

超宽带 SAR 未爆物特征提取新方法

金 添 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

摘 要: 超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)能够探测浅埋未爆物(UXO), 而提取特征的有效性直接决定了检测性能。传统子带-子孔径处理在提取 UXO 散射函数关于频率和方位信息的同时牺牲了空间分辨率。针对这个问题, 该文提出了基于空间-波数分布的频率和方位特征提取方法, 并结合不变矩得到具有平移和旋转不变的特征集。该特征集不仅包含了频率和方位信息, 而且包含了空间高分辨信息。实测数据处理表明, 该文提出的特征能够有效提高 UXO 检测性能。

关键词: 合成孔径雷达; 超宽带; 未爆物; 空间-波数分布; 不变矩

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)01-0169-04

A Novel Feature Extraction Method for Unexploded Ordnance in Ultra-Wideband SAR

Jin Tian Zhou Zhi-min

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

Abstract: Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) can detect shallow buried UnExploded Ordnance (UXO), where the efficiency of extracted features determines the detection performance. The traditional subband-subaperture processing extracts the frequency and aspect information of UXO scattering with sacrifice of spatial resolutions. According to the issue, in this paper, the frequency and aspect angle features extraction method is proposed on the Space-Wavenumber Distribution (SWD), which is combined with the moment invariants to obtain the shift- and rotation-invariant feature set. The proposed feature set contains not only the frequency and aspect information but also high spatial resolutions information. Field data processing results show that the proposed features in this paper can improve the UXO detection performance efficiently.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Ultra-wideband; UnExploded Ordnance (UXO); Space-Wavenumber Distribution (SWD); Moment invariants

1 引言

在战争中遭受轰炸的区域内会遗留许多没有爆炸的炸弹, 统称为未爆物(UXO)。战后 UXO 清理是重建工作的重要任务之一^[1]。机载超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)工作在低频区, 能够穿透地表获得浅地表目标的二维高分辨 SAR 图像。虽然 UWB SAR 的地表穿透能力有限, 只能探测到浅埋的 UXO, 但是通过对浅埋 UXO 的定位可以实现轰炸区域的标定, 然后再对标定的小面积区域利用电磁感应器和磁力计等^[2-4]等设备进行单个 UXO 探测从而大大提高了清理效率。国外早已开展了 UWB SAR 浅地表目标探测系统的研制, 特别是美国陆军实验实(ARL)利用车载 BoomSAR 系统模拟机载 UWB SAR 工作方式进行了浅埋 UXO 探测的试验和信息处理算法研究^[5]。国内则建成了轨道地表穿透 SAR (Rail-GPSAR), 也开展了浅埋 UXO 探测研究。

UXO 检测通常分成两步: 预筛选和鉴别。预筛选是从大面积 SAR 图像中提取若干感兴趣区域(ROI), 每个 ROI

包含一个怀疑目标; 而鉴别则是进一步区分这些怀疑目标剔除虚警。目前 UXO 检测的关键问题就是如何在鉴别过程中降低虚警率达到实用要求, 而目标鉴别特征的有效性直接关系到最终检测性能的好坏。

UWB SAR 目标特征不仅是二维空间位置的函数, 而且是频率和方位角的函数。ARL 利用子带-子孔径(subband-subaperture)处理提取 UXO 在某个频段和方位角范围内的散射特征^[6], 但是这种方法是牺牲距离和方位分辨率为代价的。我们曾提出了时频表示成像算法(TFRIF), 该方法能够在不损失二维空间分辨率的情况下得到不同频率和方位角的 UWB SAR 图像来提高预筛选性能^[7], 但不适合 ROI 图像切片的特征提取。于是我们又提出了空间-波数变换(SWD)的图像域目标特征提取方法, 并将其用于地雷目标的特征提取中^[8]。本文在分析了 UXO 散射特性的基础上, 利用 SWD 提取了 UXO 频率和方位散射特征, 并结合不变矩得到了一组新的 UXO 鉴别特征。对 Rail-GPSAR 系统实测数据利用隐马尔可夫模型(HMM)进行 UXO 鉴别, 本文新特征的结果优于 ARL 所用特征。

