

基于方位特征序列的地雷鉴别算法*

王玉明,施云飞,王建,宋千,黄晓涛
(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:在使用低频超宽带合成孔径雷达(UWB-SAR)对地雷进行探测的过程中,根据目标电磁散射随方位角和入射角的变化特性,提出一种利用双峰间距和频率凹点特征沿方位向变化的隐马尔科夫模型(HMM)鉴别算法。该算法首先针对目标感兴趣区域(ROI)图像估计其各方位回波响应,然后利用时频原子提取时域双峰间距和频率凹点,进而得到随方位角变化的特征序列,再通过SAR工作时方位角和入射角的变化特点以及训练样本确定HMM参数,并在此基础上计算疑似目标新的特征矢量,采用马氏距离进行判别。实验结果表明了本文所提方法在目标鉴别方面的有效性。

关键词:方位特征序列;时频原子;地雷鉴别;隐马尔科夫模型

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2013)06-0088-08

A new landmine discrimination approach based on sequential aspect features

WANG Yuming, SHI Yunfei, WANG Jian, SONG Qian, HUANG Xiaotao

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

Abstract: Low-frequency ultra-wideband synthetic aperture radar (UWB-SAR) is a promising technology for landmine detection. According to the scattering characteristics of body-of-revolution (BOR) targets along with azimuth angles and incident angles, a Hidden Markov model (HMM) discrimination algorithm is proposed, using such sequential features as double-hump distance and notch frequency. First, the algorithm estimated the target scatterings in all azimuths based on regions of interest (ROI). Second, sequential aspect features were extracted by sparse time-frequency representation. Then the HMM parameters were trained with the labeled samples and the probability of occurrence was computed to discriminate suspicious targets. The experimental results indicate that the proposed algorithm is effective in BOR target discrimination.

Key words: sequential aspect features; time-frequency atom; landmine discrimination; hidden Markov model

由于使用简单灵活,破坏威力大,地雷在战争中得到广泛应用。但是,战争遗留下的地雷,每年造成大量平民伤亡和财产损失。无论从人道主义还是军事应用来看,地雷探测和排除已成为各国迫切需要解决的问题^[1-2]。低频超宽带合成孔径雷达(Ultra-Wideband Synthetic Aperture Radar, UWB-SAR)具有广积累角和大带宽的特点,且能够对较远距离的浅埋目标进行成像,是目前探雷研究的热点和发展趋势^[3-5]。低频UWB-SAR探测地雷的数据处理流程常分为两步^[6-7]:一是预筛选,在大面积图像中通过简单局部灰度特征提取疑似目标感兴趣区域(Regions of Interest, ROI),降低后续算法的运算量;二是鉴别,利用ROI提取特征,并输入鉴别器,将不符合目标特性的杂波去除,降低预筛选产生的虚警。由于地雷布设环境复杂,其周围常存在石块、土坑、树干等

强散射体,因此在预筛选过程中,为了保证高检测率,大量杂波作为疑似目标被保留。为此,需要提取有效特征用于鉴别,在保证较高检测率的情况下去除大量杂波。

低频UWB-SAR有大的积累角,其图像中的目标也就可以获取相应角度范围的回波,方位向回波包含的目标特征丰富,提取方位特征用于鉴别是一个重要研究方向。地雷可以看成旋转体,其回波或散射强度在距离其最近的孔径两侧对称分布。而大多数杂波由于不具有旋转结构,其回波形态随方位角变化明显,散射强度具有正侧闪烁效应。因此,可以利用目标方位特征序列对其进行鉴别。目前,子孔径方法是提取目标方位特征序列的主要方法^[8-9]:首先利用预筛选获取疑似目标ROI位置,然后在相应位置的各子孔径图像中选取序列ROI切片,并分别基于其提取疑似

* 收稿日期:2013-04-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61271441);全国优秀博士学位论文作者专项资金资助项目(201046)

作者简介:王玉明(1985—),男,甘肃会宁人,博士研究生,E-mail:yumingwang1985@gmail.com;

黄晓涛(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:hxtth@yahoo.com

目标时域和频域特征,最后将得到的方位特征序列应用于隐马尔科夫模型(Hidden Markov Model, HMM)等序列鉴别器。该类算法的子孔径以牺牲图像分辨率和目标信噪比得到,导致以下问题:(1)当子孔径数量较多时,受信噪比和分辨率的限制,基于子孔径 ROI 提取的特征不够精确,如基于局部极值提取的时域双峰特征对噪声较为敏感;(2)当子孔径数量较少时,虽然单个 ROI 的特征准确性提高,但方位向特征数减少,稳健性降低,使得整体鉴别性能下降,如少数几条回波较大突变引起的序列子孔径特征剧烈变化。

低频 UWB-SAR 有大的带宽,其图像也就具有高的距离分辨率。与之相应,地雷的前后沿分为两个强散射中心,表现为双峰结构。基于双峰提取特征用于鉴别是另一个重要研究方向^[10-11]。双峰位置确定是进一步提取双峰特征的关键,一般在图像中选取距离剖面用局部极值法获得,易受噪声的影响。

