

# 利用回波重构的地雷稀疏时频表示及鉴别

王玉明 施云飞 宋千 黄晓涛 梁福来  
(国防科学技术大学 电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 浅埋目标探测是低频超宽带合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)的一个重要应用。地雷作为浅埋目标的一类, 由于其回波微弱, 且所处环境复杂, 使得检测后图像中常常存在大量虚假目标。提取有效特征用于鉴别是降低虚警的关键所在, 传统基于全孔径图像距离剖面进行时频表示的算法易受噪声影响, 并且难以表示目标散射特性。本文提出一种基于重构回波稀疏时频表示提取特征及鉴别的方法。该方法基于感兴趣区域(Regions of Interest, ROI)重构目标各个方位角的回波, 可以有效减少原来回波域相邻杂波影响, 提取目标较为准确的散射特性。本文方法同时采用引入判决分量的稀疏时频表示, 改善了特征提取的准确度并简化了鉴别流程。实测数据处理结果表明了本文所提方法在杂波抑制和目标鉴别方面的有效性。

**关键词:** 地雷探测; 特征提取; 目标鉴别; 回波重构; 稀疏时频表示

**中图分类号:** TN95    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1003-0530(2014)01-0014-08

## Landmine Sparse Time-Frequency Representation and Discrimination via Echo Reconstruction

WANG Yu-ming SHI Yun-fei SONG Qian HUANG Xiao-tao LIANG Fu-lai  
(College of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan, P. R. China, 410073)

**Abstract:** The detection of subsurface target is an important application of low-frequency synthetic aperture radar (SAR). Landmines, as a typical kind of subsurface targets, are difficult to detect due to the weak echoes and the complexity of environments. Feature extraction is key to effective false alarm suppression, thus to successful landmine detection. A novel method to extract the scattering characteristics of targets is proposed to avoid the robustness and sensitivity issues of traditional approaches, based on the echoes reconstructed from regions of interest (ROI). Then, feature extraction and target discrimination are performed simultaneously based on the sparse time-frequency representation integrated with discriminative criteria, which can improve the accuracy of feature selection and simplify the algorithm flow. The results of the real experimental data demonstrate the feasibility and effectiveness of the proposed method.

**Key words:** landmine detection; feature extraction; target discrimination; echo reconstruction; sparse time-frequency representation

## 1 引言

低频超宽带地表穿透 SAR (Ground Penetrate SAR, GPSAR) 能够穿透地表对浅埋目标进行高分辨成像, 并具有全天时、全天候工作的能力, 是当前

地雷探测技术发展的重要方向<sup>[1-3]</sup>。由于低频超宽带 GPSAR 成像区域大, 且地雷浅埋于地表, 目标回波响应弱、易受埋设方式、土壤、地貌等环境因素的影响, 因此地雷检测图像中常存在大量虚假目标, 需要通过鉴别进一步去除。

收稿日期: 2013-04-08; 修回日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(61271441, 61201329); 全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201046); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0895); 国防科技大学科研计划项目(CJ12-04-02)

在鉴别过程中,地雷特征的提取至关重要,一般基于预筛选后的 ROI 进行处理。杨延光等<sup>[4]</sup>利用地雷 ROI 提取了 22 个局部统计和几何特征,并将鉴别能力较强的单个特征鉴别结果进行加权融合判决,获得较好的鉴别性能。一般情况下,特征提取算法只关注时域或频域特征某一方面,金添等<sup>[5]</sup>针对 Rail-GPSAR 实测数据,结合其系统成像模型提出了一种浅地地表地雷目标二维电磁散射特征的计算方法,实验结果表明浅地表金属地雷具有双峰特征。孙晓坤等<sup>[6]</sup>通过研究频域地雷散射曲线得到:由于电磁波谐振,地雷散射在频域上也存在由凹点引起双峰特征。

时频图像包括时频域内所有特征,有更丰富的特征信息。文献[7]和[8]利用地雷一维距离剖线的时频变换图像进行鉴别,在目标信杂比较强时取得较好的鉴别效果。但是由于地雷回波一般较弱,而一维距离剖线的选择又对能否稳健描述地雷十分关键,因此,这种方法易受到噪声的影响,选取的一维距离剖线常常偏离地雷中心,进而使得地雷特征描述不稳定,需要进一步研究稳健的特征提取方法。

随着基于超完备字典的信号和图像稀疏分解在近几年里的广泛研究<sup>[9-11]</sup>,基于时频原子字典的稀疏表示也得到发展<sup>[12-13]</sup>。与传统时频表示中的基函数不同,采用时频原子的超完备字典,能够更加精确的对目标时频特征进行表征。同时,在对回波使用时频原子稀疏时,引入判别分量,优化鉴别器和时频原子选择,简化鉴别算法流程,保证较好的鉴别性能。文献[14]提出一种基于时频原子分解的地雷目标特征提取及分类方法,但其处理对象依然为一维距离剖线,易受噪声的影响。

