doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.02.010
引用格式:张强.有源诱饵的双极化识别[J].电讯技术,2015,55(2):168-174.[ZHANG Qiang. Dual Polarization Identification of Active Decoys [J]. Telecommunication Engineering,2015,55(2):168-174.]

有源诱饵的双极化识别*

张　强**

(中国西南电子技术研究所,成都 610036)

摘　要:针对双极化测量体制毫米波雷达,研究了有源干扰诱饵的极化识别方法。首先介绍了双极化技术原理,然后详细分析了典型雷达目标和各种极化有源诱饵的双极化回波特性,引入能够有效表征有源诱饵和雷达目标极化特性差异的同极化比和极化起伏等特征,并提出基于自适应恒虚警阈值的目标识别方法。最后通过组建双极化试验雷达系统采集并分析了建筑物和垂直极化、水平极化、左旋圆极化有源诱饵的回波数据,实验结果证明了有源诱饵的双极化识别方法的可行性和有效性。

关键词:毫米波雷达;目标识别;有源诱饵;双极化;极化散射矩阵;同极化;交叉极化

中图分类号:TN95;TN97　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-893X(2015)02-0168-07

Dual Polarization Identification of Active Decoys

ZHANG Qiang

(Southwest China Institute of Electronic Technology,Chengdu 610036,China)

Abstract:For millimeter wave(MMW) radar system of dual polarization,this paper presents a polarization identification method of active jamming decoys. Firstly,the principle of dual polarization technique is introduced,and the characteristics of dual polarization echo of the representative radar targets and various active decoys are analyzed in detail. Secondly,some effective characteristics of active decoys and radar targets are obtained to express their polarization characteristics differences,such as polarization ratio and polarization undulation. Thirdly,an identification method based on self-adaptive constant false alarm rate(CFAR) threshold is proposed. Finally,a dual polarization test radar system is constructed to gather and analyze the experimentation echo data of buildings,vertical polarization,horizontal polarization and left-handed circular polarization active decoys,and the experimentation results prove that the dual polarization identification method of active decoys is feasible and effective.

Key words:millimeter wave radar;target identification;active decoys;dual polarization;polarization scattering matrix;co-polarization;cross-polarization

1　引　言

从近来全球范围内爆发的多次局部战争可以看出,交战双方的电子战对抗愈演愈烈,是直接影响战争进程的重要因素。有源诱饵干扰是主要的电子对抗手段之一,它能主动发射电磁干扰诱饵信号,诱饵信号在幅度、速度和加速度等特征信息上与真实目标相差无几,有极强的迷惑性和欺骗性,常规的时域和频域目标识别方法难以取得良好的效果,极大地影响武器的突防成功率[1-2]。

众所周知,雷达极化信息作为继时域、频域和空域信息以外又一极其重要的特征信息正越来越受到重视,雷达极化技术也日益成为国内外学术界研究的热点。目前,极化信息用于雷达抗干扰、反隐身、目标检测以及识别等方面的研究已取得了大量突出

*　**收稿日期**:2014-09-29;**修回日期**:2015-01-20　　Received date:2014-09-29;Revised date:2015-01-20
**　**通讯作者**:zhangqiang_ioe@126.com　　**Corresponding author**:zhangqiang_ioe@126.com

的成果。文献[3]提出了全极化雷达的有源诱饵鉴别方法，但它主要分析的是有源诱饵和简单形体结构雷达目标的极化特征，并且全极化体制在工程中也是难以实现的。文献[4]主要根据极化分解的思路来探讨全极化雷达的目标识别方法，但是极化分解特性是根据二面角、球等简单散射体提出的，难以表征现实场景中多散射中心组成的建筑物、舰船和飞机等典型雷达目标。文献[5]提出了一种融合多种极化特征的雷达目标识别方法，但该文侧重于融合识别算法的研究，并未对极化特征做过多的分析。现有的极化识别技术的研究工作主要是针对理论算法的研究居多，而对于适应于工程应用需求的极化识别方法研究较少。

本文基于极化技术工程应用背景，针对双极化体制毫米波雷达，在详细分析建筑物等典型雷达目标和有源诱饵双极化特性的基础上，提出基于双极化特征的自适应目标识别方法，并组建了双极化试验雷达系统，用建筑物和毫米波信号源分别代表典型雷达目标和有源干扰诱饵，通过试验采集其回波数据，探讨了典型目标与有源诱饵的可区分识别性问题。