针对上述问题,本文提出一种基于时域双峰间距和频率凹点^[12]方位特征序列进行鉴别的算法。

1 地雷散射特性

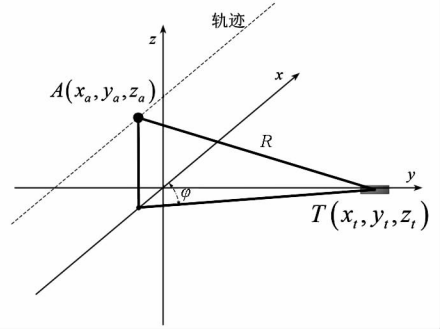
为了获得地雷方位散射特性,先建立探测雷达对浅埋圆柱目标观测的电磁散射模型。在正侧视 SAR 成像中,雷达一般采用“走-停-走”模式,如图 1 (a)所示为正侧视条带 SAR 对场景中目标观测图。

在三维笛卡尔坐标系中, $A(x_a, y_a, z_a)$ 为雷达天线发射和接收电磁波的某一点,而 $T(x_t, y_t, z_t)$ 为场景中某一目标的位置,且其上端地表到天线的距离为 R , θ 为入射角。设方位角为 $\varphi \in (0, \pi)$,则对该固定目标

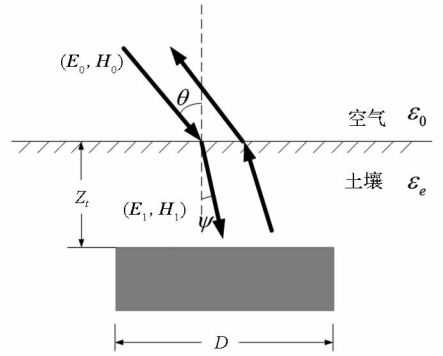
$$\varphi = \arccos\left(\frac{x_t - x_a}{R \sin \theta}\right) \quad (1)$$

式中 $\theta \in (0, \pi/2)$ 。对于埋地目标,电磁波传播如图 1(b)所示,依次为空气、土壤、空气,其中空气的介电常数为 ε_0 ,并设土壤的相对介电常数 ε_e 。电磁波在空气和土壤中的波数分别为 k_i 和 k_t 。令信号频率为 f ,可知 $k_i = k = 2\pi f/c$ (c 为光速),且存在 $k_t = \sqrt{\varepsilon_e} k_i$ 。当 R 足够大时,可以近似认为到地表的电磁波是平面波。 \mathbf{E}_0 为雷达发射的电场矢量,则透射到土壤媒质目标处的电场可表示为

$$\mathbf{E}_1 \approx \frac{T_{io}(\alpha)}{4\pi R} \mathbf{E}_0 \exp(-jkR - jk|z_t| \sqrt{\varepsilon_e - \sin^2 \theta}) \quad (2)$$



(a) 天线与地雷空间分布图



(b) 埋地地雷电磁散射模型

图 1 电磁散射示意图

Fig. 1 Illustration of landmine scattering

式中 $T_{io}(\theta)$ 是电磁波由空气进入土壤的透射系数。

根据文献[15]可知,物理光学(Physical Optics, PO)法能够对目标散射特性进行近似分析。PO 使用充当散射场激励源的感应表面电流代替目标,通过对感应电流的积分获取散射电磁场的大小。设 $F(k)$ 为发射信号的频谱, D 为圆柱目标直径,电磁波从土壤返回空气的透射系数为 $T_{oi}(\theta)$ 。当圆柱的高度较小时,基于 PO 可得到随入射角变化的目标回波谱^[15]

$$S(k) = \tilde{h}(k) [\exp(-j2kR_1) + \exp(-j2kR_2)] \quad (3)$$

式中

$$\tilde{h}(k) = -\frac{F(k)T_{io}(\theta)T_{oi}(\theta)}{16\pi R^2 \sin \theta} \sqrt{\frac{D}{j2k\pi \sin \theta}} \begin{cases} R_1 \approx R + z_t \sqrt{\varepsilon_e - \sin^2 \theta} - D \sin \theta / 2 \\ R_2 \approx R + z_t \sqrt{\varepsilon_e - \sin^2 \theta} + D \sin \theta / 2 \end{cases} \quad (4)$$

R_1 和 R_2 是目标径向上回波上的两个强散射点,表现为时域图像中的两个峰值,双峰之间的距离与目标直径和入射角的正弦值成正比

$$R_{12} = |R_1 - R_2| = D \sin \theta \quad (5)$$

如果将电磁波发射和接收的整个过程看作是一个系统,则其频谱响应为

$$H(k) = \frac{S(k)}{F(k)} = \frac{\tilde{h}(k) [\exp(-j2kR_1) + \exp(-j2kR_2)]}{F(k)} \quad (6)$$

令 $R' = R + z_r \sqrt{\varepsilon_e - \sin^2 \theta}$, 式(6)可化为

$$H(k) = \frac{\tilde{h}(k)}{F(k)} \exp(-j2k(R' - D \sin \theta / 2)) \times [1 + \exp(-j2kD \sin \theta)] \quad (7)$$

其幅度表达式为

$$|H(k)| = \left| \frac{\tilde{h}(k)}{F(k)} [1 - \exp(-j2kD \sin \theta)] \right| = 2 \left| \frac{\tilde{h}(k)}{F(k)} \sin(kD \sin \theta) \right| \quad (8)$$