本文提出一种基于回波重构的地雷稀疏时频表示及鉴别方法。在文章第二部分,首先给出目标成像模型,然后在此基础上分析传统时频表示将目标一维距离剖线近似为其一维散射的不足,进而介绍基于 ROI 图像的目标回波重构。而文章第三部分在给出线性时频变换公式的基础上,分析重构回波的稀疏时频表示,并研究时频原子及其在地雷稀疏时的搜索过程。文章第四部分针对实测数据进行处理,验证本文方法的有效性。

## 2 基于 ROI 的目标回波重构

### 2.1 成像模型

在实测数据中,SAR 采用正侧视条带二维成像

方式。在这种工作模式下,雷达运动方向与其天线波束指向垂直。在实际系统中,为了保证图像方位分辨率不随距离变化,常采用具有固定积累角的后向投影算法,简称为固定积累角 BP (Constant Integration Angle BP, CIABP) 算法。

令  $\Phi$  为积累角,而  $r, x$  分别表示斜距、方位位置,它们确定的  $r-x$  成像平面称为斜距平面。设图像  $f(r, x)$  由固定积累角  $\Phi$  中所有回波通过 CIABP 算法合成得到,  $(r, x)$  对应目标在图像中的坐标。当目标相对于雷达天线的入射方位角为  $\theta$  时,其回波可认为是雷达在  $f-\theta$  域对目标的散射特性进行的测量,表示为  $s(f, \theta)$ 。与之相应,成像算法可以看成  $f-\theta$  域到  $r-x$  域的映射。 $s(f, \theta)$  在时域  $t-u$  又可以表示为  $s(t, u)$ ,  $t$  为快时间,而  $u$  为慢时间(方位孔径位置)。成像可表示为

$$f(r, x) = \iint t^2 s(t, u) \delta(t - \frac{2}{c} R(r, x, u)) dt du \quad (1)$$

其中  $R(r, x, u)$  为目标到天线的距离,  $c$  为光速。

### 2.2 目标 ROI 距离剖线的时频表示

传统时频表示基于 ROI 切片的一维距离剖面提取特征<sup>[7,8,14,15]</sup>,包括距离剖面选择和时频变换方式选择两个方面的内容。一方面,传统算法一般采用过目标中心的一维距离剖面。为降低噪声影响,联合多个距离剖面进行主分量分析方法也在部分文献中被采用<sup>[15]</sup>。另一方面,时频变换有线性和非线性两类,小波变换 (Wavelet Transformation, WT) 和 Choi-Williams 分布 (Choi-Williams Distribution, CWD) 分别是其中最常见算法之一,在传统时频表示中也最常用。

目标的多维散射特性与目标回波密切相关<sup>[5]</sup>,令  $\theta = \arctan \frac{t}{u}$ ,则目标多维散射函数  $A(r, x, f, \theta)$  估计值为

$$\hat{A}(r, x, f, \theta) \approx S(t, f, u) \quad (2)$$

$S(t, f, u)$  是经过位置搬移和辐射校正的  $s(t, u)$  时频变换,即  $t^2 s(t, u) \delta(t - \frac{2}{c} R(r, x, u))$  的时频变换。当目标 ROI 一维距离剖面选取经过目标中心时,可以近似认为目标处于合成其图像的全孔径中心,即  $x=0$ ,表示为  $f(r, x=0)$ ,其时频表示为  $F(r, x=0, f)$ 。设  $S(t, f, u)$  变换方式与得到  $F(r, x=0, f)$  的变换方

式相同。由式(1)和式(2)可以看出,当时频变换满足线性特性时,如小波变换,则  $F(r, x=0, f)$  为目标多维散射函数在全孔径中的累加

$$F(r, x=0, f) = \int_{\theta \in \Phi} A(r, x, f, \theta) d\theta \quad (3)$$

而当时频变换不具有线性特性时,  $F(r, x=0, f)$  表达的含义更为复杂。基于 CWD 对  $f(r, x=0)$  变换可得

$$F(r, x=0, f) = \iiint f(r_2 + \frac{r_1}{2}) f^*(r_2 - \frac{r_1}{2}) \Psi(r_1, r_3) \times \exp[j2\pi r_3(r-r_2)] \exp(-j2\pi f r_1) dr_1 dr_2 dr_3 \quad (4)$$

其中  $\Psi(\cdot)$  为抑制交叉项的核函数

$$\Psi(r_1, r_3) = \exp[-\alpha(r_1 r_3)^2] \quad (5)$$

其中  $\alpha$ , 非负, 为距离向的平滑参数, 控制交叉项抑制程度。将式(1)代入(4)可得

$$F(r, x=0, f) = \iiint \left[ \iint t^2 s(t, u) \delta(t - \frac{2}{c} R(r_2 + \frac{r_1}{2}, x=0, u)) dt du \right] \cdot \left[ \iint t^2 s(t, u) \delta(t - \frac{2}{c} R(r_2 - \frac{r_1}{2}, x=0, u)) dt du \right]^* \cdot \Psi(r_1, r_3) \cdot \exp[j2\pi r_3(r-r_2)] \exp(-j2\pi f r_1) dr_1 dr_2 dr_3 \quad (6)$$