2　双极化技术

电磁波在传播时，电场矢量在水平平面内和垂直平面内均有分量，被称为电磁波的极化现象。雷达发射的电磁波照射到目标上时，由于目标的形状、结构和材料的不同，会对发射电磁波产生不同的极化扭转效应，这种极化扭转效应在数学上可表示为

$$\begin{cases}E_H^R=S_{11}E_H^T+S_{12}E_V^T\\E_V^R=S_{21}E_H^T+S_{22}E_V^T\end{cases}。\quad(1)$$

式中，E_H^R为电场的反射水平极化分量，E_H^T为电场的发射水平极化分量，E_V^T为电场发射的垂直极化分量，E_V^R为电场反射的垂直极化分量，S_{11}、S_{12}、S_{21}和S_{22}为极化矩阵分量[6]。则极化矩阵被规定为

$$\begin{bmatrix}S_{11}&S_{12}\\S_{21}&S_{22}\end{bmatrix}。\quad(2)$$

式中，S_{11}和S_{22}是共极化或同极化散射系数，而S_{12}和S_{21}是交叉极化散射系数。

所谓的双极化测量雷达是一般指仅发射垂直极化电磁波，同时接收垂直和水平两种极化电磁波的雷达测量系统。对双极化雷达而言，当发射垂直极化波，接收到垂直极化波称为同极化现象；但是由于目标的形状结构等因素会使得部分垂直极化波经反射转变为水平极化波，称为交叉极化现象。同时由于目标的形状、结构和材料的不同，也会带来极化波幅度的起伏，对于复杂的舰船、飞机、建筑物等典型雷达目标起伏较大，而有源干扰起伏较小。

对于垂直极化发射且双极化同时接收的测量雷达，目标回波的极化散射矩阵为

$$\begin{cases}E_H^R=S_{12}E_V^T\\E_V^R=S_{22}E_V^T\end{cases}。\quad(3)$$

式中，S_{22}表示目标反射雷达回波的共极化能力，与普通单极化雷达相同；而S_{12}表示目标的交叉极化能力，与目标的形状、结构、材料、形态等参数相关，是目标重要的极化特性。

3　典型目标和有源诱饵的双极化特性

典型的雷达目标主要包括建筑物、舰船和飞机等，它们在结构上以二面角和平板为主，当此类目标被垂直极化电磁波照射时，对电磁波的极化扭转效应比较弱，所以表现为同极化分量强、交叉极化分量弱的特点，如图 1(a)所示。

对于有源干扰诱饵，它是通过干扰机主动发射电磁波的干扰手段，它发射的电磁波极化形式主要有垂直极化、水平极化、斜线 45°极化和圆极化。各种极化电磁波在水平和垂直标准极化基下可描述为[6]：