可以看出, $|H(k)| = 0$ 时, 当雷达发射信号各频率增益一致时, 目标回波出现频率凹点, 且它们的位置为

$$k = \frac{N\pi}{D \sin \theta}, N \in \mathbf{Z}^+ \quad (9)$$

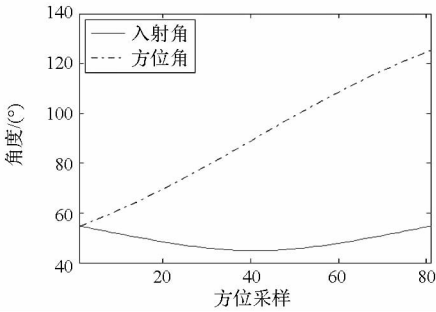


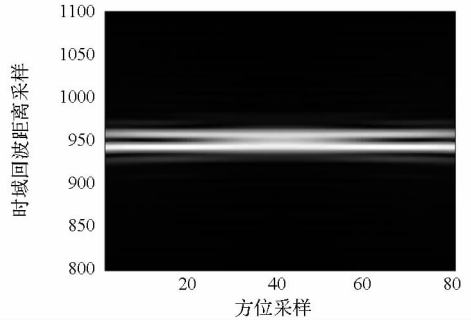
图 2 方位角及入射角随雷达运动变化图

Fig. 2 The variation diagram of azimuth angle and induction angle changing with radar

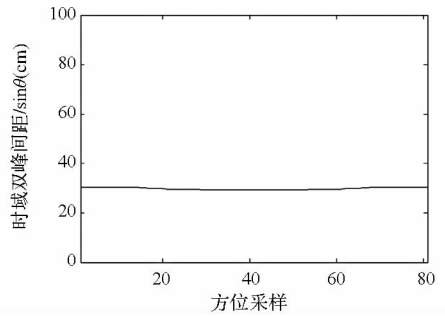
由式(7)和式(9)可知, 地雷目标回波频谱中可能存在多个凹点。但是在实际系统中, 由于其带宽固定, 且在该带宽范围内地雷回波频率只存在一个凹点, 因此地雷回波频率也常表现为双峰结构。在式(9)中, 凹点的位置与其直径和入射角正弦成反比, 而与 SAR 回波的距离徙动无关。雷达随平台运动时, 图 2 为方位等距离间隔采样 81 次时天线对场景中目标观测的方位角及入射角变化图。当飞行高度一定时, 方位角和入射角密切相关, 方位角的变化引起入射角的变化。针对同一目标, 方位角持续增大, 而入射角则在以目标为中心的两侧对称变化。

图 3 为利用 XFDTD 软件仿真的地雷目标电磁散射结果图。图 3(a)为目标在图 2 各方位时域回波图, 与式(5)所示一致, 入射角 θ 较大时, 时域双峰间距较宽, 而 θ 较小时, 其间距也较小, 双峰间距近似与 $\sin \theta$ 成正比, 如图 3(b)所示, 两者之间的比值近似为常数。图 3(c)为目标在图

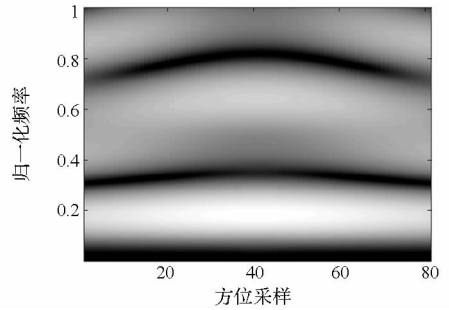
2 各方位频域回波图, 与公式(9)所示一致, 第一个频率凹点随 θ 的减小而增大, 近似与 $\sin \theta$ 成反比, 如图 3(d)所示, 两者之间的乘积近似为常数。



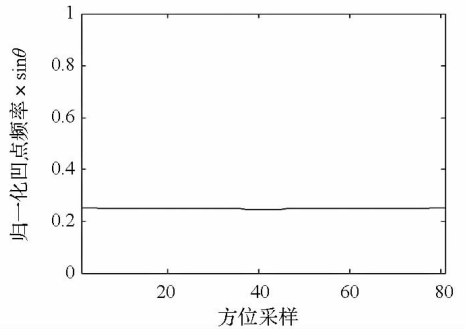
(a) 各方位时域回波



(b) 各方位时域双峰间距/ $\sin \theta$ 分布图



(c) 各方位频域回波



(d) 各方位频率凹点 $\times \sin \theta$ 分布图

图 3 地雷目标电磁散射仿真结果

Fig. 3 The simulation results of landmine scattering

与圆柱目标双峰间距和频率凹点规则变化不同, 杂波由于其大多不满足旋转结构, 其散射结构复杂, 难以出现与地雷目标类似的情形。因此, 可以通过双峰间距和频率凹点的方位特征序列对地雷和杂波进行鉴别。

2 方位特征序列提取

2.1 特征提取流程

图 4 给出了方位特征序列提取流程。由于 SAR 对目标观测时,其回波可认为是与雷达天线距离相同的多个散射中心响应之和,很难直接从中分离出目标响应。并且,由于目标响应较弱,从一维回波中分割出来也存在困难。为此,需要研究一种能够准确提取目标回波响应的算法。本文提出一种从目标 ROI 图像切片估计其各方位响应的方法,利用目标在二维图像中信杂比其在一维回波中强这一特点,对目标进行空域分割;然后,通过二维傅里叶变换、波数域到频率-方位角域映射、逆傅里叶变换三步处理,分离目标各个方位上的响应。其中获取目标 ROI 的过程相当于已经对目标进行了空域加窗滤波处理,它能有效抑制与目标同一距离散射点响应的影响,提高目标方位响应估计的准确性。