2 UXO 散射方位特性分析

由于 SAR 只具有二维成像能力, SAR 图像为目标散射函数在二维成像平面的投影, 因此下面的讨论均在成像平面 r - y 上进行, 其中 r 和 y 分别表示斜距和方位。雷达平台沿 y 方向匀速直线运动, 在不同孔径位置发射宽带信号并接收目标反射回波, 如图 1 所示, 其中 θ_a 和 θ_p 分别为雷达对目标中心的方位角和 UXO 姿态角。

ARL 利用矩量法(MoM)对 UXO 进行电磁建模并与实测结果对比, 理论计算和实测结果均表明, UXO 散射特性随目标和雷达相对角度变化而变化, 但主要可以分成 3 个状态 (s_1, s_2 和 s_3), 如图 2 所示^[6]。UXO 在每个状态内, 散射特性变化比较缓慢, 分别代表了不同的散射机理。在 s_1 中, UXO 的头部或尾部的散射占主要部分; 在 s_2 中, UXO 的头部和尾部的散射占主要部分; 在 s_3 中, UXO 侧面散射占主要部分。

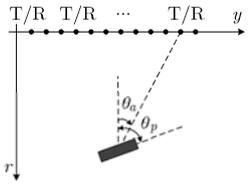


图1 UWB SAR 成像几何示意图(T/R 表示发射/接收)

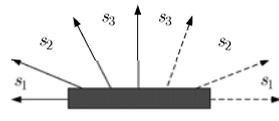


图2 UXO 3个散射状态示意图

因此当雷达平台沿方位向运动时, 不同孔径位置回波的散射特性和雷达-目标中心连线与 UXO 轴线的夹角 θ 有关, 而 θ 可以通过 θ_p 和 θ_a 确定。

3 UXO 特征提取及其不变矩表示

3.1 利用空间-波数分布提取 UXO 散射特征

ARL 通过子带-子孔径处理得到 ROI 图形切片对应不同子带-子孔径的图像切片序列, 利用某个子孔径中不同子带图像的峰值组成观测向量 \mathbf{x} , 得到 N 个子孔径对应的观测向量序列 $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1 \cdots \mathbf{x}_N)$ 。由于子带-子孔径处理为了获得目标散射的频率和方位信息, 只利用了部分带宽和部分积累孔径, 因此距离和方位分辨率都明显降低。图 3 是某 UXO 图像切片子孔径处理前后的结果, 其中 UXO 的 θ_p 为 65° , 子孔径积累角均为 20° , 其子孔径中心对应的方位角分别为 25° 和 -25° 。比较 3 幅图像可以发现: (1) 由于只做了子孔径处理, 距离向仍保持较高的分辨率而方位向分辨率明显降低; (2) 图 3(c) 的峰值幅度明显强于图 3(b) 的峰值幅度, 符合正侧闪烁现象。ARL 正是利用特定尺寸 UXO 正侧闪烁幅度变化的特定关系作为鉴别特征。

由于子带-子孔径处理牺牲了空间分辨率, ARL 只能提取散射函数不同频率和方位角对应的幅度特征。我们曾利用空间-波数变换(SWD)提取了地雷散射特征^[8], 但由于 UXO 3 种散射状态, 因此不能照搬地雷散射特征提取的那套方法。

