

干扰背景下瞬时极化测量雷达的目标识别预处理技术

王涛 王雪松 刘进 肖顺平
(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘要: 该文以瞬时极化测量雷达的攻防对抗为背景,分析了单极化有源干扰机形成的假目标的极化散射特性。分析结果表明,在同样的干扰样式下,干扰机在分时极化测量雷达和瞬时极化测量雷达下生成的假目标具有不同的散射特性。在单极化有源假目标极化散射特性分析基础上,针对对抗条件下极化雷达无法准确测量目标散射矩阵的情况,提出了一种基于不完整极化测量的目标识别预处理方法。该方法能够有效获取目标三个极化散射矩阵序列,它们可以用作目标识别的稳健特征量。

关键词: 目标识别; 瞬时极化测量雷达; 雷达目标; 有源干扰

中图分类号: TN95

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2333-05

Preprocessing of Target Recognition of the Instantaneous Polarimetric Radar in the Jamming Situation

Wang Tao Wang Xue-song Liu Jin Xiao Shun-ping

(School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The polarization scattering matrix characteristic of the active decoys produced by the single polarized repeater is analysed under the background of the anti-jamming of the instantaneous polarimetric radar. It is shown that the characteristics of active decoys measured by the interleaved-pulse polarization agile radar and the instantaneous polarimetric radar are different, though the active decoys is produced by the same jamming mode. Further more, considering the scattering matrix may not be able to be measured accurately in the jamming situation, a preprocessing method in target reorganization based on the inadequate polarization characteristics is produced, employing which the three series of scattering matrix of target can be obtained which can be used as the robust features in target recognition.

Key words: Target recognition; Instantaneous polarimetric radar; Radar target; Active jamming

1 引言

在现代电子战中,有源干扰日益成为进攻方突防防御雷达的重要手段^[1,2]。随着数字射频存储技术^[3]的发展,有源干扰系统能够产生几十至上百个与目标信号高度相似的假目标,使得雷达很难利用时域和频域特性进行真假目标鉴别,产生混批、饱和甚至不能正常工作的现象。通过连续发射与目标相似的信号,有源干扰机甚至能够形成逼真的二维假目标图像^[4,5]。文献[6]认为无需复杂的技术手段,即可产生逼真的雷达回波信号以达到欺骗效果,挫败导弹防御雷达的识别系统。可以说有源干扰技术的进步给雷达系统的生存带来了严重的威胁。

极化是电磁波的固有属性,利用有源假目标和雷达目标在极化特征上的差异,极化测量雷达可以实现有源假目标和目标的鉴别。文献[7]的研究结果表明,分时极化测量雷达可以有效鉴别固定转发的单极化有源假目标。但是当有源干扰为随机幅相调制时或者干扰信号为极化调制信号时,现有的

极化鉴别方法将很难鉴别有源假目标。本文面向瞬时极化测量雷达,研究了单极化有源假目标的极化散射特性,在此基础上,针对有源干扰条件下防空、反导雷达无法有效测量雷达目标的极化散射特性的情况,提出了一种基于不完整极化信息的目标识别预处理方法,该方法能够有效获取目标三个极化散射矩阵序列,它们可以用作目标识别的稳健特征量。

2 瞬时极化测量雷达的基本原理^[8-10]

设雷达互为正交的天线极化分别为 \mathbf{h} 和 \mathbf{v} , 其发射信号在 \mathbf{h} , \mathbf{v} 极化基下可以表示为

$$\mathbf{E}_T(t) = e_h(t)\mathbf{h} + e_v(t)\mathbf{v} \quad (1)$$

其中 $e_h(t)$ 和 $e_v(t)$ 分别为时间宽度为 τ 的标量信号, 且有: $\left| \int_{-\infty}^{\infty} e_v(t)e_h^*(t)dt \right| \ll 1$, $\int_{-\infty}^{\infty} |e_h(t)|^2 dt = 1$, $\int_{-\infty}^{\infty} |e_v(t)|^2 dt = 1$ 。设目标的散射矩阵为 $\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{hh} & s_{vh} \\ s_{hv} & s_{vv} \end{bmatrix}$, 则目标的散射回波为

$$\mathbf{E}_S(t) = \mathbf{S}\mathbf{E}_T(t) = \begin{bmatrix} s_{hh} & s_{vh} \\ s_{hv} & s_{vv} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_h(t) \\ e_v(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{hh}e_h(t) + s_{vh}e_v(t) \\ s_{hv}e_h(t) + s_{vv}e_v(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