(1)垂直极化：$E_V=1,E_H=0$；

(2)水平极化：$E_V=0,E_H=1$；

(3)斜线 45°极化：$E_V=1,E_H=1$；

(4)左旋圆极化：$E_V=\cos wt,E_H=\sin wt$；

(5)右旋圆极化：$E_V=\cos wt,E_H=-\sin wt$。

其中，E_V和 E_H分别表示垂直分量和水平分量。那么通过垂直极化发射和双极化同时接收体制的雷达接收到的上述极化形式的有源诱饵信号存在以下特性：

(1)左旋圆极化诱饵：由于圆极化电磁波用两种正交单极化天线接收时只是能量下降 3 dB，所以同极化分量与交叉极化分量幅度水平也非常接近；

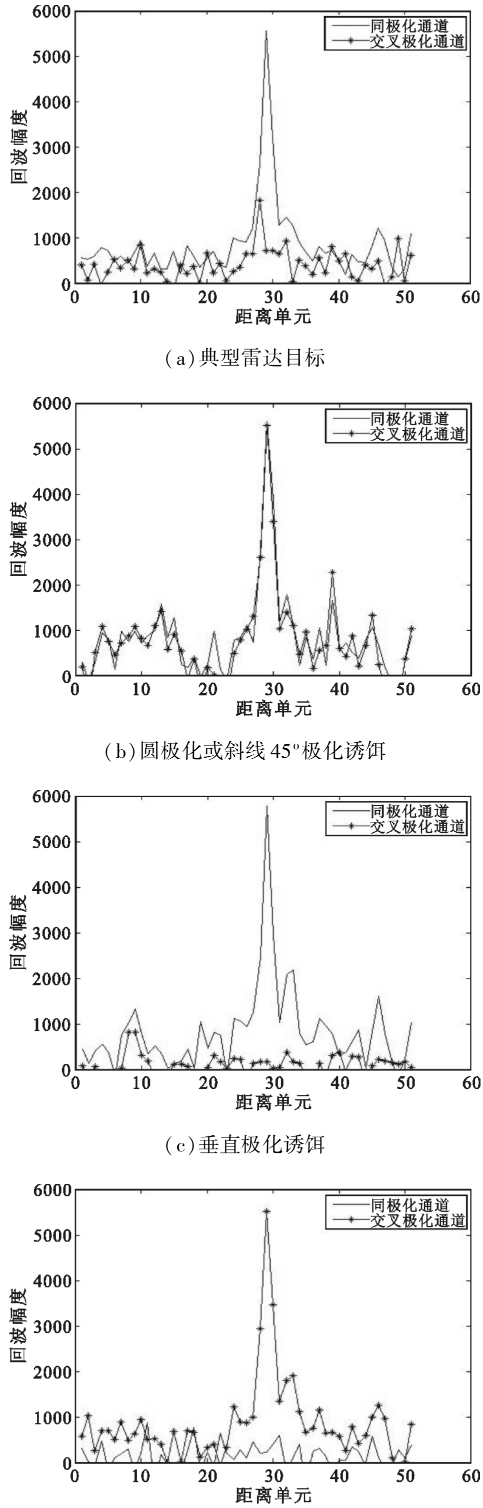
(2)右旋圆极化诱饵：同上；

(3)斜线 45°极化诱饵：同极化分量与交叉极化分量幅度水平较接近；

(4)垂直极化诱饵：同极化分量远大于交叉极化分量；

(5)水平极化诱饵：交叉极化分量远大于同极化分量。

通过上述分析可知，左旋圆极化、右旋圆极化和斜线 45°极化诱饵有类似的极化特性，如图 1(b)所示；垂直极化诱饵和水平极化诱饵的极化特性如图 1(c)和(d)所示。



(a)典型雷达目标

(b)圆极化或斜线 45°极化诱饵

(c)垂直极化诱饵

(d)水平极化诱饵

图 1 典型雷达目标和有源诱饵极化特性示意图
Fig. 1 Polarization characteristics of typical radar targets and active decoys

同时,由于双极化天线接收到的有源诱饵回波是由发射机直接发射电磁波,而典型雷达目标回波则是目标被雷达垂直极化波照射并漫反射返回到天线被接收到的电磁波,由于典型雷达目标的复杂性会使漫反射带来大量的随机起伏,所以双极化天线接收到的有源诱饵的电磁波比典型雷达目标更稳定,起伏更小。

4 双极化识别方法

4.1 极化特征提取

结合上述分析,同极化分量与交叉极化分量之间的关系以及目标的极化起伏关系是典型雷达目标和有源诱饵的主要差异,因此可提取以下极化特征用于典型雷达目标和有源诱饵的识别。双极化回波的同极化比特征表示雷达所发射的垂直极化波经过目标反射后的垂直极化波与水平极化波的幅度比值,此处用多次极化比均值来表示极化比特征,如式(4)和(5)所示:

$$x=\frac{S_{22}}{S_{12}}=\frac{S_{22}E_V^T}{S_{12}E_V^T}=\frac{E_V^R}{E_H^R}, \tag{4}$$

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}x_k。 \tag{5}$$

极化起伏特征可用同极化比方差、同极化通道幅度方差、交叉极化通道幅度方差、同极化通道幅度方差与交叉极化通道幅度方差之比来表示,如式(6)~(9)所示:

$$s_1^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(x_k-\bar{x})^2, \tag{6}$$

$$s_2^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(E_V^R-\overline{E_V^R})^2, \tag{7}$$

$$s_3^2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}(E_H^R-\overline{E_H^R})^2, \tag{8}$$

$$R=\frac{s_2^2}{s_3^2}。 \tag{9}$$

4.2 识别方法

对于典型雷达目标而言,它的极化特征值是服从以均值为中心的高斯分布的,那么其概率密度函数为

$$P(X)=\frac{1}{(2\pi)^{1/2}\sigma}\exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]。 \tag{10}$$