可以看出, 由于 CWD 时频变换具有非线性特性, 目

标  $F(r, x=0, f)$  表现为其反射回波经全孔径积累后的时频变换。

结合式(3)和式(6)知,  $F(r, x=0, f)$  与目标在全孔径中的散射密切相关, 不同距离剖线的时频变换不能表现目标方位散射变化规律。并且  $F(r, x=0, f)$  作为  $f(r, x)$  在  $x=0$  处距离剖线时频变换, 对  $x=0$  选取规则敏感。由于噪声的影响, 当  $x=0$  位置发生偏移时,  $F(r, x=0, f)$  所表示的孔径也会发生变化, 进而影响其对目标描述的准确性。这使得通过时频表示提取的多个样本特征存在差异, 降低鉴别性能。当联合多个距离剖面降噪时, 目标对应图像中孔径也存在不确定性, 影响特征描述目标的准确度, 减弱通过其去除杂波的效果。图 1 为某一地雷的 ROI 切片及其不同距离剖面对应的 CWD 分布。由 ROI 切片图像显然可见, 地雷时域图像存在双峰结构。并且, 从图 1 给出的不同距离剖线的 CWD 分布可以看出, 选择不同的距离剖面, 其时频变换结果差异较大。基于传统时频表示的目标特征提取算法对距离剖线的选择非常敏感, 易受噪声影响。而 ROI 中心一般通过灰度最大值、重心等方法形成, 很难做到完全精确, 因此使得选择的距离剖面难以正好在  $x=0$  处, 使得距离剖面无法准确反映目标散射特性, 其时频表示也存在较大偏差。

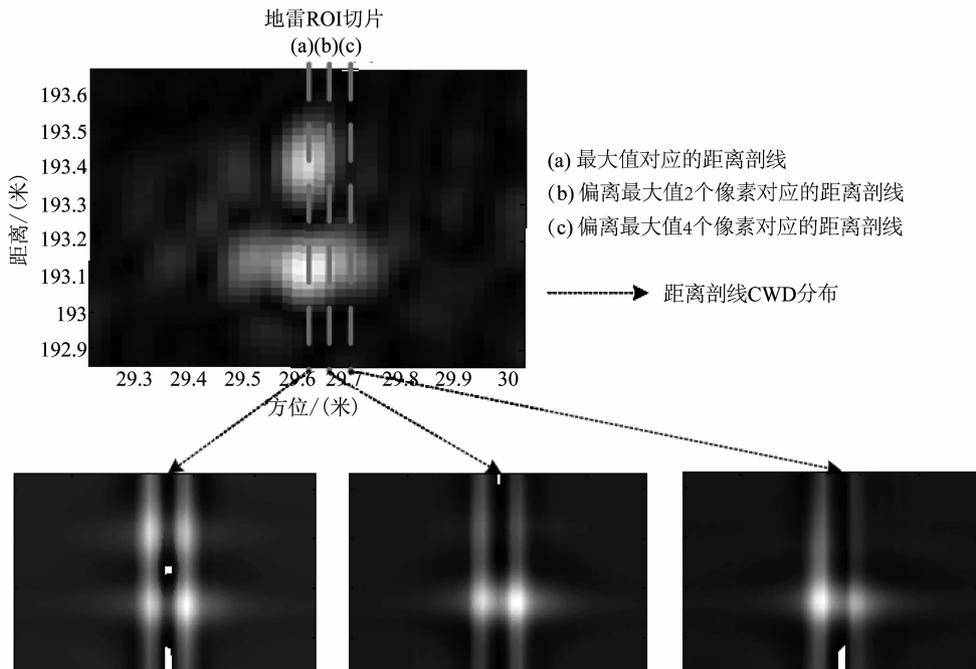


图 1 地雷 ROI 切片及其不同距离剖面对应的 CWD 分布

Fig. 1 The landmine ROI slice and different CWDs for different range lines

### 2.3 目标回波重构

对目标回波进行时频分析,可以获取准确的目标散射特性,并能够克服传统时频分析方法易受距离剖面选择准确程度影响的缺点。但是,目标受散射较强的地杂波影响,直接在一维距离像中提取其回波存在困难,需借助二维图像进行定位。因此,本文基于目标 ROI 图像重构其回波,获得目标在积累角内各个入射角的一维回波估计,即  $\hat{s}(t, \theta)$ , 然后对其进行时频分析,获得目标散射特性。在回波重构时,图像中非零区域只有目标 ROI 切片,可认为是对目标空域加窗,表现在波数域则是对目标进行滤波。这使得相邻杂波的影响减小,一定程度上改善了目标重构回波的信杂比,能提取更为精确的目标散射特性。