雷达分别对 \mathbf{h} 极化回波和 \mathbf{v} 极化回波关于 $e_h(t)$ 和 $e_v(t)$ 匹配接收, 则有

$$\int_{-\infty}^{\infty} (s_{hh}e_h(t) + s_{vh}e_v(t))e_h^*(t)dt \approx s_{hh} \quad (3)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} (s_{hh}e_h(t) + s_{vh}e_v(t))e_v^*(t)dt \approx s_{vh} \quad (4)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} (s_{hv}e_h(t) + s_{vv}e_v(t))e_h^*(t)dt \approx s_{hv} \quad (5)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} (s_{hv}e_h(t) + s_{vv}e_v(t))e_v^*(t)dt \approx s_{vv} \quad (6)$$

经过上述处理瞬时极化测量雷达可以利用目标的一次回波测量出目标的全极化散射矩阵。

3 有源假目标在瞬时极化测量雷达下的极化特性

在后向散射对准约定条件下, 目标的后向散射矩阵为对称矩阵。本文在分析假目标的散射矩阵时, 采用后向对准约定。图1给出了极化雷达与单极化干扰机的极化关系, 雷达同时在 \mathbf{h} 和 \mathbf{v} 极化天线发射互不相关的侦察的信号, 如式(1)所示。设干扰机天线极化为 \mathbf{m} , 在干扰机处设置辅助极化基 $\mathbf{h}' = \mathbf{h}$ 和 $\mathbf{v}' = -\mathbf{v}$ 。在极化基 \mathbf{h}' 和 \mathbf{v}' 下, 干扰机的极化 \mathbf{m} 可以表示为

$$\mathbf{m} = \begin{bmatrix} a\mathbf{h}' \\ b\mathbf{v}' \end{bmatrix} \quad (7)$$

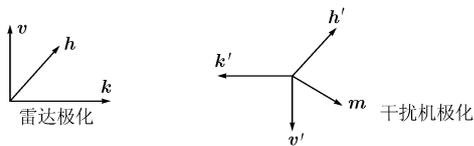


图1 雷达天线极化与干扰机极化

其中 a 和 b 为复常数, 而且满足 $|a|^2 + |b|^2 = 1$ 。在极化基 \mathbf{h}' 和 \mathbf{v}' 下, 干扰机处的入射信号可以表示为

$$\mathbf{E}'_T(t) = \begin{bmatrix} e_h(t)\mathbf{h}' \\ -e_v(t)\mathbf{v}' \end{bmatrix} \quad (8)$$

此时干扰机侦察到的雷达信号为

$$V(t) = \mathbf{m}^T \mathbf{E}'_T(t) = \begin{bmatrix} a\mathbf{h}' \\ b\mathbf{v}' \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e_h(t)\mathbf{h}' \\ -e_v(t)\mathbf{v}' \end{bmatrix} = ae_h(t) - be_v(t) \quad (9)$$

干扰机对侦察到的雷达信号进行幅度相位调制后实施干扰, 即干扰机发射信号为

$$\mathbf{E}_J(i, t) = c(i)(ae_h(t - t_J) - be_v(t - t_J)) \begin{bmatrix} a\mathbf{h}' \\ b\mathbf{v}' \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中 $c(i)$ 为复调制函数, t_J 为转发时延, i 为假目标距离分辨单元的序号。由式(10)可得, 干扰信号在后向对准约定下可以表示为

$$\mathbf{E}_J(i, t) = c(i)(ae_h(t - t_J) - be_v(t - t_J)) \begin{bmatrix} a\mathbf{h} \\ -b\mathbf{v} \end{bmatrix} \quad (11)$$