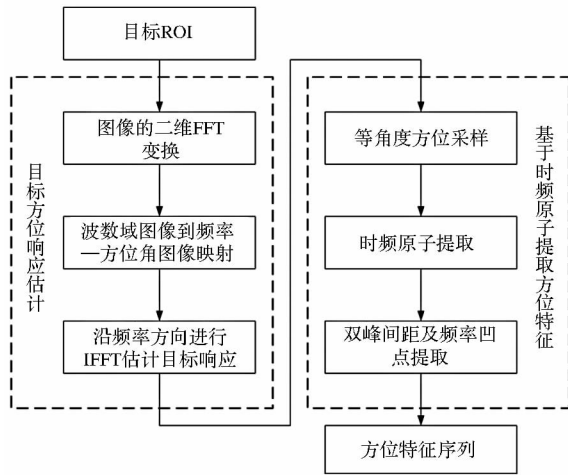


图 4 方位特征序列提取流程

Fig. 4 The extraction procedure of sequential aspect features

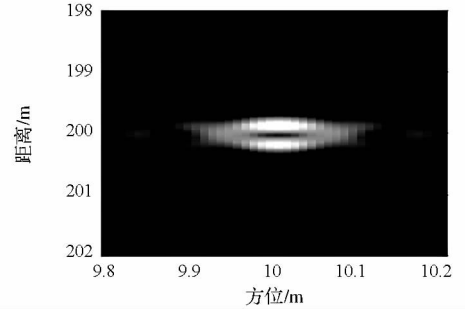
针对估计得到的目标各方位向回波,采用匹配追踪(Matching Pursuit, MP)等算法可得到其时频原子表示,实现用少量原子对信号的最佳逼近。本文通过地雷时频原子之间的相互关系提取其方位响应的时域双峰间距和频率凹点,降低噪声的影响。

2.2 目标方位响应估计

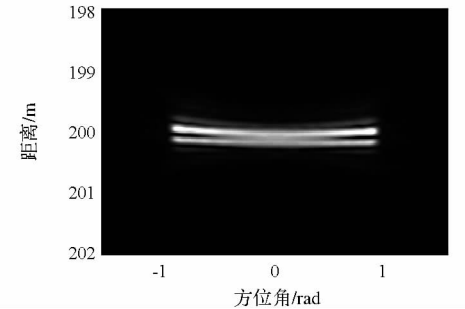
假设目标的 ROI 为 $T(x, r)$, 对其复图像进行二维傅里叶变换, 得到波数域图像为 $\bar{T}(k_x, k_r)$, 其中 k_x, k_r 分别为方位波数和斜距波数。根据后向投影成像算法模型, 存在下式:

$$\begin{cases} k_x = 2k \sin \varphi \\ k_r = 2k \cos \varphi \end{cases} \quad (10)$$

利用式(10)的关系式, 可以将 $\bar{T}(k_x, k_r)$ 映射到 $k-\varphi$ 域中, 得到各入射角下的目标的频域响应。在 $k-\varphi$ 域中, 沿方位角 φ 做逆傅立叶变换, 就能得到目标在该方位角对应的时域回波估计 \hat{s}_φ 。图 5(a) 为图 3 中回波通过所成的地雷 ROI 切片, 而图 5(b) 则为相应的各方位响应估计。可以看出, 估计得到的各方位目标响应与图 3(a) 中回波的双峰分布形式相同。



(a) 仿真地雷 ROI 切片



(b) 估计的目标方位响应

图 5 目标 ROI 及其方位散射

Fig. 5 The ROI of target and its aspect scattering

2.3 方位特征序列提取

地雷响应在时域和频域都存在双峰结构, 故其在时频域表现为井字结构, 具有稀疏性。 \hat{s}_φ 的稀疏时频表示为

$$\hat{s}_\varphi = D\alpha \quad (11)$$

其中超完备字典 D 的原子为时频原子, α 为信号在字典中的系数矢量。为实现用尽量少的非零系数逼近信号, 信号的稀疏时频表示可以转化为时频原子最优化组合问题, 用公式表示为

$$\min_{\alpha} \|\alpha\|_0 \quad \text{s. t.} \quad \hat{s}_\varphi = D\alpha \quad (12)$$

$\|\cdot\|_0$ 表示 l_0 范数。Gabor 原子是一种常用的时频原子, 其定义为

$$\begin{cases} g_\rho(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} g\left(\frac{t-b}{a}\right) e^{i\tau t} \\ G_\rho(w) = \sqrt{a} G[a(w-\tau)] e^{-i(w-\tau)b} \end{cases} \quad (13)$$

其中 $g(t)$ 、 $G(\omega)$ 均为 Gauss 函数, $\rho = (a, b, \tau)$ 是时频参数, 分别表示原子伸缩、位移、调制。通过 ρ 的调节, 可以控制窗原子的时间和频率分辨率的变化, 实现信号能量的移动。

通过式 (12) 求解最优系数时, 一般采用 MP 算法。MP 是启发式最优化算法, 涉及原子搜索问题。考虑到地雷在时频域的双峰特点, 原子也按照这一特点进行搜索: 首先遍历时域, 找出最匹配时域双峰的两个原子 (a_1, b_1, τ_1) 和 (a_2, b_2, τ_2) ; 然后遍历频域, 找出最匹配频域双峰的两个原子 (a_3, b_3, τ_3) 和 (a_4, b_4, τ_4) 。时频原子与双峰间距及频域凹点关系如图 6 所示, 选择 b_1, b_2, τ_3, τ_4 , 通过其变化及入射角校正得到时域双峰间距特征和频域凹点特征:

$$\begin{cases} r^\circ = (b_2 - b_1) / \sin\theta \\ f^\circ = (\tau_3 + \tau_4) \sin\theta / 2 \end{cases} \quad (14)$$