目标回波重构可以看作是一个成像的逆过程。对  $f(r, x)$  作二维傅里叶变换,可得其二维频域  $k_r-k_x$  (也称波数域) 图像  $\tilde{F}(k_r, k_x)$ , 其中  $k_r, k_x$  分别为斜距波数和方位波数。令  $k = 2\pi f/c$ 。根据 CIABP 成像原理,下式成立:

$$\begin{cases} k = \frac{1}{2}\sqrt{k_x^2 + k_r^2} \\ \theta = \arctan\left(-\frac{k_x}{k_r}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中  $\theta$  的取值范围为  $[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2})$ 。利用式(7)的关系式,可以将  $\tilde{F}(k_r, k_x)$  映射到  $f-\theta$  域中,形成目标在各个入射角下的频域响应。再对  $f-\theta$  域中某一固定方位角  $\theta_0$  的频率线做逆傅里叶变换,就能得到该方位角对应的时域回波估计  $\hat{s}(t, \theta_0)$ 。

## 3 地雷目标稀疏时频表示

地雷目标特征矢量基于时频表示提取得到,其维数直接影响鉴别器的复杂度,矢量维数越高则鉴别器越复杂,其运算量越大。为此,在特征提取过程中,应尽可能降低特征向量维数,同时特征应当能够尽可能准确和完整地描述目标。但是,典型时频域变换算法在地雷特征提取时,均存在一定的缺陷。如 CWD 在分析多频率成分的信号时,由于它们是一类二次型变换,不可避免地出现交叉项干扰,从而导致其描述信号的准确度降低。由于地雷目标时域双峰和频域凹点的特点<sup>[5,6]</sup>,其时频域表

现为独特的“#”字形状。同时考虑到超完备字典中原子在时频域分辨率上的多样性,地雷目标正好在时频域具有显著稀疏性,因此稀疏时频表示能够提取到地雷准确的时频特征。

### 3.1 稀疏时频表示

令任意方位角  $\theta_0$  时域回波  $\hat{s}(t, \theta_0)$  为  $\hat{s}_0$ , 则 WT 可以将  $\hat{s}_0$  表示为基函数的加权求和

$$\hat{s}_0 = B\alpha \quad (8)$$

其中  $B$  为正交基函数集合,  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$ ,  $N$  为基函数数量。 $\alpha$  为基函数相应的权值矢量。

稀疏分解是近几年迅速发展的一种信号处理方法。与基于正交基函数表示信号的方法相比,稀疏分解采用超完备字典代替基函数集合。 $\hat{s}_0$  的稀疏分解为

$$\hat{s}_0 = D\beta \quad (9)$$

其中  $D$  表示超完备字典,  $D = \{d_1, d_2, \dots, d_M\}$ ,  $M$  为字典原子个数。 $\beta$  为信号在字典中的系数矢量,当  $\beta$  中仅存有限个非零系数时,则说明该图像在字典  $D$  中稀疏。字典中的原子不再正交,组成的空间足够密集,能够实现较好的信号逼近。信号的稀疏分解可以转化为超完备字典中的原子最优化组合问题。用公式表示为

$$\min_{\beta} \|\beta\|_0 \quad s. t. \quad \hat{s}_0 = D\beta \quad (10)$$

$\|\cdot\|_0$  表示  $\ell_0$  范数。考虑到式(10)是一个 NP-hard 问题,采用匹配追踪 (Match Pursuit, MP) 启发式算法求解。在大多数情况下,  $\ell_0$  范数可以等价于  $\ell_1$  范数问题。式(10)可表示为

$$\min_{\beta} \|\beta\|_1 \quad s. t. \quad \hat{s}_0 = D\beta \quad (11)$$

通过式(9)可以看出,稀疏时频表示的核心是超完备字典  $D$  中原子的选择。当  $d_i (i=1, 2, \dots, M)$  为时频原子时,则通过式(10)的求解过程即为对信号进行稀疏时频表示的过程。

### 3.2 时频原子介绍及搜索策略

在信号稀疏时频表示过程中,超完备字典常选用 Gabor 原子。Gabor 原子为 Gauss 函数,具有良好的局部特性,能在时频面上得到面积最小的时频窗口。Gabor 时域原子的定义为

$$g_{\kappa}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-b}{a}\right) e^{i\xi t} \quad (12)$$

其中  $g(t)$  表示 Gauss 函数,  $\kappa = (a, b, \xi)$  是时频参数。 $a$  为伸缩因子,用以调节时间分辨率。 $b$  为位移因

子,调整原子位置,而  $\xi$  为调制因子,表示频域上的位移。对时域原子进行傅里叶变换,可得

$$G_{\kappa}(w) = \sqrt{a}G[a(w-\xi)]e^{-i(w-\xi)b} \quad (13)$$

其中  $G(w)$  也为 Gauss 函数。可以看出,通过  $a$  变化,原子的时间和频率分辨率可以自适应的调节,信号能量的分布也趋于集中。并且由 Gauss 函数特点可知,能量主要集中在  $b$  附近,大小与  $a$  成比例。