此时雷达 \mathbf{h} , \mathbf{v} 极化天线侦察到的干扰信号分别为

$$E_J^h(i, t) = c(i)a^2e_h(t - t_J) - c(i)abe_v(t - t_J) \quad (12)$$

$$E_J^v(i, t) = -c(i)abe_h(t - t_J) + c(i)b^2e_v(t - t_J) \quad (13)$$

将式(12)和式(13)经过式(3)~式(6)的处理后, 雷达可以得到干扰机形成的假目标的宽带极化散射矩阵, 第 i 个假目标的散射矩阵(或假目标第 i 个距离分辨单元的宽带极化散射矩阵)为

$$\mathbf{S}^J(i) = \begin{bmatrix} \hat{s}_{hh}^J(i) & \hat{s}_{vh}^J(i) \\ \hat{s}_{hv}^J(i) & \hat{s}_{vv}^J(i) \end{bmatrix} = c(i) \begin{bmatrix} a^2 & -ab \\ -ab & b^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由式(14)可见, 单极化有源干扰机在瞬时极化测量雷达下生成的假目标的散射矩阵是奇异的、互易的。由于雷达目标的散射矩阵一般是非奇异的^[7], 因此可以利用真假目标散射矩阵奇异性上的差异来鉴别。下文重点讨论真假目标位于相同的距离距离分辨单元上时的预处理方法, 当真假目标位于不同的距离分辨单元时的鉴别问题请查阅参考文献[11], 本文不再赘述。

4 基于不完整极化的目标识别预处理方法

当真假目标位于相同的方位、俯仰和距离时, 极化雷达无法准确获取真假目标的散射矩阵。此时基于模板匹配的识别技术将失去其赖以应用的物理背景, 因而将无法有效鉴别有源假目标和目标。图2给出了一种典型的有源干扰和极化雷达攻防对抗场景。

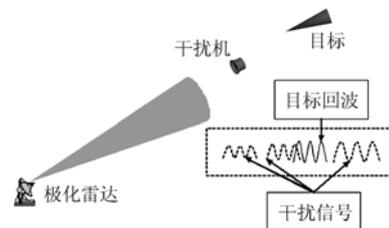


图2 干扰机和极化雷达的攻防对抗场景

4.1 干扰背景下雷达目标的一维距离像

为了直观地说明干扰背景下的目标回波特性, 本节对图2所示的攻防对抗场景进行仿真分析。设雷达在 \mathbf{h} 和 \mathbf{v} 极化天线同时发射带宽为 2GHz、斜率相反的阶跃跳频信号, 干扰机位于目标前方并以左旋圆极化转发雷达信号。干扰机对侦察到雷达信号进行“延迟-幅相调制-相加”处理后实施干扰。目标为某有翼弹头模型, 目标散射数据为暗室实测数据, 具体测量参数如表1所示。图3(a), 图3(c)给出了弹头在俯仰 30° 、横滚 15° 时的一维距离像, 图中横坐标包含 101 个距离分辨单元, 对应的视景长度为 7.5m。图3(b), 图3(d)给出了存在有源干扰时雷达得到的一维距离像特征, 其中有源干扰的复调制系数 $|c(i)|$ 服从瑞利分布, 其均值为目标各个距离分辨单元中的最大幅度, $\arg(c(i))$ 服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布。从图3(b)和图3(d)中可以看出, 在目标所在的距离分辨单元上, 雷达测得的一维距离像严重偏离目标的一维像特

表 1 某有翼弹头模型的测量参数

目标	频率范围(GHz)	频率步长(MHz)	极化状态	横滚角(°)	俯仰角(°)	方位范围(°)	方位步长(°)
有翼弹头	8.75~10.75	20	HH, HV, VH, VV	0, 15, 30	0	0~180	0.2