其中, r° 和 f° 分别表示入射角 θ 下的双峰间距和频域凹点。在方位等角度对目标响应进行 N 次采样, 分别提取其 r° 和 f° , 可形成方位特征序列矢量 $\mathbf{r}^\circ = [r_1^\circ, r_2^\circ, \dots, r_N^\circ]$ 和 $\mathbf{f}^\circ = [f_1^\circ, f_2^\circ, \dots, f_N^\circ]$ 。

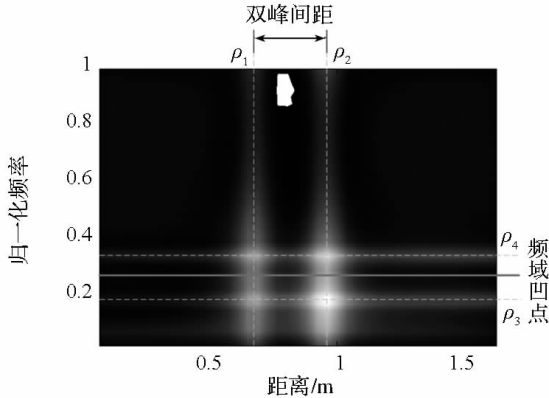


图 6 时频原子与双峰间距及频域凹点关系示意图

Fig. 6 The relationship illustration between time-frequency atom and double-hump distance, notch frequency

3 基于 HMM 的鉴别算法

HMM 能够准确分析序列状态的变化特性, 在处理时间和空间序列上有着广泛的应用。根据条带 SAR 对目标观测的过程可知, 电磁波的入射角随天线与目标的相对位置变化而变化, 是一个随时间而动的量。与之相对应, 基于入射角提取的双峰间距和频率凹点特征, 也是随时间变化的序列。因此, HMM 可以对目标的方位特征序列状态矢量进行建模, 然后用于鉴别。

HMM 参数包括初始状态分布、状态转移概率矩阵 B 和隐状态对可见状态的产生概率矩阵 U 。

针对本文的方位状态矢量, 设每一个方位采样为一个隐状态, 表示为 $\chi_n, n = 1, 2, \dots, N$, 其中 N 表示隐状态数量, 且 χ_1 初始分布概率为 1, 即 $P(\chi_1) = 1$ 。参数 B 的维数为 $N \times N$, 表示为 $B = \{b_{mn} | m, n = 1, \dots, N\}$ 。当隐状态可能的观测状态数为 L 时, 参数 U 的维数为 $N \times L$, 表示为 $U = \{u_{nl} | n = 1, \dots, N; l = 1, \dots, L\}$, 并有下述约束条件成立。

$$\begin{cases} 0 \leq b_{mn} \leq 1; \sum_n b_{mn} = 1 \\ 0 \leq u_{nl} \leq 1; \sum_l u_{nl} = 1 \end{cases} \quad (15)$$

由方位特征序列提取过程可知, 其对应的状态序列固定, 则

$$b_{mn} = \begin{cases} 1, m = n - 1 \\ 0, m \neq n - 1 \end{cases} \quad (16)$$

可以看出, HMM 参数训练简化为产生概率矩阵 U 估计问题。一般情况下, HMM 中 U 为矩阵, 但本文所提特征是连续随机变量, HMM 中 U 应由概率密度函数组成的矢量 $[P_1(l), P_2(l), \dots, P_N(l)]$, 其中 $l \in \mathbf{R}$, 而 $P_n(l)$ 可由多个样本同一方位的特征值统计得到。设训练样本数为 W , 任意样本 $w (1 \leq w \leq W)$ 第 n 个状态的观测值为 v_n^w , 其最大值和最小值为

$$\begin{cases} v_n^{\max} = \operatorname{argmax}_{1 \leq w \leq W} (v_n^w) \\ v_n^{\min} = \operatorname{argmin}_{1 \leq w \leq W} (v_n^w) \end{cases} \quad (17)$$

按最大值及最小值确定范围等间隔划分 L 个长度为 $\Delta = (v_n^{\max} - v_n^{\min}) / L$ 单元格, 则

$$P_n(l) = \frac{W_\Delta \times L}{(v_n^{\max} - v_n^{\min}) \times W} \quad (18)$$

其中 W_Δ 是跨越值 l 落在宽度为 Δ 单元格中样本的数目。对 $P_n(l)$ 进行拟合, 形成连续函数, 则产生概率矩阵 U 中的某一观测值可直接用其对应的概率密度函数值 p_n^l 代替。可以看出, p_n^l 能够表示观测值出现的概率, 其值越大, 出现的概率越大, 反之, 出现的概率越小。但是 $u_{nl} | \chi_{n,l} = p_n^l$ 不再满足式 (15) 的条件。为了简便, 下文推导依然借助概率这一概念进行表述。

设本文训练得到的 HMM 为 γ 。一个可见序列 v 在 γ 中出现的概率等于各隐状态序列产生这个可见序列的概率之和为

$$P(v/\gamma) = \sum_{\eta=1}^{N^+} P(v | \chi^\eta, \gamma) P(\chi^\eta, \gamma) \quad (19)$$

其中 N^+ 为所有可能出现的隐状态序列, η 为变量。设固定序列 $\chi = [\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_N]$, 则

$$P(v | \chi, \gamma) = \prod_{n=1}^N P(v_n | \chi_n, \gamma) = u_{11} \cdot u_{22} \cdot \dots \cdot u_{NN} \quad (20)$$

