式中,

$$\begin{cases} S_1 = S_{HH} + S_{VV} \\ S_2 = S_{HH} - S_{VV} \\ S_{12} = S_{HV} \end{cases} \quad (8)$$

(5) 本征极化椭圆率 τ_0

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \arctan \frac{j2S'_{12}}{S_1} \quad (9)$$

式中,

$$S'_{12} = S_{12} \cos(2\varphi_0) - \frac{1}{2} S_2 \sin(2\varphi_0) \quad (10)$$

由于功率矩阵迹 P_1 和行列式 Δ 均为不变量,本文提出一个组合的不变量系数 η

$$\eta = \frac{P_1}{|\Delta|} = \frac{|S_{HH}|^2 + |S_{VV}|^2 + 2|S_{HV}|^2}{|S_{HH}S_{VV} - S_{HV}^2|} \quad (11)$$

表 1 给出了以上极化特征对应的物理意义,具有明确的物理意义,可能更能有效地利用极化特征进行目标识别。

表 1 极化散射矩阵提取的特征对应的物理意义

极化特征	物理意义
行列式模 $ \Delta $	行列式值 $ \Delta $ 粗略反映了目标的粗细或“胖瘦”
功率矩阵迹 P_1	P_1 代表了一对正交极化天线所接收到的总功率,它大致反映了目标的大小
去极化系数 D	D 大致反映了目标散射中心的个数: ① $0 < D < 0.5$ 时对应的是一孤立的散射中心目标; ② $0.5 < D \leq 1$ 时对应的是多散射中心的组合体目标
本征极化方向角 φ_0	φ_0 反映了目标极化方向
本征极化椭圆率 τ_0	τ_0 反映了目标对称性差异
组合的不变量系数 η	η 表示目标的纵横比

3 仿真试验结果

由于极化涉及复杂的电磁散射机理和目标特性,本文采用电磁散射计算仿真数据进行分析,对于纯金属电磁计算仿真的结果和微波暗室测量的结果相当。根据文献[6]和文献[12]所述,导弹弹头的外形可能是圆锥体,因此本文选取圆锥体作为弹头模型,而由文献[11]和文献[12]可知,诱饵可能是充气球体,此外考虑长度等因素,本文还选择了圆柱体,圆柱体与圆锥体等高,底面直径也相等。图 1 给出了本文电磁散射计算所用的三种目标模型示意图,分别为圆锥、球、圆柱。极化方式采用线极化 HH、VV、HV、VH 极化。

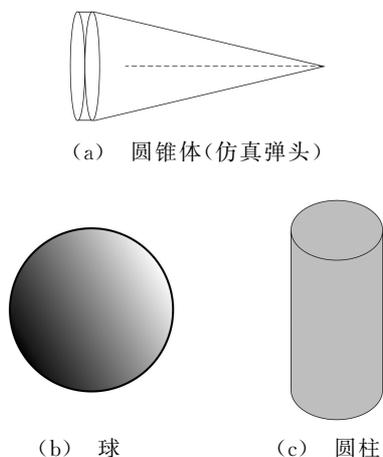


图1 简单目标模型示意图

3.1 电磁计算仿真试验模型及参数

3.1.1 圆锥体

圆锥体高为 1.5 m(包含锥尾 5 cm 高圆柱部分,由于该部分相对较小,本文将该目标统称为圆锥体),锥顶半角为 9° ,底面半径为 0.24 m,频率为 8.5~10.5 GHz,频率步进为 2 MHz,方位角为 $0^\circ\sim 180^\circ$,角度步进为 0.2° , 0° 对应于锥尖, 180° 对应于锥尾。