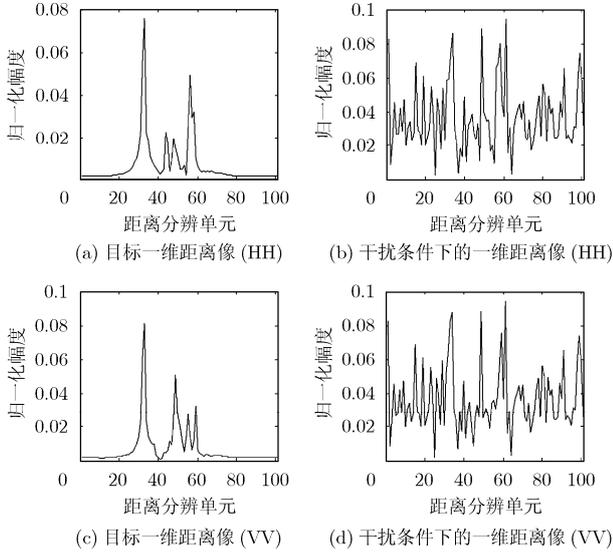


图 3 目标模板和干扰条件下雷达得到的一维距离像

征, 此时核函数类分类器^[12]、基于混合高斯模型分类方法^[13]和基于电磁逆散射^[14]的识别方法都无法有效识别目标。为了利用雷达目标的高分辨成像特征进行识别, 需要将目标和假目标的距离像分离出来。

4.2 基于不完整极化的目标识别预处理方法

为了有效的压制防御雷达, 有源干扰信号形成的假目标所覆盖的空间尺度通常远大于目标的空间分布尺度。为了实现目标识别, 需要首先判断目标和干扰信号的空间分布关系。从式(14)可以看出, 在没有目标信号的距离分辨单元上, 雷达接收到的极化散射矩阵序列是奇异的。利用该性质可以首先将干扰信号在雷达视线方向上分辨出来。然后利用目标与假目标信号之和的非奇异性, 即可以分辨出目标所处的位置。由极化基变换理论^[15]和矩阵理论^[16]可知, 对于缺秩的二维矩阵——单极化有源假目标的矩阵, 可以经过酉相合变换化简为仅有一个元素不为零的矩阵。对含有目标回波和干扰信号的距离分辨单元进行同样的酉变换, 即可将有源假目标的回波全部转化到散射矩阵的一个角上, 此时雷达得到的散射矩阵的其它 3 个元素仅为经过酉变换后目标的散射矩阵, 将这 3 个元素与目标模板进行匹配, 即可实现不完整极化条件下的目标识别, 基于不完整极化的目标识别流程如图 4 所示。

4.2.1 过渡矩阵 U 的获取方法 根据矩阵变换理论可知, 任意一个复对称矩阵可以通过一个酉相合变换而对角化^[15]。令有源假目标的第 i 个距离分辨单元的宽带极化散射矩阵(如式(14)所示)的特征值为 λ_1 和 λ_2 , 且令 $|\lambda_1| \geq |\lambda_2|$, 则有

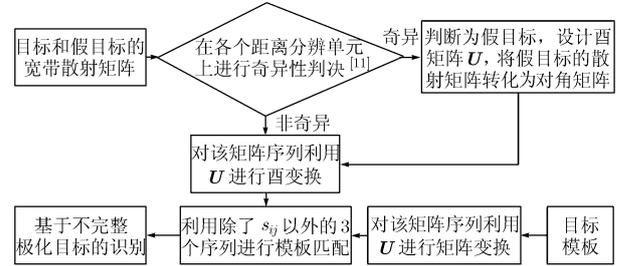


图 4 基于不完整极化信息的目标识别流程

$$|S^J(i) - \lambda E| = \begin{vmatrix} c(i)a^2 - \lambda & -c(i)ab \\ -c(i)ab & c(i)b^2 - \lambda \end{vmatrix} = 0 \quad (15)$$

解式(15)可得

$$\begin{cases} \lambda_1 = c(i)(a^2 + b^2) \\ \lambda_2 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

令特征值 λ_1 和 λ_2 对应的单位特征向量分别为 $U_1 = [u_{11}, u_{12}]^T$ 和 $U_2 = [u_{21}, u_{22}]^T$, 则有