式中,μ 和 σ 分别表示极化特征值的均值和方差。那么令$X_1=(X-\mu)/\sigma$,则极化特征值的概率密度函数可描述为

$$P(X_1)=\frac{1}{(2\pi)^{1/2}}\exp\left[-\frac{X_1{}^2}{2}\right]。 \tag{11}$$

本文采用恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)的自适应阈值方法来进行目标识别的判决。根据 Neyman-Pearson 准则可得虚警率P_f:

$$P_f = \int_{-\infty}^{-L_1} P(X_1)\,\mathrm{d}X_1 + \int_{L_1}^{+\infty} P(X_1)\,\mathrm{d}X_1 = 2\int_{-\infty}^{-L_1} \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}}\exp\left[-\frac{X_1{}^2}{2}\right]\mathrm{d}X_1\text{。} \qquad (12)$$

对于给定的P_f,可由式(12)查表求得L_1,进而可求得门限阈值为

$$T=\pm L_1\sigma+\mu\text{。} \qquad (13)$$

那么,典型雷达目标和有源诱饵的识别如公式(14)所示:

$$\begin{cases} \text{representative radar targets}, & \hat{X}\in(-L_1\sigma+\mu, L_1\sigma+\mu) \\ \text{active decoys}, & \text{else} \end{cases}\text{。} \qquad (14)$$

5　试验分析

为了验证上述有源诱饵的极化识别方法,组建了双极化试验雷达系统。前面已分析对于舰船、飞机和建筑物等典型雷达目标而言,它们有相似的极化特性,所以此处为采集试验数据的方便,选择用建筑物为例代表典型雷达目标。试验中有源诱饵通过毫米波信号源波形发生器和喇叭天线(包括垂直极化、水平极化和左旋圆极化喇叭天线)模拟,可以模拟垂直极化、水平极化和左旋圆极化诱饵。虽然信号源波形发生器产生的连续波信号和真实的有源诱饵存在一定差异,但是由于本文研究的是目标经检测后的识别问题,那么选择一定距离单元内的连续波信号是能够代表检测到的有源诱饵波形的极化特性的,所以本文以此为例采集数据进行分析。

5.1　双极化试验雷达原理

双极化试验雷达系统如图 2 所示,包括毫米波双极化天线、雷达、功分器、数据采集设备和显控设备等。该雷达系统可以实现垂直极化发射,并同时接收垂直和水平两种极化电磁波。

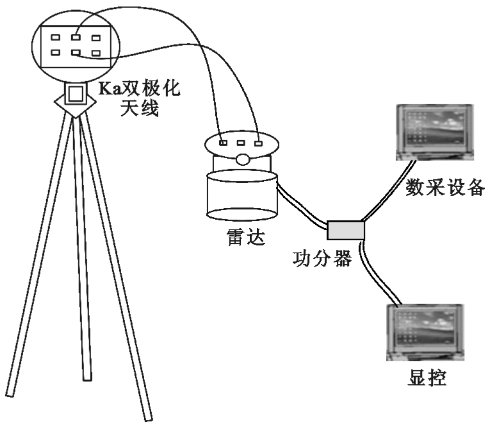
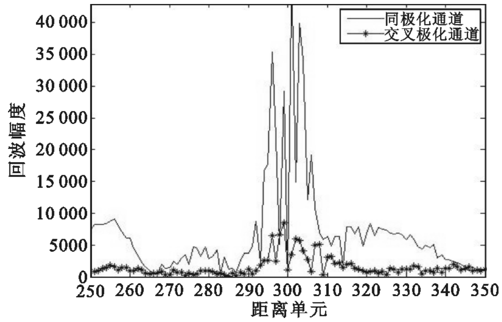