3.1.2 球体

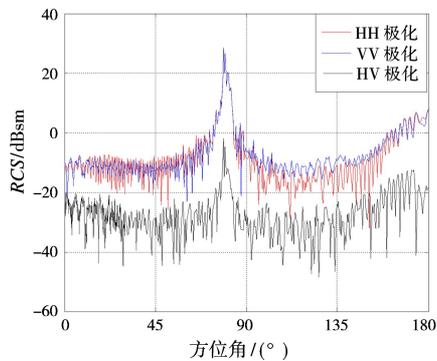
在各种极化模式下,金属球的 RCS 与视角无关,其仿真随频率变化的 RCS 数据。球的 RCS 结果是一致的,因此本文测量的球目标尺寸是以波长归一化的目标特征尺寸大小的参数 $ka^{[11]}$, $ka \in (0,500)$, k 为波数, $k = 2\pi/\lambda = 2\pi f/c$, a 为球的半径, ka 步进为 0.1。

3.1.3 圆柱体

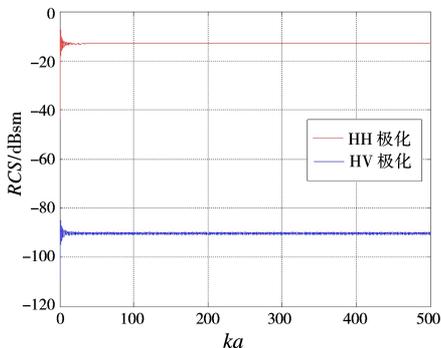
圆柱和圆锥目标高和底面直径相同,圆柱体高为 1.5 m,底面半径为 0.24 m。频率为 8.5~10.5 GHz,频率步进为 2 MHz,方位角为 $0^\circ\sim 90^\circ$,角度步进为 0.1° , 0° 对应于底面, 90° 为垂直对圆柱。

3.2 电磁计算仿真 RCS 结果与分析

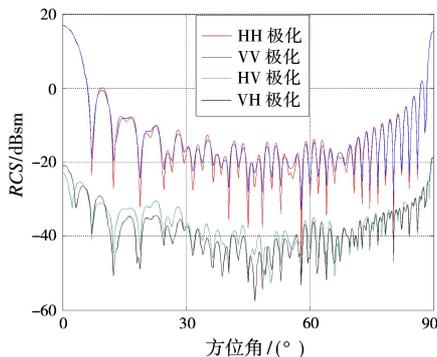
图 2(a)~(c)给出的是图 1(a)~(c)所对应的简单目标的不同极化下的 RCS。由于圆锥体是标准体,满足互易性,所以图 2(a)给出的是 HH、VV、HV 极化下频率为 10 GHz 的 RCS;



(a) 圆锥体的 RCS



(b) 球体的 RCS



(c) 圆柱体的 RCS

图2 电磁计算仿真的简单目标不同极化下的 RCS

由于球体为各向同性,其同极化 HH 和 VV 极化近似相等,HV 和 VH 极化相等,所以图 2(b)只给出球的 HH 极化和 HV 极化模式下频率为 10 GHz 的 RCS 回波,由图 2(b)可知,交叉极化 RCS 接近于零(接近 -80 dB)。需要说明的是当 $ka < 0.5$ 时,目标处于瑞利区,当 $0.5 \leq ka \leq 20$ 时,目标处于谐振区,由图 2(b)可知,在谐振区内,目标的 RCS 随频率变化震荡,当 $ka > 20$ 时,此时目标的 RCS 主要取决于其形状和表面的粗糙程度,由于是球体,在光学区类似于一条直线,同时也验证了文献[12]对瑞利区、谐振区和光学区的划分理论。

图 2(c)给出的是圆柱全极化模式下的 RCS,可以看出 HV 极化和 VH 极化的 RCS 近似相等;由图 2(a)和(c)可知,在全方位变化下,任意一种目标的同极化的 RCS 起伏趋势一致,RCS 值近似相等,交叉极化也具有相同的结论,同极化与交叉极化的差值在 20 dB 左右。

由图 2 可知,除了个别方位外,圆锥体、球体、圆柱体的同极化的 RCS 接近,这对于传统的单一极化雷达是很难通过 RCS 对这三类目标进行分类识别的,此外由于圆柱的长度和圆锥体的长度相同,传统的一维像通过测量目标的长度也将很难区分这两类目标,这也说明用球体和圆柱体作诱饵是可能的。