式中 $u_{nn} = u_{nl} |_{\chi_n, l=v_n}, 1 \leq n \leq N$ 。同时考虑到状态 χ_1 始终最先出现,将式(20)代入式(19)可得

$$P(v/\gamma) = u_{11} \cdot b_{12} \cdot u_{22} \cdot b_{23} \cdot \dots \cdot b_{(N-1)N} \cdot u_{NN} \\ = u_{11} \cdot u_{22} \cdot \dots \cdot u_{NN} \quad (21)$$

根据式(21),本文分别估计样本特征矢量 r^o 和 f^o 的发生概率 $P_{r^o} = P(r^o/\gamma)$ 、 $P_{f^o} = P(f^o/\gamma)$,然后将 P_{r^o} 和 P_{f^o} 构成新的特征列矢量 v^o 进行鉴别。由于双峰间距和频率凹点的方位特性相互关联,且都是入射角正弦值的函数,所以 P_{r^o} 和 P_{f^o} 表征目标准确度相当。为联合利用 P_{r^o} 和 P_{f^o} ,鉴别过程采用马氏距离来计算样本间距离。令训练样本的新特征列矢量为 $V^o = \{v_1^o, v_2^o, \dots, v_w^o\}$ 。计算样本协方差矩阵

$$\zeta = \frac{1}{W-1} \sum_{w=1}^W (v_w^o - \bar{v}^o)(v_w^o - \bar{v}^o)^T \quad (22)$$

式中 $\bar{v}^o = \frac{1}{W} \sum_{w=1}^W v_w^o$,为样本均值。则每个训练样本到样本集的距离

$$d(v_w^o, \bar{v}^o) = \sqrt{(v_w^o - \bar{v}^o)^T \zeta^{-1} (v_w^o - \bar{v}^o)} \quad (23)$$

考虑到杂波方位变化剧烈,其 P_{r^o} 和 P_{f^o} 值通常都非常小,随观测值变化的范围也很小,而目标的 P_{r^o} 和 P_{f^o} 值较大,随观测值变化的范围较大,因此可以统计杂波样本集 $d(v_w^o, \bar{v}^o)$ 的分布,并根据其设定门限 d_T ,令 v_i^o 为测试样本,则

$$\begin{cases} d(v_i^o, \bar{v}^o) > d_T, \text{目标} \\ d(v_i^o, \bar{v}^o) \leq d_T, \text{杂波} \end{cases} \quad (24)$$

综上所述,本文鉴别流程如图7所示。

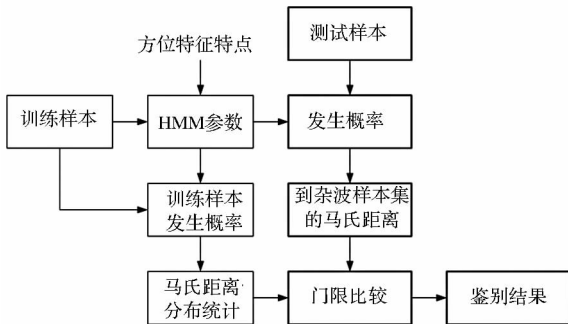


图7 本文鉴别流程图

Fig.7 The discrimination procedure in this paper

4 实验结果及分析

本文处理的实测数据由飞艇载地表穿透合成孔径雷达 (AMUSAR) 获得^[5],该系统采用低频超宽带步进频率信号体制,分辨率优于0.1m,图8

为其所成图像。

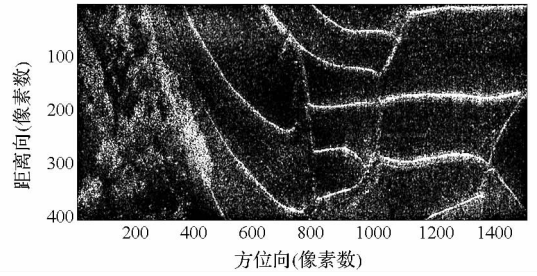
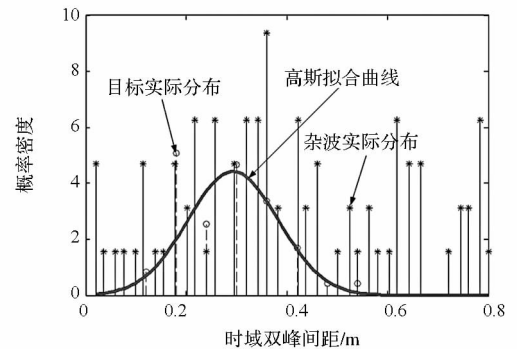