图 2　双极化试验雷达原理框图

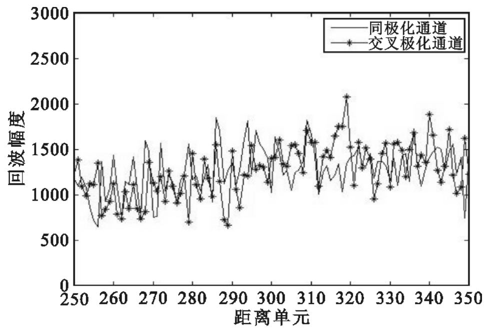
Fig. 2 Principle diagram of dual polarization test radar

5.2　各类目标的一维距离像

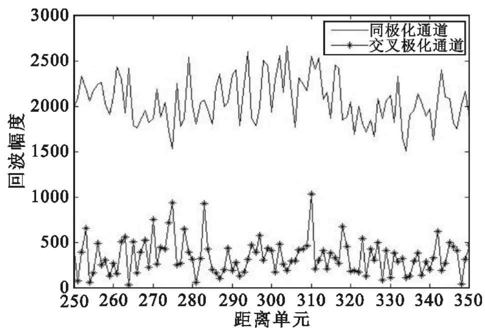
图 3 分别列出了接收到的以上 4 种目标双极化回波数据经过脉冲压缩后所得到的一维距离像,其中横坐标表示距离单元序号,纵坐标表示雷达回波的幅度值,可明显观察到不同目标两个通道目标位置处幅度值的差异。



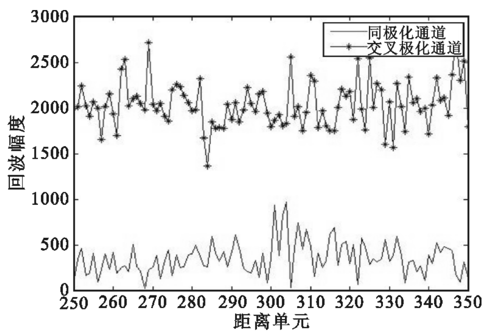
(a)建筑物



(b)左旋圆极化极化诱饵



(c)垂直极化诱饵



(d)水平极化诱饵

图 3　建筑物和有源诱饵双极化回波

Fig. 3 Dual polarization echo of buildings and active decoys

5.3 极化特征分析

对以上 4 种目标分别选取同极化比、同极化比起伏、同极化通道起伏、交叉极化通道起伏、起伏比等 5 个特征进行了分析，每类目标的每个特征值均选取多次回波各得到 10 个特征值，如表 1 所示。从表 1 可以看出 4 类目标的极化特征差异明显。