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_{hh}^J(i) & \hat{s}_{vh}^J(i) \\ \hat{s}_{hv}^J(i) & \hat{s}_{vv}^J(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} = c(i)(a^2 + b^2) \begin{bmatrix} u_{11}^* \\ u_{12}^* \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{s}_{hh}^J(i) & \hat{s}_{vh}^J(i) \\ \hat{s}_{hv}^J(i) & \hat{s}_{vv}^J(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{22} \end{bmatrix} = \lambda_2 \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{22} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{1 \times 2} \quad (18)$$

由于 U_1 和 U_2 是单位向量且互相正交, 当 $a \neq 0$ 时, 解式(17)和式(18)可得

$$U_1 = \begin{bmatrix} u_{11} \\ u_{12} \end{bmatrix} = \frac{c(i)e^{j\theta}}{|c(i)|} \begin{bmatrix} a^* \\ -b^* \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$U_2 = \begin{bmatrix} u_{21} \\ u_{22} \end{bmatrix} = \frac{c(i)e^{j\theta}}{|c(i)|} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中 θ 为酉相合对角化过程中所用的酉列矢量绝对相位。由文献[15]可知, 散射矩阵酉相合对角化过程与所用酉矩阵列的绝对相位无关, 为此令 $\theta = 0$, 则由式(19), 式(20)将酉矩阵 U 化简为

$$U = [U_1 \quad U_2] = e^{j \text{Arg } c(i)} \begin{bmatrix} a^* & b \\ -b^* & a \end{bmatrix} \quad (21)$$

则第 i 个距离分辨单元的散射矩阵经过酉相合变换并进行化简可得

$$S^{J'}(i) = U^T S^J(i) U = e^{j2 \text{Arg } c(i)} \begin{bmatrix} c(i) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

4.2.2 目标和假目标散射矩阵的分离方法 在雷达视线上, 设第 k 个距离分辨单元中既有目标信号又有假目标信号, 并设目标和假目标的极化散射矩阵 $S_i(k)$ 和 $S^J(k)$ 分别为

$$\mathbf{S}_t(k) = \begin{bmatrix} s_{hh}(k) & s_{vh}(k) \\ s_{hv}(k) & s_{vv}(k) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\mathbf{S}^J(k) = \begin{bmatrix} \hat{s}_{vh}^J(k) & \hat{s}_{vh}^J(k) \\ \hat{s}_{hv}^J(k) & \hat{s}_{vv}^J(k) \end{bmatrix} = c(k) \begin{bmatrix} a^2 & -ab \\ -ab & b^2 \end{bmatrix} \quad (24)$$

对第 k 个距离分辨单元中宽带极化散射矩阵进行式(22)所示

$$\mathbf{S}'_t(k) = \begin{bmatrix} (a^*)^2 s_{hh}(k) - 2a^* b^* s_{vh}(k) + (b^*)^2 s_{vv}(k) & a^* b s_{hh}(k) + (|a|^2 - |b|^2) s_{vh}(k) - ab^* s_{vv}(k) \\ a^* b s_{hh}(k) + (|a|^2 - |b|^2) s_{vh}(k) - ab^* s_{vv}(k) & b^2 s_{hh}(k) + 2ab s_{vh}(k) + a^2 s_{vv}(k) \end{bmatrix}$$

由式(25)可以看出, 经过酉相合变换之后, 假目标的第 k 个距离分辨单元的散射矩阵只有左上角不为零, 而其它 3 个元素是目标宽带极化散射矩阵的线性组合。

4.2.3 酉相合变换后目标一维距离像和干扰条件下雷达目标的一维距离像 图 5(a), 图 5(c)和图 5(e)给出了目标模板经过酉相合矩阵变换后的一维距离像特性, 图 5(b), 图 5(d)和图 5(f)给出了存在干扰时雷达得到的一维距离像特性。从图 5(a), 图 5(b)可以看出, 经过酉相合变换后得到的 XX 极化基下的一维距离像包含了干扰信号的回波, 同没有经过酉相合矩阵变化前一样, 它严重偏离雷达的真实目标的一维距离像(如图 5(a)所示); 从图 5(d), 图 5(f)可以看出, 经过酉相合矩阵变换后雷达测得的一维距离像特征与目标模板的一维距离像特征吻合的很好。这两个特征量可以作为雷达目标的识别参量。将目标模板中的一维距离像和的目标宽带极化散射矩阵进行相似的酉相合变换之后, 即可与经过酉相合变换后的雷达接收信号进行匹配识别。