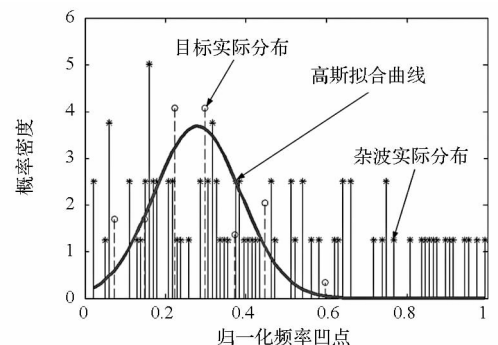
图8 AMUSAR系统图像

Fig.8 The image of AMUSAR

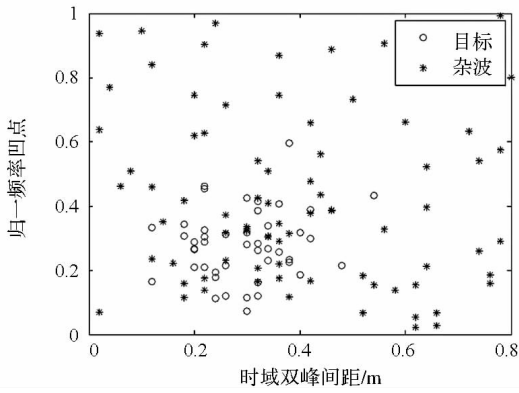
选用某次实验的地雷样本45个、杂波样本82个进行训练。图9给出了本文算法方位特征序列提取结果。为降低运算量,且有效表现目标特性,本文对 φ 进行11次等角度采样,角度间隔为 $\pi/30$ 。图9(a)为方位角 $\varphi = 0$ 时目标样本和杂波样本时域双峰间距分布统计,图9(b)为方位角 $\varphi = 0$ 时目标样本和杂波样本频率凹点分布统计。图9(c)则为目标和杂波样本在 $\varphi = 0$ 时,时域双峰间距和频率凹点的二维空间分布,目标分布集中而杂波分布范围较广。图9(d)为训练样本集中典型目标和杂波的时域双峰间距与 $\sin\theta$ 比值随11次角度采样的变化图,而图9(e)为训练样本集中典型目标和杂波的频率凹点与 $\sin\theta$ 乘积随11次角度采样的变化图。可以看出,目标方位特征序列变化较为稳定,而杂波方位特征序列变化剧烈。



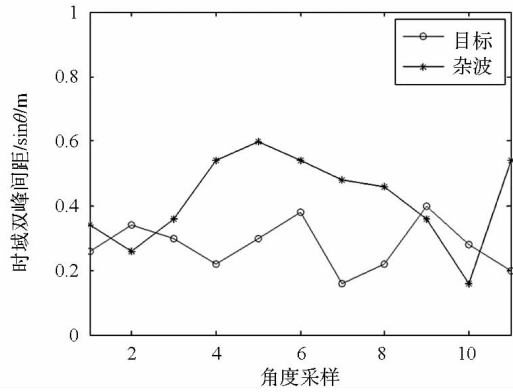
(a) $\varphi = 0$ 时样本双峰间距统计分布



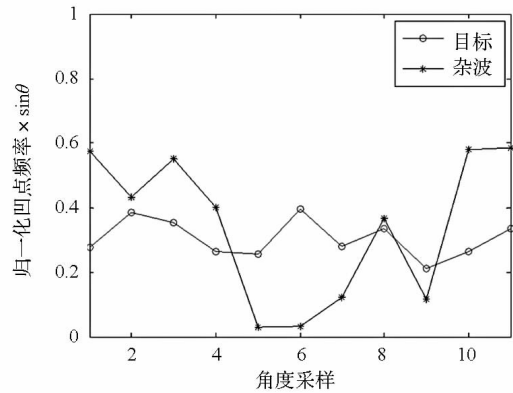
(b) $\varphi = 0$ 时样本频率凹点统计分布



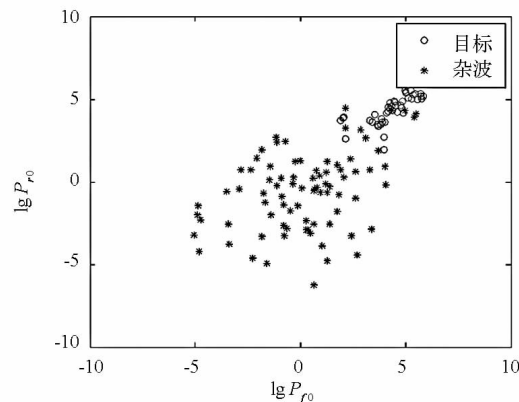
(c) $\varphi=0$ 时样本集特征二维空间分布



(d) 样本的时域双峰间距/ $\sin\theta$ 随方位角变化



(e) 样本的频率凹点 $\times \sin\theta$ 随方位角变化



(f) 样本集新特征矢量空间分布

图 9 本文方位特征序列提取结果

Fig. 9 The extraction results of sequential aspect features in this paper

本文分别将时域双峰间距和频率凹点观测值产生概率用其对应的概率密度值代替,并利用式(21)计算得到新的特征矢量。考虑到采用式(21)计算时,需要用到多个数值的乘积,获得的数值要么很小,要么很大,因此为突出显示目标和杂波样本新特征量分布,分别对其求对数,得到图9(f)。与图9(c)相比,图9(f)中目标样本和杂波分离程度更高。