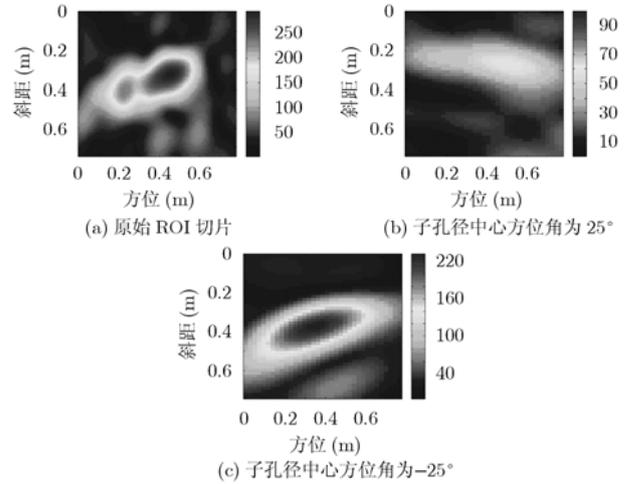


图3 姿态角为 30° 的 UXO 原始 ROI 切片和子孔径处理结果

为了抑制多散射中心之间的交叉项, 本文利用基于 Choi-Williams 分布(CWD)的 SWD(记为 CWD-SWD)进行 UXO 特征提取,

$$f_{\text{CWD}}(r, y, k_r, k_y) = \iiint \iiint \Phi(r', r''', y', y''') \cdot f\left(r'' + \frac{r'}{2}, y'' + \frac{y'}{2}\right) f^*\left(r'' - \frac{r'}{2}, y'' - \frac{y'}{2}\right) \cdot \exp[jr'''(r - r'')] \exp[jy'''(y - y'')] \cdot \exp(-jk_r r' - jk_y y') dr' dr'' dr''' dy' dy'' dy''' \quad (1)$$

式中 k_r 和 k_y 分别为斜距波数和方位波数, $\Phi(\cdot)$ 为抑制交叉项的核函数

$$\Phi(r', r''', y', y''') = \exp[-\alpha_r (r' r''')^2 - \alpha_y (y' y''')^2] \quad (2)$$

其中 α_r 和 α_y 非负, 分别为斜距和方位向的平滑参数, 控制交叉项抑制程度。

由式(1)可以获得频率 f 和方位角 θ_a 对应的目标二维散射能量函数的估计为

$$\hat{g}(r, y; f, \theta_a) = f_{\text{CWD}}(r, y, 4\pi f \cos \theta_a / c, 4\pi f \sin \theta_a / c) \quad (3)$$

式中 c 为电磁波在真空中的传播速度。

虽然 CWD-SWD 为了抑制交叉项会带来一定程度的分辨率损失, 但理论分析和实测数据处理结果均证明 CWD-SWD 能够保持与原始 ROI 图像切片相当的二维高分辨^[8]。图 3 (a) UXO 图像切片的 CWD-SWD 处理结果如图 4 所示, 能够清楚地发现图 4(a)和图 4(b)对应的 UXO 散射状态分别为 s_2 和 s_3 , 这与实际情况也是吻合的。由于保持了二维高分辨率, 从 CWD-SWD 处理结果中不仅能够得到幅度表征的正侧闪烁特征, 而且能够得到目标散射函数的空间分布特征。

3.2 利用不变矩表示 UXO 散射特征

本文同样利用幅度来表征正侧闪烁特征。这里取每幅图像前 20% 最大像素值的平均作为幅度特征, 并取对数减小动态范围。由于 SWD 在获得频率和方位散射信息的同时仍然保持了空间高分辨, 因此能够获得散射函数的空间分布特

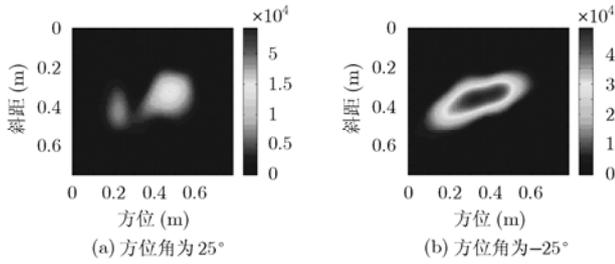


图 4 CWD-SWD 处理结果(频率为 1.1GHz)