4 特征提取与识别

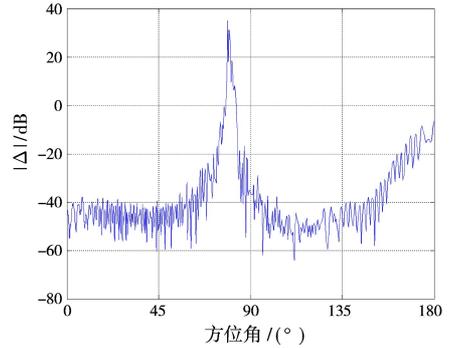
4.1 特征提取与分析

依据电磁计算仿真数据提取极化散射矩阵,由极化散射矩阵提取极化不变量特征,图 3~图 5 分别给出了圆锥体、球、圆柱极化不变量特征:行列式模值 $|\Delta|$ 、功率矩阵迹 P_1 、去极化系数 D 、本征极化方向角 φ_0 、本征极化椭圆率 τ_0 和本文提出的新的组合极化不变量特征功率矩阵迹与行列式的比值 η 。

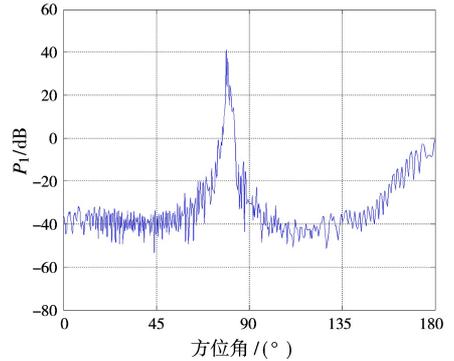
由图 3~图 5(a)、(b)可知, $|\Delta|$ 和 P_1 特征除了量值的不同,其量值的变化趋势是一致的。从图 3(c)的 D 特征除了个别方位,在全方位 $0^\circ \sim 180^\circ$ 范围内, $0.6 < D \leq 1$,说明圆锥体是多散射中心目标,散射中心个数 ≥ 2 ,这也验证了文献[12]的观点:一般认为平底锥弹头有 3 个主要散射中心。由图 4(c)可知, $D \approx 0$,依据文献[10]可知目标是单散射中心,说明球体是各向同性,与雷达视角无关。由图 5(c)可知,圆柱体的 D 特征在 $0 \sim 1$ 的震荡变化,说明圆柱的散射中心随着方位角是变化的,有的方位角圆柱的散射中心是 1 个,有的方位角的散射中心的个数 ≥ 2 ,并没有规律性。

由图 3~图 5(d)、(e)可知,三类目标的 φ_0 和 τ_0 特征也具有较明显的差异,但在实际应用当中,大型极化雷达很难保证极化相位的测量精度,而这两个特征与相位关联较明显,因此本文对于这两个特征不作深入分析,也不作为本文分类识别所用特征。

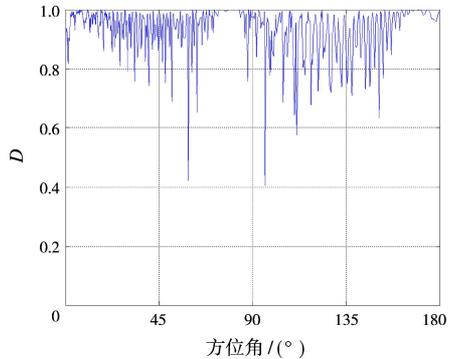
由图 3~图 5(f)可知,三个目标的 η 特征也存在差异,球体目标近似是一条直线,说明其纵横比不变,而圆柱和圆锥体有一定的差异,尤其是在方位角 $(45^\circ \sim 90^\circ)$ 区间。