信号稀疏时频表示时,需要对时频原子进行搜索,以便获得信号的最稀疏分解。设每个参数的搜索步长为  $M$ ,则匹配一个原子需要遍历  $M^3$ ,运算量巨大,应根据具体应用设计搜索策略。提高计算速度的搜索策略包括两方面内容:一方面,地雷的电磁散射特性与其物理尺寸密切相关,而其物理尺寸一般较为一致,因此地雷电磁散射常限定在一定范围内。时频原子用于表征地雷散射特性,可以通过大量训练样本得到其三个参数的取值范围,使搜索空间缩小;另一方面,根据地雷在时域和频域的双峰结构,分别在时域和频域内各寻找两个原子,减少原子的搜索数量,并且降低搜索的次数。图 2 为按照上述方法搜索地雷时频原子的示意图,稀疏表示过程可以获得四个原子。

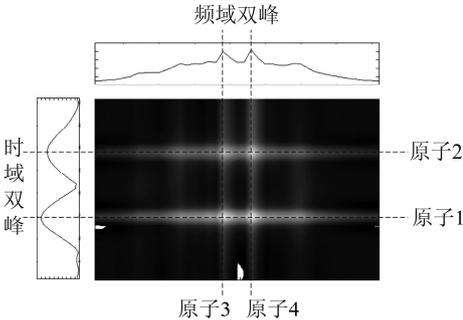


图 2 地雷时频原子示意图

Fig. 2 The profile of landmine time-frequency atoms

将搜索得到四个原子的参数记为  $(a_i, b_i, \xi_i)$ ,  $i=1,2,3,4$ 。当  $i=1,2$  时,原子为时域原子,而  $i=3,4$  时,原子为频域原子。可以直接将这些原子的参数首尾相连得到长度为 12 的特征矢量。每个参数是从不同方面对地雷目标进行描述,但又有限制,如第一个原子参数  $b$  表示原子在时域上的位移,在频域分辨率很低情况下,对原子波形没有影响,无法在形状上区分目标和杂波。考虑到原子之间的相互关系,如第一个原子和第二个原子的间距表

示双峰距离,而第三个原子和第四个原子的频率参数中心表示频域凹点特征。为此,我们在 12 个参数的基础上,又选择  $b_1, b_2, \xi_3, \xi_4$ ,通过其变化得到时域双峰间距特征和频域凹点特征:

$$\begin{cases} E = b_2 - b_1 \\ F = (\xi_3 + \xi_4) / 2 \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $E$  和  $F$  分别表示方位角  $\theta_0$  下的双峰间距和频域凹点。可以看出,噪声的存在使得通过局部极值点获得双峰的传统特征提取困难,而稀疏表示能够避免这一问题,给出更准确的结果。本文将这 14 个特征形成一个特征矢量  $\mathbf{v}$  输入到鉴别器。

### 3.3 基于判决准则的稀疏时频表示

鉴别性能对特征的优劣判定起着决定的作用。为了提取更有效的特征,在稀疏时频表示的原子搜索过程中引入鉴别分量。而在稀疏时频特征提取过程中实现鉴别参数的训练,将使鉴别算法流程简化。设第  $j$  个样本  $X_j$  对应的标签为  $y_j$ ,当样本为地雷时  $y_j=1$ ,反之,  $y_j=-1$ 。基于线性判决准则进行鉴别的鉴别器参数为  $C$ ,则其训练过程可表示为

$$C = \arg \min_C \sum_N \|y_j - Cv_j\|_2 + \|C\|_2 \quad (15)$$

$X_t$  为测试样本,目标判别函数为

$$f(X_t) = \begin{cases} 1, X_t \text{ 为目标} \\ -1, X_t \text{ 为杂波} \end{cases} \quad (16)$$

即

$$f(X_t) = \text{sgn}(Cv_t) \quad (17)$$

考虑到时频图像的稀疏分解是特征提取的过程,输出用于鉴别,为了获取具有更好鉴别能力的特征,这里将鉴别器参数训练过程和特征提取过程进行联立,可以表示为

$$\begin{aligned} \langle C, \mathbf{v}_i \rangle = \arg \min_{C, \mathbf{v}_i} \sum_N (\|X_i - D\alpha_i\|_2 + \|y_i - Cv_i\|_2) + \|C\|_2 \\ \text{s. t. } \|\alpha_i\|_0 < T_h, i=1,2,\dots,N \end{aligned} \quad (18)$$

其中自然数  $T_h$  为门限值,且  $T_h$  远小于  $M$ 。式(18)可以通过下述迭代算法求得最优解:

- 1) 设  $C$  为 0,估计特征矢量矩阵  $\mathbf{v}_i$ ;
- 2) 令  $\mathbf{v}_i$  固定,计算  $C$ ;
- 3) 令  $C$  固定,计算  $\mathbf{v}_i$ ;