4 结束语

当单极化有源假目标和雷达目标位于相同的距离分辨单元上时, 它们的回波信号互相干扰, 瞬时极化测量雷达无法有效测量目标的散射矩阵, 此时利用传统的模板匹配方法将无法实现雷达目标识别。本文根据单极化有源假目标散射矩阵奇异的特点, 首先判断出没有目标回波信号的距离分辨单元, 然后设计了过渡矩阵, 假目标散射矩阵经过该过渡矩阵变换后, 其散射矩阵被转化为一个左上角矩阵或右下角矩阵。将同一波位、不同距离上的假目标和目标回波信号经过相同的酉相合变换后, 得到一个新的散射矩阵序列。在这个散射矩阵序列中, 假目标回波信号仅仅包含在一个角上, 在其它 3 个角上, 散射矩阵值为雷达目标散射矩阵的线性组合。利用不含假目标分量的 3 个序列与模板(模板需要进行相同的酉相合变换)进行匹配即可实现不完整极化的目标识别。对于二维成像雷达来讲, 随机干扰会降低脉冲间目标回波的相似度, 使其无法进行距离补偿和初相校正, 进而无法获得准确的目标二维像。利用本文提出的方法, 将目标回波(含有干扰信号)逐距离分辨单元进行酉相合变换后, 可以在 3 个极化通道上消除有源干扰的影响, 此时可以实现距离补偿和初相校正, 并获得目标的二维像。

的酉相合变换并经过化简可得

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{xy}(k) &= \mathbf{U}^T (\mathbf{S}^J(k) + \mathbf{S}_t(k)) \mathbf{U} \\ &= e^{j2 \text{Arg } c(k)} \begin{bmatrix} c(k) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \mathbf{S}'_t(k) = \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{yx} \\ s_{xy} & s_{yy} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (25)$$