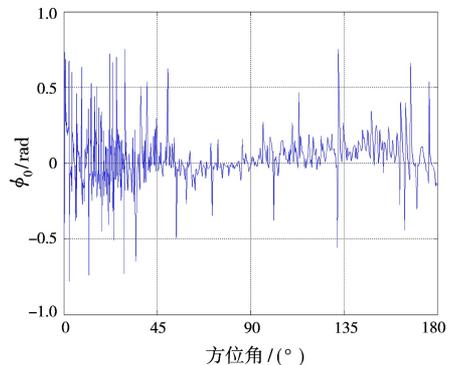
(a) 行列式模值 $|\Delta|$



(b) 功率矩阵迹 P_1



(c) 去极化系数 D



(d) 本征极化方向角 φ_0

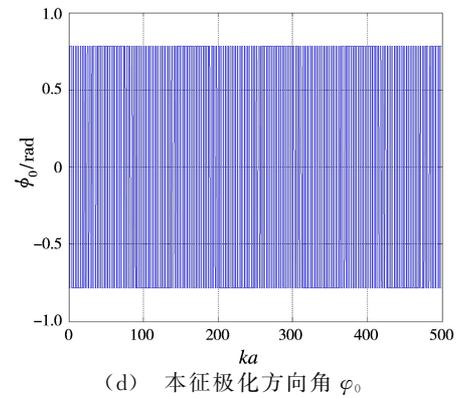
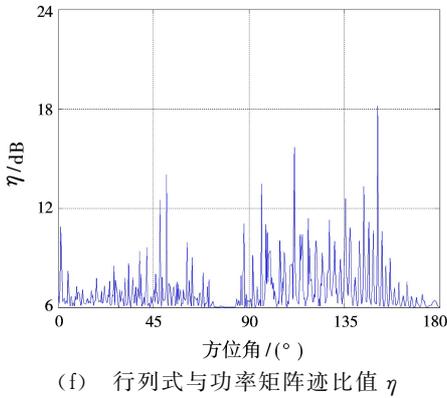
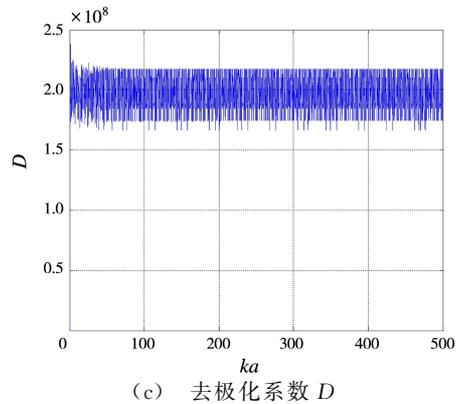
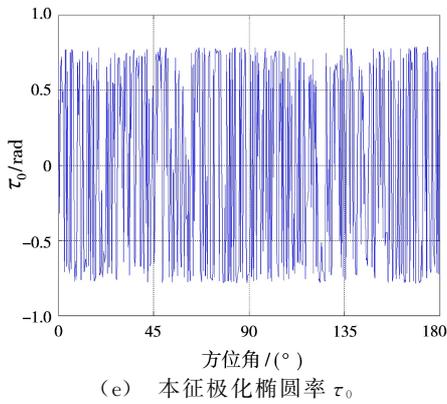