4) 重复 2) 和 3),直到满足迭代终止条件。本文方法所采用的迭代终止条件为 20 次的最大迭代次数。

## 4 实验结果及分析

本文处理的试验数据源自于国防科技大学研制飞艇载超宽带 SAR 系统获取的图像数据,其采用低频超宽带步进频率信号体制,可以对大面积区域进行实时成像<sup>[3]</sup>。这里所选择的数据为 2010 年底获取的地雷探测试验数据,其中土壤条件为含水量 5% 至 10% 的沙土,地雷为表面放置或浅埋的模拟金属壳地雷。本文先采用恒虚警(Constant False Alarm Rate, CFAR)检测器对图像预筛选,然后基于二值化后的检测图像聚类得到其中心。并通过差分 GPS 等设备事先对布置的地雷目标进行精确的定位,对已获取的 ROI 进行区分,获得有效的地雷训练样本 325 个。

根据本文基于回波重构进行稀疏时频表示算法的设计,先对图 2 中地雷 ROI 切片数据进行二维 FFT 变换,得到其波数域图像,如图 3 (a) 所示。然后利用公式(7)估计得到如图 3 (b) 所示的各方位角频率响应,并对其进行逆傅里叶变换得到其的回

波估计,如图 3 (c) 所示。由于在成像过程中,限定了积累角  $\Phi = \pi/3$ ,图 3 (a)-(c) 也应落在一定的范围内,而图中的其他拖尾部分则由获取 ROI 切片时加窗引起。可以看出,通过重构后的目标回波在各个方位角上具有较好一致性,保证通过其得到的时频特征的稳健性,从而避免了直接从 ROI 图像切片中抽取距离剖面对 ROI 中心提取准确性的敏感问题。图 3 (d) 为  $\theta_0 = 0$  时地雷目标重构回波及其电磁仿真回波,可以看出,两者形状相似,时域双峰特征明显。

图 4 给出了  $\theta_0 = 0$  方向重构回波的 CWD,然后在图 5 (a) 给出相应方位角的稀疏时频表示。可以看出,由于交叉项的存在,导致 CWD 对地雷时域双峰和频域的凹点描述不精确,而图 5 (a) 中的稀疏时频表示能够更清楚的揭示了地雷目标时频分布的规律。图 5 (b)-(e) 为稀疏时频表示相应的原子,能够准确的反映时频域双峰位置,与时频原子搜索策略相适应。

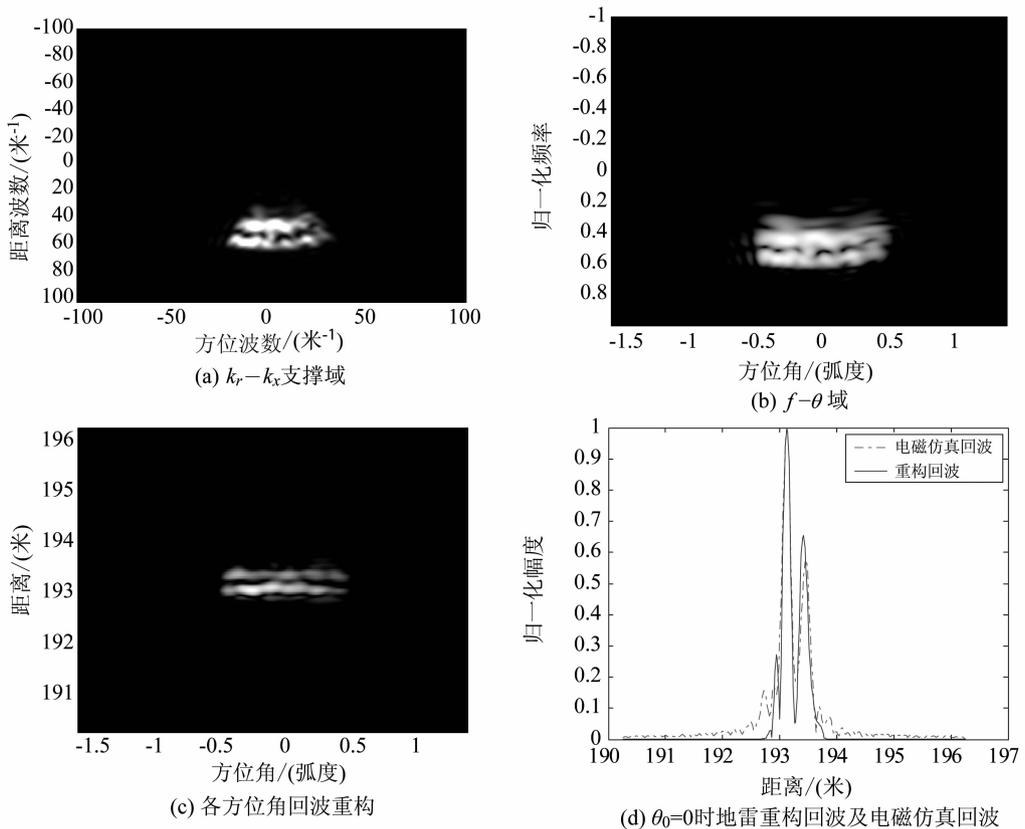
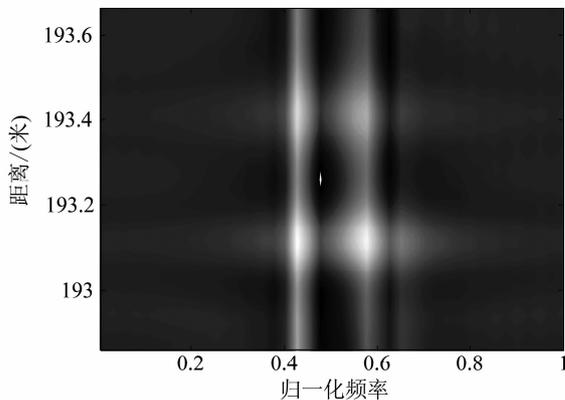
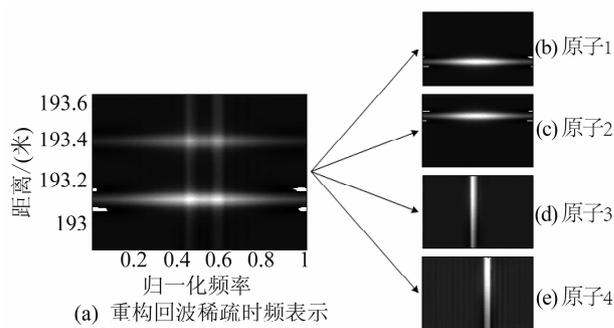