其中 $\mathbf{S}'_t(k)$ 为目标信号经过酉相合变换后的矩阵, 且有

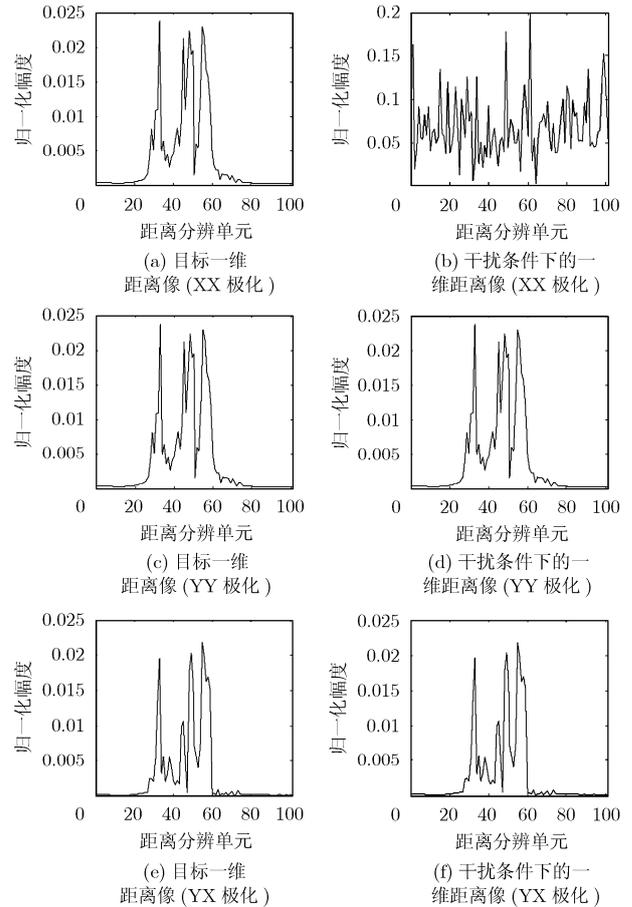


图5 目标模板库和干扰条件下酉相合变换后的一维距离像

参考文献

- [1] Lewis G N, et al. Future challenges to ballistic missile defense. *IEEE spectrum*, 1997, (9): 60-68.
- [2] Okuyucu A. Effects of Jamming on radars. [Master's Thesis], USA: Air Force Institute of Technology Air University, March, 2000.
- [3] Soumekh M. SAR-ECCM using phase-perturbed LFM chirp signals and DRFM repeat jammer penalization. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 191-205.
- [4] Pace P E, Fouts D J, and Ekestrm S, et al. Digital false-target image synthesizer for countering ISAR. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 2002, 149(5): 248-257.
- [5] Fernando A L D. Performance analysis of digital image

- synthesizer as a counter-measure against inverse synthetic radar. [Master's dissertation], Naval Postgraduate School, Monterey CA, 2002.
- [6] William R. Chadwick. Augmentation of high altitude maneuver performance of a tail controlled missile using lateral thrust. ADA328973, Dahlgren, VA. 1997.
- [7] 庄钊文, 李永祯, 肖顺平等. 瞬态极化的统计特性分析及处理. 北京: 国防工业出版社, 2005: 234-311.
Zhuang Zhao-wen, Li Yong-zhen, and Xiao Shun-ping, *et al.* Statistical Characteristics and Processing of Instantaneous Polarization. Beijing: Press of National Defense Industry, 2005: 234-311.
- [8] Giulio D. Polarization diversity in radars. *Proc. IEEE*, 1986, 74 (2): 245-269.
- [9] 王雪松, 王剑, 王涛等. 雷达目标极化散射矩阵的瞬时测量方法. 电子学报, 2006, 36(6): 1020-1025.
Wang Xue-song, Wang Jian, and Wang Tao, *et al.* Instantaneous measurement of radar target polarization scattering matrix. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 36(6): 1020-1025.
- [10] Howard S D. *et al.* A simple signal processing architecture for instantaneous radar polarimetry. *IEEE Trans. on Information Theory*, 2007, 53(4): 1282-1289.
- [11] 王涛, 王雪松, 肖顺平. 随机调制单极化有源假目标的极化鉴别研究. 自然科学进展, 2006, 16(5): 611-617.
Wang Tao, Wang Xue-song, and Xiao Shun-ping. Discrimination of single polarized active decoys random modulated. *Progress in Natural Science*, 2006, 16(5): 611-617.
- [12] Zhao Q and Principe J C. Support vector machines for SAR automatic target recognition. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2001, 37(2): 643-654.
- [13] Bilik I, Tabrikian J, and Cohen A. GMM-Based target classification for ground surveillance doppler radar. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(1): 267-278.
- [14] Colton D and Monk P B. Target identification of coated objects. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 2006, 54(4): 1232-1242.
- [15] 庄钊文, 肖顺平, 王雪松. 雷达极化信息处理及应用. 北京: 国防工业出版社, 1999: 142-150.
Zhuang Zhao-wen, Xiao Shun-ping, and Wang Xue-song. Radar Polarization Information Processing and Application. Beijing: Press of National Defense Industry, 1999: 142-150.
- [16] 陈景良, 陈向晖. 特殊矩阵, 北京: 清华大学出版社, 2001: 136-144.
Chen Jing-liang and Chen Xiang-hui. Special Matrix. Beijing: Tsinghua University Press, 2001: 136-144.
- 王 涛: 男, 1976 年生, 博士, 讲师, 研究方向为雷达目标识别、极化信息处理等.
- 王雪松: 男, 1972 年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达系统理论.
- 刘 进: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为雷达目标识别技术等.
- 肖顺平: 男, 1964 年生, 博士, 教授, 研究方向为雷达系统理论.