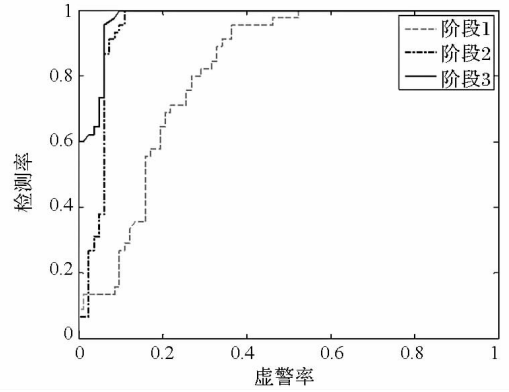


图 10 三个阶段的 ROC 结果比较

Fig. 10 The comparison of three steps via ROC

本文算法处理包括三个特征提取的阶段:一是通过估计的回波响应提取某一角度的时域双峰间距和频率凹点;二是提取多个角度的时域双峰间距和频率凹点矢量;三是基于 HMM 鉴别时采用式(21)得到新的特征矢量。针对特征提取的三个阶段,图 10 分别给出了相应鉴别算法的接收机工作曲线 (Receiver Operating Characteristic Curve, ROC)。在第一、二阶段,由于目标分布较集中且两类特征值差异较小,本文首先基于目标样本集训练得到样本中心,然后根据全体训练样本到样本中心的欧式距离统计其 ROC 特性。在第三阶段,考虑到杂波的概率密度值较小,通过式(21)计算得到的新特征矢量很小这一特点,本文基于杂波样本集训练得到样本中心,然后根据全体训练样本到样本中心的马氏距离来统计其 ROC 特性。在图 10 中,阶段 3 的鉴别能力最强,阶段 2 次之,阶段 1 的鉴别能力最弱。可以看出,本文算法能够在较低的虚警下达到较高的检测率,实现杂波的有效去除。

5 结论

有效目标散射特性的准确提取是目标鉴别的关键所在。地雷作为旋转体,其方位散射变化具有清晰的规律,与杂波方位散射变化规律存在差异。本文首先针对 UWB-SAR 系统,对其观测地雷进行电磁建模及仿真,得到地雷时域双峰间距

及频率凹点随方位角变化的特点;然后,针对 ROI 图像估计目标的方位响应,并利用时频原子提取方位响应中的时域双峰间距和频率凹点;最后,在基于 HMM 的鉴别算法设计过程中,根据雷达实际观测情形,令 HMM 状态转移固定,使用观测值的概率密度代替其产生概率,并采用马氏距离进行最后的判别。由于在利用稀疏时频提取特征时,限制了搜索终止条件,并且对基于 HMM 的鉴别进行了优化,有效地降低了运算量,使得该算法计算速度较快,能够适应较大数量数据的特征提取和鉴别工作。实际处理结果表明该算法通过三个阶段特征提取和变换,能够有效提高检测性能,且具有良好的实用性。

参考文献 (References)

- [1] Habib M K. Humanitarian demining: reality and the challenge of technology-the state of the arts[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2007, 4(2): 151-172.
- [2] Torrione P A, Throckmorton C S, Collins L M. Performance of an adaptive feature-based processor for a wideband ground penetrating radar system[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2006, 42(2): 644-658.
- [3] Hill A J, Crisp G, Ratcliffe J. The development of a motion-compensated, vehicle Mounted, ultrawideband radar for buried landmine detection [C]//*Proceedings of Radar Conference, 3rd European*, 2006: 265-268.
- [4] Wang T, Keller J M, Gader P D, et al. Frequency subband processing and feature analysis of forward-Looking ground-penetrating radar signals for land-mine detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, 45(3): 718-729.
- [5] Song Q, Zhang H H, Liang F L, et al. Results from an airship-mounted ultra-wideband synthetic aperture radar for penetrating surveillance [C]//*Proceedings of Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar*, Seoul, Korea, 2011: 194-197.
- [6] 杨延光,周智敏,宋千,等. 一种 VFGPIR 序列图像特征评估与选择新方法[J]. *信号处理*, 2009, 25(10): 1574-1581.
YANG Yanguang, ZHOU Zhimin, SONG Qian, et al. A novel feature evaluation and selection method for sequence images of VFGPIR [J]. *Signal Processing*, 2009, 25(10): 1574-1581. (in Chinese)
- [7] Sun Y J, Li J. Landmine detection using forward-looking ground penetrating radar [C]//*Proceedings of SPIE*, 2005, 5794:1089-1097.
- [8] Runkle P, Nguyen L H, McClellan J H, et al. Multi-aspect target detection for SAR imagery using hidden markov models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 46-55.
- [9] Ji S H, Parr R, Carin L. Nonmyopic multispect sensing with partially observable markov decision processes [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2007, 55(6): 2720-2730.
- [10] 曲笑江,王玉明,施云飞,等. 基于方位不变特征的地雷检测方法[J]. *信号处理*, 2011, 27(8): 1126-1132.
QU Xiaojiang, WANG Yuming, SHI Yunfei, et al. Landmine detection based on aspect invariant characteristics [J]. *Signal Processing*, 2011, 27(8): 1126-1132. (in Chinese)
- [11] Jin T, Zhou Z M. Feature extraction and discriminator design for landmine detection on double-hump signature in ultrawideband SAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(11): 3783-3791.
- [12] 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 Xiaokun, ZHOU Zhimin, WANG Jian. Scattering from buried metal landmines [J]. *Journal of Microwaves*, 2008, 24(4): 5-9. (in Chinese)
- [13] Rodriguez I V, Bonar D, Sacchi M S. Microseismic record de-noising using a sparse time-frequency transform [C] // *Proceedings of 2011 SEG Annual Meeting*, 2011: 1-6.
- [14] Sturm B L, Christensen M G. Cyclic matching pursuits with multiscale time-frequency dictionaries [C]//*Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers*, Pacific Grove, California, USA, 2010: 1-10.
- [15] 金添,宋千,孙晓坤,等. 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 Tian, SONG Qian, SUN Xiaokun, et al. Study of subsurface metallic landmine 2-dimensional electromagnetic signature in ground penetrating synthetic aperture radar [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, 34(12): 2246-2249. (in Chinese)