图 3 地雷目标回波重构中间过程图

Fig. 3 The medium images of landmine echo reconstruction

图4  $\theta_0=0$  方向重构回波的 CWDFig. 4 The CWD of reconstructed echo in  $\theta_0=0$ 图5  $\theta_0=0$  方向重构回波的稀疏时频表示及原子Fig. 5 The sparse Time-Frequency representation and atoms of the reconstructed echo in  $\theta_0=0$ 

接收机工作特性 (Receiver Operator Characteristic Curve, ROC) 曲线能够有效表示鉴别性能的好坏,进而得到特征提取的优劣。为便于标示及说明,本文使用 CTF-LDA 表示传统时频表示提取特征直接输入线性鉴别器的算法,并使用 DSTF 表示将判别准则和稀疏时频表示结合起来得到特征并用于鉴别的算法。为比较 CTF-LDA 和 DSTF 性能,本文进行实测数据测试:首先通过调节 CFAR 检测器所用到的虚警率参数<sup>[16]</sup>,使测试样本不断增多;然后在去除杂波虚警 90% 的情况下观测两种算法的检测率,得到两种算法的 ROC 曲线,如图 6 所示,其中横轴为 CFAR 检测所用到的虚警率参数,纵轴为检测概率。可以看出,在去除相同比例杂波的情况下,DSTF 比 CTF-LDA 检测概率高,具有更好的鉴别性能。

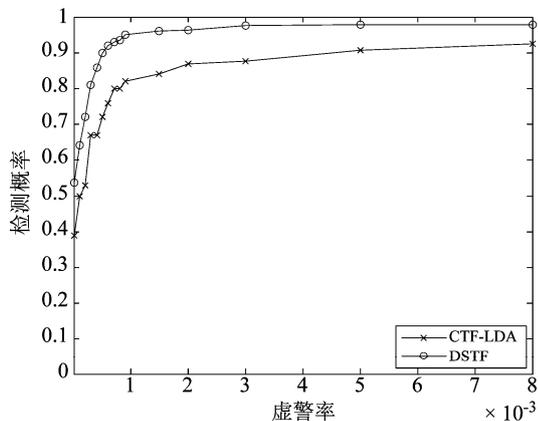


图6 两种鉴别算法的 ROC 曲线

Fig. 6 The ROC curves of two algorithms for discrimination

## 5 结束语

地雷目标特征提取是地雷探测应用的关键环节,本文提出基于重构回波稀疏时频表示的地雷特征提取及鉴别算法。首先利用 ROI 切片重构地雷回波,然后对其进行稀疏时频表示得到稳健的特征,并在稀疏分解时引入线性判决分量,通过迭代算法估计时频原子及线性判决系数,简化了鉴别算法流程。该算法充分利用地雷散射特性在时频域上稀疏性,将鉴别和稀疏时频表示的特征提取方法结合运用,能够克服传统基于 ROI 距离剖面进行时频表示易受噪声影响,且不能准确表示目标散射特性的缺点。实际数据处理表明本文算法的可行性和有效性。

## 参考文献

- [1] Clark W W, Burnsa B, Dorff G, et al. Wideband Radar for Airborne Minefield Detection [C]. Proc. of SPIE, 2006, 6217, 1-11.
- [2] Wang T, Keller J M, Gader P D, et al. Frequency Sub-band Processing and Feature Analysis of Forward-Looking Ground-Penetrating Radar Signals for Land-Mine Detection [J]. IEEE Trans. on Geosciences and Remote Sensing, 2007, 45 (3): 718-729.
- [3] Song Q, Zhang H H, Liang F L, et al. Results from An Airship-mounted Ultra-wideband Synthetic Aperture Radar for Penetrating Surveillance [C]. Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar, Seoul, Korea, 2011: 194-197.
- [4] 杨延光,周智敏,宋千,等. 基于 VFGPIR 联合特征的决策级加权融合检测方法 [J]. 国防科技大学学报, 2008, 30(6): 107-113.