图3 圆锥体的极化不变量特征

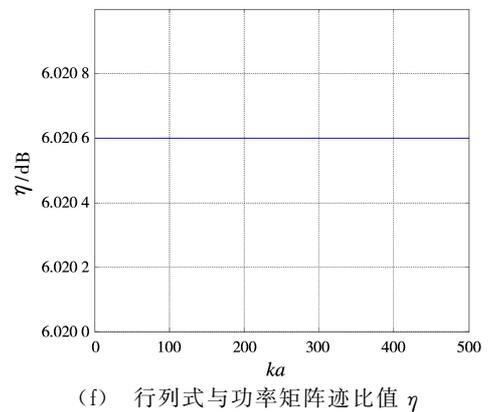
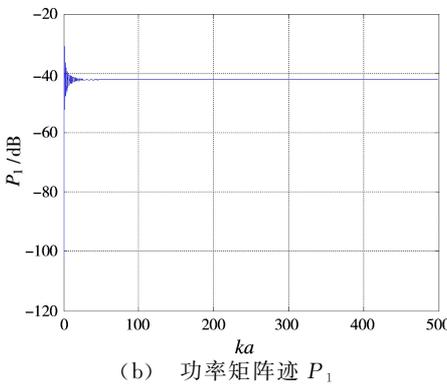
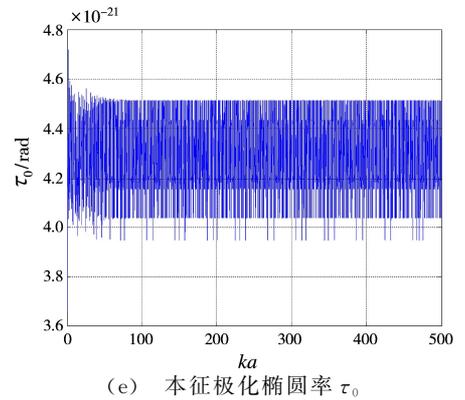
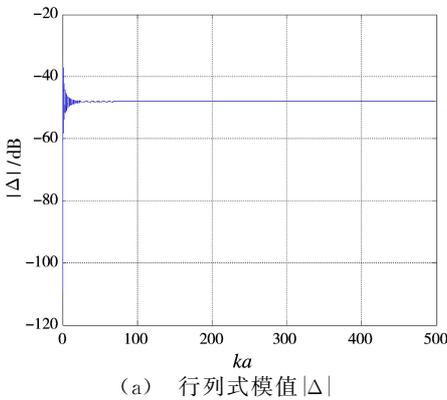


图4 球体的极化不变量特征

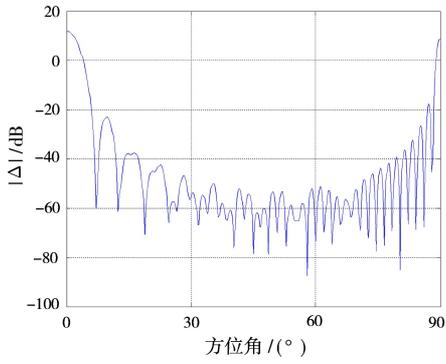
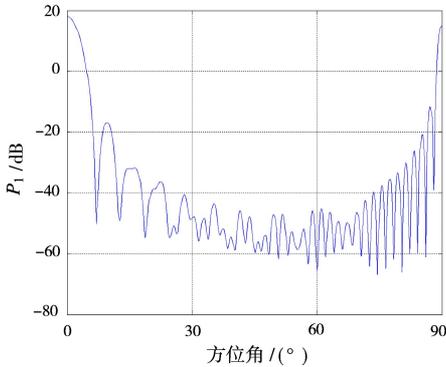
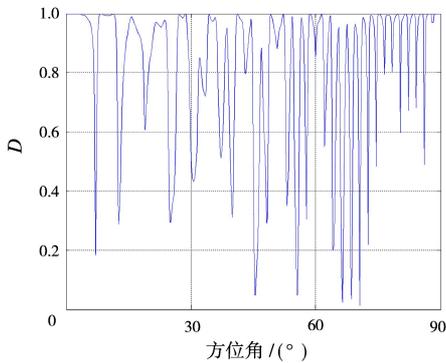
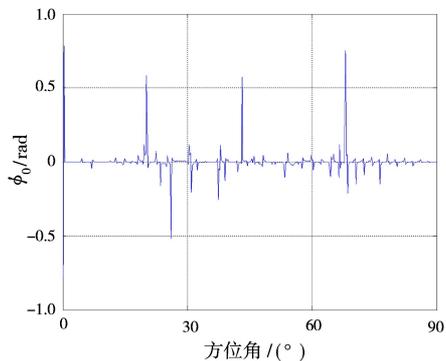
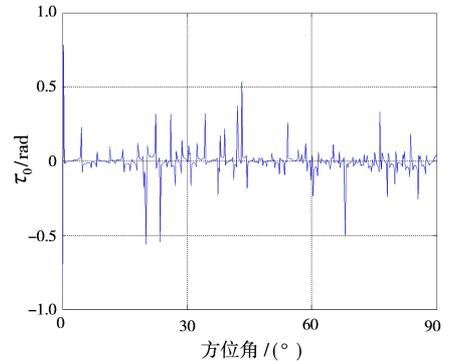
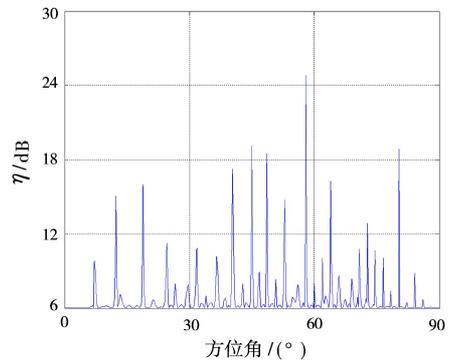
(a) 行列式模值 $|\Delta|$ (b) 功率矩阵迹 P_1 (c) 去极化系数 D (d) 本征极化方向角 ϕ_0 (e) 本征极化椭圆率 τ_0 (f) 行列式与功率矩阵迹比值 η