征。但是由于同一散射状态而不同姿态角 UXO 的 CWD-SWD 结果之间存在平移和旋转, 所以不能直接将二维图像作为特征向量。

Hu 利用二阶和三阶中心矩构造的 7 个不变矩定量描述图像序列, 它们对图像具有良好的比例、旋转和平移不变性^[9]。同时考虑到不同深度 UXO 图像的整体强度不同, 首先对图像序列利用其最大值归一化, 然后计算 Hu 不变矩, 并取绝对值的对数来减小动态范围。姿态角分别为 45°, 65° 和 90° 的 3 个 UXO 对应 f 为 1.1GHz, θ_a 分别为 -15°, 5° 和 30° 的 CWD-SWD 图像的 7 个 Hu 不变矩如表 1 所示; 它们对应的 θ 相同, 因此处在相同的散射状态。表 1 表明 7 个不变矩具有较好的一致性, 产生误差的主要原因是存在噪声和图像的离散采样^[10]。

表 1 不同姿态角 UXO 在相同散射状态时的不变矩

不变矩 (log)	1	2	3	4	5	6	7
姿态角 45°	-0.34	-1.34	-3.80	-1.85	-5.93	-3.72	-4.67
姿态角 65°	-0.35	-1.32	-3.91	-1.81	-6.33	-4.21	-5.21
姿态角 90°	-0.36	-1.35	-4.02	-1.75	-5.21	-4.52	-4.33

基于 CWD-SWD 和不变矩表示, 利用某个频率下的 N 个方位角图像序列获取一组新的特征 $\mathbf{Y} = (\mathbf{y}_1 \cdots \mathbf{y}_N)$, 其中 $\mathbf{y}_n (n = 1, \dots, N)$ 为幅度特征加上 7 个不变矩组成的 8 维向量。在 Rail-GPSAR 系统实测数据中, 取 f 为 1.1GHz, θ_a 从 -30° 到 30° 间隔 5° 的 13 个值 ($N=13$)。频率参数取值主要出于两点考虑: (1) Rail-GPSAR 系统中心频率为 1.1GHz, 该频率附近发射功率最强; (2) 电磁建模结果表明, 试验中所用的 155mm 直径 UXO 的散射在 1.1GHz 附近有一个峰值。因此 UXO 在 f 为 1.1GHz 时的 CWD-SWD 具有较好的信噪比。而不同方位角之间相差 5° 是满足构造 HMM 的要求, 保证不会遗漏回波中应有的散射状态^[6]。关于频率和方位角的具体

取值跟系统参数、目标散射特性和环境因素都有关系, 因此最优取值问题需要进一步深入研究。

4 实测数据处理结果

4.1 Rail-GPSAR 系统简介

本文所用实测数据均来自于 Rail-GPSAR 系统。该系统是一部轨道地表穿透冲激 SAR, 信号有效频带为 300MHz 到 1.9GHz。轨道长约 24m, 天线高约 3.3m, 用于模拟机载 UWB SAR 条带成像方式。天线采用收发分置, 通过收发双天线的不同配置, 可以实现多极化工作模式。收发天线均为加脊平面 TEM 喇叭天线, 波束角为 $\pm 60^\circ$ 。Rail-GPSAR 系统可以一次完成约 88m² 场景的有效探测。在成像区域内有 6m×6m 深 1m 的人工坑, 用于获得不同土壤环境和埋地深度下的 UXO 数据。试验中采用的 UXO 模型可以近似为长度 840mm、直径 155mm 的圆柱体。

4.2 不同特征的检测结果比较

对于 ARL 所用的特征 \mathbf{X} 和本文提出的特征 \mathbf{Y} 都利用 HMM 进行鉴别。不同特征 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 的 HMM 是不同的, 分别记为 $\Gamma_{\mathbf{X}}$ 和 $\Gamma_{\mathbf{Y}}$ 。一旦确定了某一对象的 HMM 参数, 接下来只用从实际中获得观测值序列来对该 HMM 进行匹配, 便可以根据匹配度的大小来确定获得的观测值是否为该 HMM 所描述的对象。