- Yang Y G, Zhou Z M, Song Q, et al. . A Decision-level Weighting Fusion Detection Method Based on the Joint Multi-features of VFGPIR [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2008, 30(6): 107-113. (in Chinese)
- [5] 金添, 周智敏. 地表穿透合成孔径雷达浅地表金属地雷二维电磁特征研究 [J]. 电子学报, 2006, 34(12): 2246-2249.
- Jin T, Zhou Z M. Study of Subsurface Metallic Landmine 2-Dimensional Electromagnetic Signature in Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(12): 2246-2249. (in Chinese)
- [6] 孙晓坤, 周智敏, 王建. 埋地金属地雷电磁散射计算 [J]. 微波学报, 2008, 24(4): 5-9.
- Sun X K, Zhou Z M, Wang J. Scattering from Buried Metal Landmines [J]. Journal of Microwaves, 2008, 24(4): 5-9. (in Chinese)
- [7] Sun Yi-jun, and Li Jian. Landmine detection using forward-looking ground penetrating radar [C]. Proc. of SPIE. 2005, 5794:1089-1097.
- [8] Sun Yi-jun, and Li Jian. Plastic Landmine Detection Using Time-Frequency Analysis for Forward-Looking Ground Penetrating Radar [C]. Proc. of SPIE, 2005, 5089: 851-862.
- [9] Lai Z, Jin Z, and Yang J, et al. . Sparse Local Discriminant Projections for Face Feature Extraction [C]. 2010 International Conference on Pattern Recognition. 2010:926-929.
- [10] Shao W B, Bouzerdoum A, Phung S L. Sparse signal decomposition for ground penetrating radar [C]. 2011 IEEE Radar Conference. Kansas City, Missouri, 2011:453-457.
- [11] Zhao M, Li S T. Sparse Representation Classification for Image Text Detection [C]. 2009 Second International Symposium on Computational Intelligence and Design. 2009: 76-79.
- [12] Balazs P, Laback B, and Eckel G, et al. . Introducing Time-Frequency Sparsity by Removing Perceptually Irrelevant Components Using a Simple Model of Simultaneous Masking [J]. IEEE Trans. on Audio, Speech, and Language Processing, 2009, 1-15.
- [13] Rodriguez I V, Bonar D, Sacchi M S. Microseismic Record De-noising Using a Sparse Time-frequency Transform [C]. 2011 SEG Annual Meeting, 2011: 1-6.
- [14] 施云飞, 宋千, 金添, 等. 基于时频原子分解的地雷目标特征提取及分类 [J]. 国防科技大学学报. 2012, 34(1): 100-106.
- Shi Y F, Song Q, Jin T, et al. . Feature extraction and

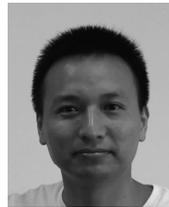
classification of Landmine based on time-frequency atom decomposition [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2012, 34(1): 100-106. (in Chinese)

- [15] 施云飞, 宋千, 金添, 等. 基于二维时频特征的地雷目标检测 [J]. 信号处理, 2011, 27(12): 1898-1903.
- Shi Y F, Song Q, Jin T, et al. . Landmine detection based on two-dimension time-frequency feature [J]. Signal Processing, 2011, 27(12): 1898-1903. (in Chinese)
- [16] Gao G, Liu L, Zhao LJ, et al. . An Adaptive and Fast CFAR Algorithm Based on Automatic Censoring for Target Detection in High-Resolution SAR Images [J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 40(6):1685-1697.

### 作者简介



**王玉明** 男, 1985 年生, 博士生, 研究方向为超宽带 SAR 成像与自动目标识别。E-mail: fenzi\_1985@nudt.edu.cn



**施云飞** 男, 1983 年生, 博士生, 研究方向为超宽带 SAR 信息处理技术以及超宽带探地雷达技术。E-mail: yunfei1983@gmail.com



**宋千** 男, 1973 年生, 研究员, 硕士生导师, 研究方向为实时信号处理、超宽带 SAR 信息处理技术以及超宽带探地雷达技术。E-mail: danosong@gmail.com



**黄晓涛** 男, 1972 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为 SAR 信号处理、阵列信号处理、谱分析等信号与信息处理。E-mail: hxtdh@yahoo.com



**梁福来** 男, 1984 年生, 博士生, 研究方向为高分辨 SAR 成像、特征增强成像。E-mail: dream\_driver\_lf@sina.com