图 5 圆柱体的极化不变量特征

4.2 识别结果及分析

图 6 给出了极化目标分类识别的流程图。根据式(7)~(11)可知, ϕ_0 特征和 τ_0 特征容易受到相位的影响, 而大型极化雷达很难保证极化相位测量精度, 因此本文提出采用与幅度相关性较大的 P_1 、 D 以及 η 特征进行分类识别, 而目标的几何外形特征主要取决于极化的幅度信息。

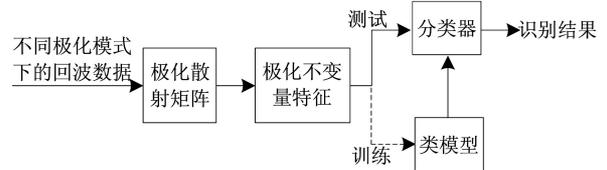


图 6 极化目标分类识别流程图

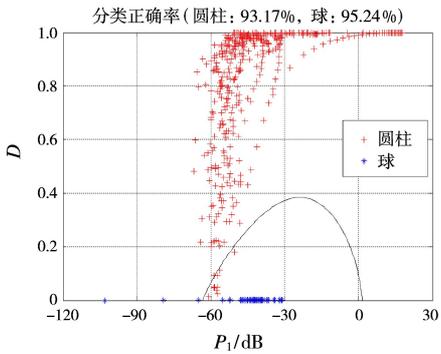
4.2.1 SVM 分类器

特征提取后接下来就需要进行分类识别, 而目标分类识别离不开稳定的分类器, SVM (Support Vector Machine) 相比其他分类器泛化能力较

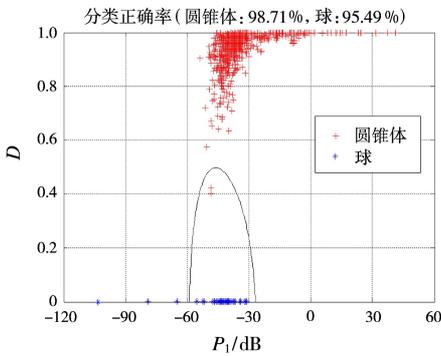
强,收敛速度较快,且对小样本训练效果也较好,故本文采用SVM分类器,其核函数采用RBF。

4.2.2 基于双特征分类识别

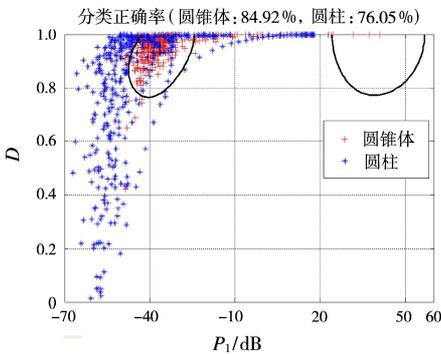
由图3~图5(a)、(b)可知, $|\Delta|$ 特征和 P_1 特征相关性较近,因此这两个特征选取 P_1 特征,再加一个 D 特征,形成双特征。在本文分类识别过程中,SVM训练样本为在特征数据中随机抽取150个,再用SVM训练后的分类线对全部数据进行分类。图7给出基于SVM分类器的 P_1 和 D 双特征的分类识别结果,分类线可以较好地将两类目标进行分类。表2给出了基于 P_1 和 D 双特征的目标分类识别结果。