表 1 建筑物和有源诱饵的极化特征分析

Table 1 Analysis of polarization characteristics of buildings and active decoys

目标		同极化比/dB	同极化比起伏	同极化通道起伏	交叉通道起伏	起伏比/dB
建筑物	1	13.354 6	0.463 4	1.504 9	26.402 8	-24.882 7
	2	13.496 2	0.409 7	3.538 6	23.274 3	-16.361 0
	3	13.415 4	0.389 4	2.601 2	23.109 3	-18.972 4
	4	13.592 1	0.520 8	6.124 6	32.041 9	-14.372 9
	5	13.377 0	0.311 4	2.608 0	19.296 1	-17.383 3
	6	13.403 0	0.326 0	2.122 6	18.352 7	-18.736 8
	7	13.536 3	0.302 9	2.777 0	18.230 5	-16.344 4
	8	13.819 0	0.384 4	3.376 2	21.984 2	-16.273 7
	9	13.711 6	0.388 4	3.020 9	21.860 1	-17.190 2
	10	13.527 2	0.347 2	3.642 6	20.228 8	-14.891 3
左旋圆极化诱饵	1	0.695 6	1.360 9	80.102 4	93.043 5	-1.300 8
	2	1.226 0	1.014 9	50.438 7	79.588 5	-3.961 7
	3	1.312 2	1.356 2	96.656 4	83.150 6	1.307 3
	4	0.792 4	1.412 3	67.026 3	76.821 0	-1.184 7
	5	0.999 9	1.628 5	76.305 8	101.351 1	-2.465 4
	6	1.603 7	1.441 7	53.980 2	107.315 0	-5.968 5
	7	1.861 4	1.868 5	79.049 5	85.973 3	-0.729 3
	8	0.877 5	1.203 3	69.686 4	87.185 6	-1.945 9
	9	1.672 8	1.192 8	89.795 0	90.191 0	-0.038 2
	10	2.114 4	0.781 0	64.647 5	91.962 6	-3.061 2
垂直极化诱饵	1	35.574 1	5.402 5	41.983 5	254.564 9	-15.654 4
	2	36.365 3	6.558 3	42.552 4	338.515 1	-18.013 1
	3	35.405 9	4.046 7	30.357 1	227.642 1	-17.499 8
	4	35.081 0	4.643 8	27.390 4	229.954 6	-18.480 9
	5	36.815 1	4.003 3	46.314 3	186.324 2	-12.091 1
	6	36.562 7	5.402 0	28.768 1	297.271 7	-20.284 8
	7	38.061 9	5.227 9	37.077 4	286.587 7	-17.763 0
	8	37.495 2	4.141 5	36.190 4	205.171 3	-15.070 5
	9	37.550 7	4.972 2	43.118 4	336.493 3	-17.846 3
	10	34.174 6	5.867 0	24.865 5	428.713 2	-24.731 4
水平极化诱饵	1	-33.060 1	6.841 3	348.711 8	42.816 7	18.217 1
	2	-31.644 8	4.413 7	212.128 3	46.943 6	13.100 5
	3	-32.951 9	6.420 0	415.384 5	37.887 0	20.799 2
	4	-29.530 9	5.626 6	243.904 3	37.648 6	16.229 4
	5	-35.321 6	6.816 7	377.121 4	38.614 8	19.794 6
	6	-34.457 9	7.079 8	390.931 8	48.520 3	18.123 5
	7	-31.146 9	7.671 7	335.712 3	47.825 0	16.926 2
	8	-30.655 1	3.934 5	229.783 9	36.612 9	15.953 7
	9	-32.223 2	6.966 7	317.339 3	38.292 4	18.368 2
	10	-30.794 9	4.992 1	289.023 6	44.707 6	16.211 0