试验中 UXO 埋设深度分别为表面和 15cm, 利用表面不同姿态角 UXO 数据训练 HMM, 然后对埋设深度 15cm 的 UXO 数据进行检测。UXO 埋设深度 15cm 时, 共进行了 8 次试验, 每次分别在黏土和沙土中各埋设 1 个 UXO, 8 次试验 UXO 的姿态均不相同。通过预筛选共得到 53 个怀疑目标, 其中有 16 个为 UXO, 其余 37 个为虚假目标。利用特征向量 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} 进行鉴别时, 接收机工作特性(ROC)曲线如图 5 所示, 在相同的检测概率时, 本文提出的新特征集 \mathbf{Y} 的虚警率更低, 检测性能更好。

5 结束语

本文研究了利用 UWB SAR 远距离探测浅埋 UXO 中的目标特征提取问题, 提出了一组基于 SWD 和不变矩表示的 UXO 鉴别新特征。本文提出的新特征优于 ARL 利用子带-子孔径处理得到的特征, 能够提高 UXO 检测性能。文中 Rail-GPSAR 系统实测数据均为 UXO 轴线与地面平行情况,

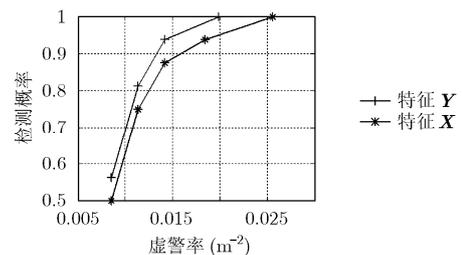


图 5 基于不同特征向量的 UXO 检测性能比较

这对于简化 UXO 散射状态有一定好处。实际中, UXO 也存在斜插入土壤的情况, 即 UXO 轴线与地面有一定夹角, 这时 UXO 散射状态会增加, 其 HMM 需要进行相应的修正。不过本文提出的特征提取方法仍然适用。我们将在以后的试验中录取相应数据, 结合修正后的 HMM 进一步检验本文特征提取方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] Morikawa M, Taylor S, and Persons M. Deaths and injuries due to unexploded ordnance (UXO) in northern Lao PDR (Laos). *Injury*, 1998, 29(4): 301-304.
 - [2] Billings S D. Discrimination and classification of buried unexploded ordnance using magnetometry. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(6): 1241-1251.
 - [3] Marr B, Torrione P, and Miller J, *et al.* Parameterized likelihood ratio method for EMI unexploded detection. *Proceeding of SPIE*, 2004, 5415: 843-854.
 - [4] Zhang Y, Collins L, and Carin L. Physics model based unexploded ordnance discrimination using wideband EMI data. *Proceeding of SPIE*, 2003, 5089: 1023-1034.
 - [5] Carin L, Geng N, and McClure M, *et al.* Wide-area detection of land mines and unexploded ordnance. *Inverse Problems*, 2002, 18(3): 575-609.
 - [6] Dong Y, Runkle P R, and Carin L, *et al.* Multi-aspect detection of surface and shallow-buried unexploded ordnance via ultra-wideband synthetic aperture radar. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(6): 1259-1270.
 - [7] Jin T, Zhou Z, and Chang W. Ultra-wideband SAR time-frequency representation image formation. *IEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2006, 153(5): 389-395.
 - [8] Jin T, Zhou Z M, and Chang W G, *et al.* Aspect-invariant feature extraction and associated landmine detector in UWB SAR. CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 607-610.
 - [9] Hu M K. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE Trans. Information Theory*, 1962, 8(2): 179-187.
 - [10] Gonzalez R C and Woods R E. *Digital Image Processing*. Second Edition, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 2002, ch.11.
- 金 添: 男, 1980 年生, 博士, 讲师, 研究方向为 SAR 成像处理与目标检测。
- 周智敏: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为雷达系统设计、实时信号处理等。