(a) 球体和圆柱体的分类识别结果



(b) 圆锥体和球体的分类识别结果



(c) 圆锥体和圆柱体的分类识别结果

图7 基于 P_1 和 D 双特征 SVM 分类识别结果

表2 几种简单目标的分类识别结果

测试组	目标类型	方位角/(°)	识别特征	分类识别率/(%)	平均识别率/(%)
1	球体	全方位	P_1, D	93.17	94.21
	圆柱体	0 : 0.2 : 90		95.24	
2	圆锥体	0 : 0.2 : 180	P_1, D	98.71	97.10
	球体	全方位		95.49	
3	圆锥体	0 : 0.2 : 180	P_1, D	84.92	80.49
	圆柱体	0 : 0.2 : 90		76.05	

4.2.3 基于三特征分类识别

由图7(c)可知,圆锥体和圆柱的分类效果相对于前两组效果差一些,也为了验证本文提出的新的极化不变量 η 特征的有效性,图8给出了基于 P_1, D 和 η 三特征的分类识别效果图。SVM训练样本为在特征数据随机抽取150个,由于是三维图,无法画出分类界限。表3给出了基于这三个特征的目标分类识别结果。

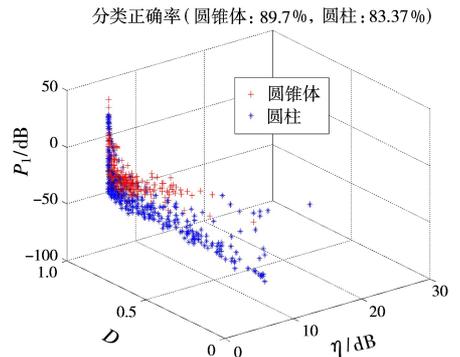


图8 基于 P_1, D 和 η 三特征的 SVM 分类识别结果

表3 几种简单目标的分类识别结果

测试组	目标类型	方位角/(°)	识别特征	分类识别率/(%)	平均识别率/(%)
1	圆锥体	0 : 0.2 : 180	P_1, D, η	89.70	86.54
	圆柱体	0 : 0.2 : 90		83.37	

4.2.4 分析和讨论

由图4和表2可知,球体和圆柱体、圆锥体和球体的分类识别率较好,平均识别率分别为94.21%和97.10%,分析这是因为球体和圆柱体、球体和圆锥体存在较大的几何差异,而极化与目标的几何外形有关。而相对前两组,圆锥体和圆柱的分类识别效果就差了,平均识别率为80.49,这主要是因为圆锥体与圆柱长度和底面直径都相等,几何外形相近程度比球体的相近的更大。

由表3可知,加入本文提出的组合极化不变量

η 特征, 目标识别的结果是, 圆锥体为 89.7%, 圆柱体为 83.37%, 都有不同程度的提高, 平均识别率为 86.54%, 相比基于双特征识别平均识别率 80.49%, 提高了 6 个百分点, 验证本文提出该特征的有效性, 此外考虑稳健性, 建议采用三特征分类识别。

5 结束语

本文在电磁计算仿真模型圆锥形仿真弹头、球形和圆柱形诱饵数据基础上对极化不变量特征进行了提取, 并提出了一种新的极化不变量, 并给出了其对应的物理意义, 文章利用 SVM 分类器, 提出基于双特征和三特征对这几种目标进行分类识别, 分类试验结果验证了本文方法的有效性。得出的主要结论如下:

(1) 在全方位下, 圆锥体和圆柱体的任何一种目标的同极化的 RCS 起伏趋势一致, RCS 值近似相等, 交叉极化也具有相同的结论, 同极化和交叉极化的差值在 20 dB 以上;