表 2 对上述 4 类极化特征值进行了统计特性分析，可以看到 5 个极化特征均有相对好的稳定性，建筑物目标和其他有源诱饵的可区分性良好。

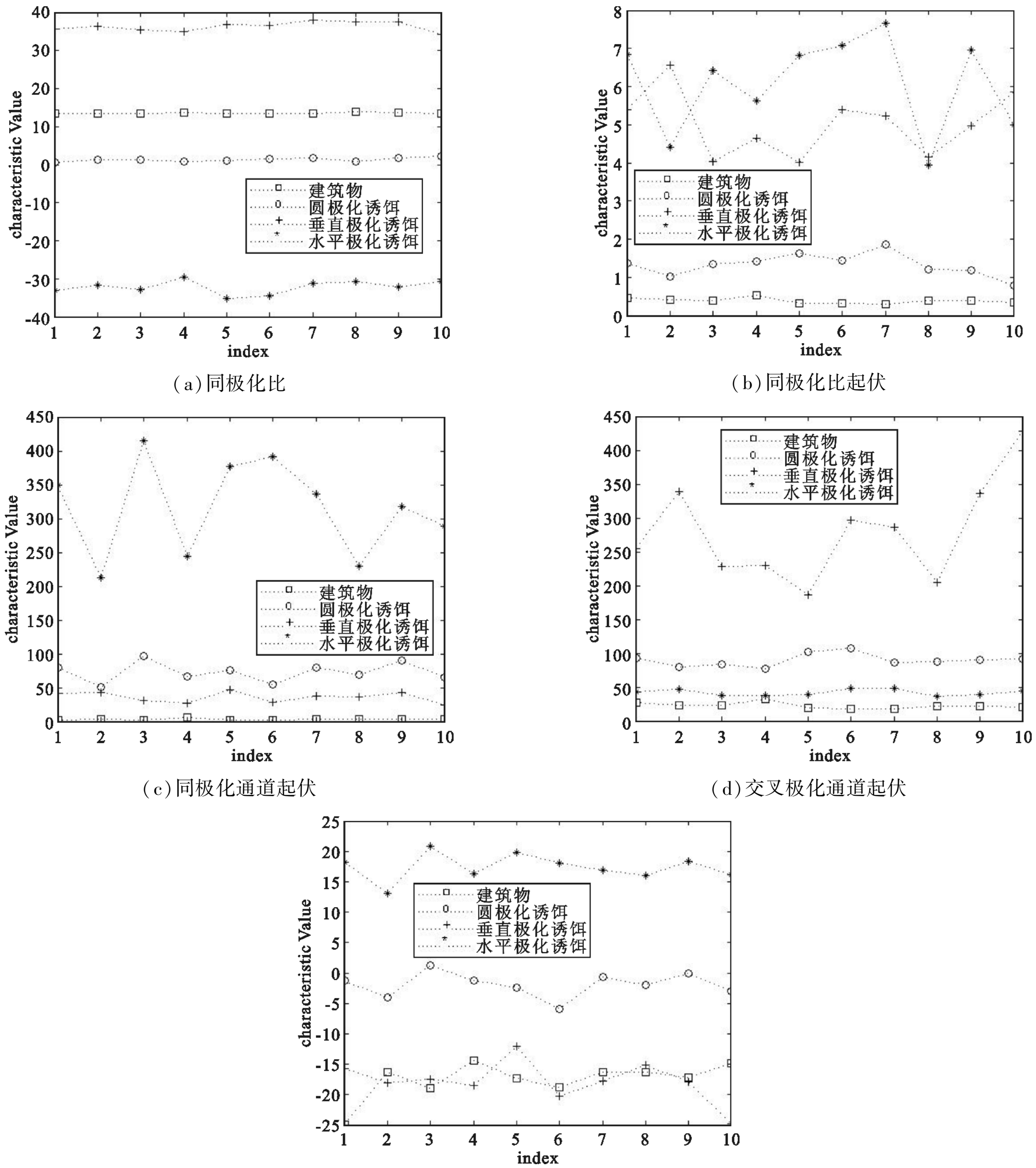
表 2　建筑物和有源诱饵的极化特征统计分析

Table 2 Statistic analysis of polarization characteristics of buildings and active decoys

目标	同极化比		同极化比起伏		同极化通道起伏		交叉通道起伏		起伏比	
	均值/dB	方差	均值	方差	均值	方差	均值	方差	均值/dB	方差
建筑物	13.523 24	0.143 012	0.384 36	0.065 033	3.131 66	1.174 834	22.478 07	3.984 636	−17.540 90	2.810 968
圆极化诱饵	1.315 59	0.458 732	1.326 01	0.289 030	72.768 82	13.879 210	89.658 22	8.909 403	−1.934 84	1.961 011
垂直极化诱饵	36.308 65	1.173 223	5.026 52	0.794 693	35.861 75	7.204 468	279.123 80	70.237 090	−17.743 50	3.153 326
水平极化诱饵	−32.178 70	1.704 289	6.076 31	1.196 910	316.004 10	66.959 970	41.986 89	4.460 478	17.372 34	2.073 536

5.4　识别效果分析

如图 4 所示,对表 1 中特征数据的可识别性进行了作图分析,图的横坐标是特征值抽样序号,纵坐标是特征的值,可以看到前 4 种特征用于识别时,建筑物和 3 种有源诱饵的差异明显,可识别性良好;对于第 5 种特征即起伏特征而言,它和垂直极化诱饵的特征值之间有重叠区域,区分效果不够好,与其他有源诱饵区分效果仍然非常好。



(a)同极化比　(b)同极化比起伏　(c)同极化通道起伏　(d)交叉极化通道起伏　(e)起伏比

图 4　5 个极化特征用于识别的可区分性分析

Fig. 4 Distinguishable ability of the five polarization characteristics

为区分有源诱饵和建筑物,首先录取1000次建筑物双极化回波数据,并依据本文方法计算出建筑物极化特征的均值和方差作为识别判决的标准值。表3是录取4种目标各100次回波数据,对5种极化特征根据自适应恒虚警阈值的方法进行目标识别的成功率,其中设虚警率$P_f=0.05$。可以看到前面4种单一极化特征用于识别的识别率可达到95%以上,最后一种特征受到垂直极化诱饵的干扰稍多一些,识别率为88%。

表3 识别率表

Table 3 The table of recognition rate

极化特征	识别率/(%)
同极化比	98
同极化比起伏	97
同极化通道起伏	97
交叉通道起伏	95
起伏比	88

5.5 试验结果

通过上述试验数据的分析可以看出,建筑物与有源诱饵的双极化回波在极化域和起伏域差异明显,提取的极化特征有相对稳定的辨识效果,可对建筑物和有源诱饵进行有效区分,识别效果良好。建筑物和飞机、舰船等典型雷达目标有类似的极化特性,所以本文所用极化特征、识别方法和试验结果也能推广到其他典型雷达目标。

6 结束语

本文通过对典型雷达目标和有源诱饵极化特性的分析,提取极化特征信息,并组建双极化体制测量雷达系统采集建筑物和有源诱饵的回波数据,验证了双极化技术对有源诱饵识别的有效性。本文所用的识别方法只是单一极化特征的识别方法,在实战场景中雷达回波会受到各种杂波干扰的影响,因此识别率会有所下降,但双极化识别方法仍有很高的工程应用价值,在后续工作中有必要研究多种极化特征的融合识别算法,进一步提高极化识别率。

参考文献:

[1] 张玉玺,王晓丹,杨旭,等.基于H/A/α分解的全极化HRRP目标识别方法[J].系统工程与电子技术,2013,35(12):2501-2506.
ZHANG Yuxi, WANG Xiaodan, YANG Xu, et al. Target recognition of fully polarimetric HRRP based on H/A/α decomposition[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013,35(12):2501-2506.(in Chinese)

[2] 李永祯,肖顺平,王雪松,等.雷达极化抗干扰技术[M].北京:国防工业出版社,2010.
LI Yongzhen, XIAO Shunping, WANG Xuesong, et al. Radar polarization anti-jamming technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.(in Chinese)

[3] 李永祯,王雪松,王涛,等.有源诱饵的极化鉴别研究[J].国防科技大学学报,2004,26(3):83-88.
LI Yongzhen, WANG Xuesong, WANG Tao, et al. Polarization discrimination algorithm of active decoy and radar target[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2004, 26(3):83-88.(in Chinese)

[4] 丁维雷.基于全极化雷达的目标识别方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.
DING Weilei. The research on target recognition methods based on polarization radar[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.(in Chinese)

[5] 张玉玺,王晓丹,姚旭,等.一种融合多极化特征的雷达目标识别方法[J].计算机科学,2012,39(9):208-212.
ZHANG Yuxi, WANG Xiaodan, YAO Xu, et al. Approach of radar target recognition based on multiple polarization features fusion[J]. Computer Science, 2012, 39(9):208-212.(in Chinese)

[6] Tait P.雷达目标识别导论[M].罗军,曾浩,李庶中,等,译.北京:电子工业出版社,2013:191-199.
Tait P. Introduction to radar target recognition[M]. Translated by LUO Jun, ZENG Hao, LI Shuzhong, et al. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013: 191-199.(in Chinese)

[7] Shao Xianhe, Du Hai, Xue Jinghong. Theoretical analysis of polarization recognition between chaff and ship [C]//Proceedings of 2007 IEEE International workshop on Anti - Counterfeiting, Security and Identification. Xiamen: IEEE, 2007: 125-129.

[8] Tang Guangfu, Zhao Ke, Zhao Hongzhou, et al. A novel discrimination method of ship and chaff based on sparseness for naval radar[C]//Proceedings of 2008 IEEE Radar Conference. Rome, Italy: IEEE, 2008: 1-4.

[9] 刘勇,李永祯,王雪松,等.基于极化分集接收的HRRP欺骗干扰鉴别[J].系统工程与电子技术,2011,33(6):1247-1255.
LIU Yong, LI Yongzhen, WANG Xuesong, et al. Discrimination of HRRP deception jamming based onpolarization diversity receiving[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(6): 1247-1255.(in Chinese)

作者简介:

张 强(1986—),男,四川邻水人,2012年于中国科学院获博士学位,现为工程师,主要研究方向为图像处理、目标识别和雷达系统设计。

ZHANG Qiang was born in Linshui, Sichuan Province, in 1986. He received the Ph. D. degree from Chinese Academy of Science in 2012. He is now an engineer. His research interests include image processing, target recognition and radar system design.

Email: zhangqiang_ioe@126.com