(2) 通过 RCS 很难将弹头目标和球形诱饵及圆柱诱饵进行分类, 尤其是圆柱诱饵更具有迷惑性;

(3) 在全方位模式下, 锥形弹头的散射中心个数 ≥ 2 , 球体诱饵的个数散射中心个数为 1 个, 圆柱形诱饵的个数随着方位角是变化的, 有时是 1 个有时是多个 (≥ 2);

(4) 本文提出的双特征法(功率矩阵迹、去极化系数)和三特征法(功率矩阵迹、去极化系数、功率矩阵迹与行列式的比值)可以有效地将弹头与球形诱饵、圆柱形诱饵进行分类识别, 平均识别率分别为 90% 和 80% 以上, 考虑到稳健性及识别率建议采用三特征联合分类识别效果会更好; 本文方法可能用于弹头和诱饵的分类识别中。

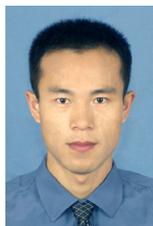
参考文献:

- [1] Pridotkas J J. ICBMS-Their Relevance to US Security and the United States Air Force in the 21st Century, ADA424619[R]. Alabama: Air University Press Maxwell AFB, 2003:1-40.
- [2] Isby D C. No Go-Ahead Yet for Russian Heavy ICBM [J]. Jane's Missiles and Rockets, 2010, 14(12):14-17.
- [3] Aydin A T. Strategic Missile Defense: A Threat to Future Nuclear Arms Reductions [R]. Monterey, USA: Arms Control Association, 2011:1-11.
- [4] Ingwersen P A, Lemnios W Z. Radars for Ballistic Missile Defense Research [J]. Lincoln Laboratory

Journal, 2002, 12(2):245-266.

- [5] Crawford J F, Reed E W, Hines J J, et al. Ground Based Radar-Prototype Antenna[C]// IEE National Conference on Antennas and Propagation, York, UK: [s. n.], 1999:249-252.
- [6] 王璐, 刘宏伟. 基于时频图的微动目标运动参数提取和特征识别的方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(8):1812-1817.
WANG Lu, LIU Hong-wei. Method for Micro-Motion Target Recognition and Motion Parameter Extraction Based on Time-Frequency Analysis[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(8): 1812-1817. (in Chinese)
- [7] 陶勇, 胡卫东, 徐劲. 基于轨道匹配和改进的空间目标识别方法[J]. 雷达科学与技术, 2006, 4(3):134-139.
TAO Yong, HU Wei-dong, XU Jin. A Method of Space Object Identification Based on Orbit Matching and Improving [J]. Radar Science and Technology, 2006, 4(3):134-139. (in Chinese)
- [8] 戴幻尧, 李永祯, 王雪松, 等. 有源多假目标干扰的极化识别新方法[J]. 航天电子对抗, 2010, 26(5):19-22.
Dai Huanyao, LI Yong-zhen, Wang Xue-song, et al. Polarization Discrimination of Multi-False-Target Jamming Based on Pattern Difference Structure of Sum and Difference Beam [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2010, 26(5):19-22. (in Chinese)
- [9] Arii M, Zyl J J, Yunjin K. Adaptive Model-Based Decomposition of Polarimetric SAR Covariance Matrices [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(3):1104-1113.
- [10] Bickel S H. Some Invariant Properties of the Polarization Scattering Matrix [J]. Proceedings of the IEEE, 1965, 53(8):1070-1072.
- [11] Lisbeth G, George N L, David C W. The Continuing Debate on National Missile Defenses [J]. Physics Today, 2000, 53(12):36-42.
- [12] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005:16-18.

作者简介:



王福友 男, 1983 年生于黑龙江省讷河市, 博士后, 主要研究方向为雷达总体技术、雷达目标识别和雷达信号处理技术, 在国内核心期刊和国际学术会议发表论文 30 余篇, 多篇被 EI 和 ISTP 检索, 核心期刊《信号处理》和《雷达学报》的审稿专家。

E-mail: hellofew@163.com