

超宽带合成孔径雷达金属地雷双峰特征增强算法

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: 机载超宽带合成孔径雷达(UWB SAR)探雷实用化的最大问题是虚警太多, 而增强金属地雷双峰特征有助于有效剔除虚警。该文基于双峰显著度最大准则, 提出了基于图像域后滤波器的双峰特征增强算法及后滤波器参数优化方法。实测数据处理结果表明, 该算法能够有效提高怀疑目标中金属地雷的双峰显著度, 从而提高最终金属地雷检测性能。

关键词: 合成孔径雷达; 地雷检测; 超宽带; 双峰特征; 特征增强

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)09-2077-04

The Double-peak Characteristic Enhancement Algorithm for Metallic Landmine Detection with UWB SAR

Jin Tian Zhou Zhi-min

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

Abstract: The major problem in air-borne Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) landmine detection is the too many false alarms in practical operation, while enhancement of metallic landmine double-peak feature will benefit elimination of false alarms efficiently. In this paper, based on the double-peak salience maximum criterion, the double-peak feature enhancement algorithm using the post-filter in image domain and the post-filter parameter optimization method are proposed. It is proved with field data processing results that the proposed double-peak enhancement algorithm can increase the double-peak salience of metallic landmines among those suspected targets and thus improve the final metallic landmine detection performance.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Landmine detection; Ultra-Wide Band (UWB); Double-peak characteristic; Feature enhancement

1 引言

利用机载超宽带合成孔径雷达(Ultra-Wide Band Synthetic Aperture Radar, UWB SAR), 可以大区域快速探测单个地雷和雷场, 具有安全和高效的优点。国外在上世纪九十年代就开始了机载和车载 UWB SAR 对浅地表埋设目标探测的研究, 其中典型的实验系统有: 美国陆军实验室(ARL)的车载 BoomSAR^[1], 美国斯坦福研究所(SRI)的机载 GP-SAR^[2]和车载 FLGPR^[3], 法国电子装备技术中心(CELAR)和微波光纤通讯研究所(IRCOM)联合研制 PULSAR 系统^[4]等。国内也开展了 UWB SAR 探雷的研究工作, 并建成了轨道地表穿透 SAR(Rail-GPSAR)试验系统。

Rail-GPSAR 系统是轨道地表穿透冲激 SAR, 信号有效频带为 300MHz 到 1.9GHz。轨道长约 24m, 天线高约 3.5m, 用于模拟机载 UWB SAR 条带成像方式。系统采用收发分置, 通过收发双天线的不同配置, 可以实现多极化工作模式。收发天线均为平面加脊 TEM 喇叭天线, 波束角为 $\pm 60^\circ$ 。Rail-GPSAR 系统及试验场地和试验中使用的 M6A1 金属地雷的光学照片如图 1 所示, 该地雷直径约 30cm, 高约 6cm。



图 1 Rail-GPSAR 系统及试验场地和 M6A1 金属地雷

由于机载 UWB SAR 探测场景较大, 整幅图像至少有十几平方公里(高空系统)或几百平方米(低空系统), 因此 UWB SAR 地雷检测通常分为预筛选和鉴别两步^[5]。预筛选的目的是得到若干包含怀疑目标的感兴趣区域(ROI), 而鉴别是将怀疑目标分成地雷和杂波。其中地雷鉴别又分为两步^[6]: 特征提取和鉴别器训练。金属地雷具有双峰特征, SRI 的 FLGPR 系统利用基于双峰特征的广义似然比检验(GLRT)鉴别器^[3]和最优偏差(Deflection-Optimal)鉴别器^[7]有效提高了地雷检测性能。我们通过电磁模型和实测数据定量分析并验证了双峰特征与地雷尺寸和入射角等参数的关系, 指出双峰分别对应地雷上表面圆周的前沿和后沿散射^[8]。但是实测

数据显示,金属地雷双峰中的一个可能湮没在杂波背景中造成双峰特征减弱甚至丧失,这将严重影响金属地雷检测性能。

本文首先建立了金属地雷双峰电磁模型,然后分析了成像算法不能同时对双峰精确聚焦的原因。针对双峰特征减弱甚至丧失的问题,本文提出了基于图像域后滤波的双峰特征增强算法,该算法能够根据地雷图像切片自适应调整滤波器最优参数获得最佳双峰特征增强效果。Rail-GPSAR 系统实测数据处理结果表明,本文提出的方法能够有效增强怀疑目标中地雷的双峰特征,达到提高检测性能的目的。

2 地雷双峰聚焦特性分析

2.1 金属地雷双峰结构电磁模型

我们曾利用物理光学(PO)法建立了金属地雷散射模型,在一定近似条件下得到了地雷回波解析式,定量表征了双峰结构与地雷尺寸和入射角等因素的关系^[8]。下面直接给出后面讨论中要用到的相关结论,省略了具体推导过程。

浅埋地雷可以简化成半径为 a , 高度为 h 的圆柱体,地雷上表面距地面距离设为 d 。浅埋地雷一维回波频谱 $S_r(k)$ 为
$$S_r(k) = P(k)H_{\text{soil}}(k, \theta_i, \varepsilon_r) \{A_1 \exp[-j2k(\rho_0 - a \sin \theta_i)] + A_2 \exp[-j2k(\rho_0 + a \sin \theta_i)]\} \quad (1)$$

式中 $P(k)$ 为发射信号频谱, A_1 和 A_2 分别表示双峰散射的幅度, θ_i 为目标入射角, ε_r 为土壤复相对介电常数, ρ_0 为天线到地雷上表面圆心在地面投影点的距离, $H_{\text{soil}}(\cdot)$ 表征折射和色散对回波的影响,

$$H_{\text{soil}}(k, \theta_i, \varepsilon_r) = T(\theta_i, \varepsilon_r) \exp(-j2kd\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) \quad (2)$$

其中 $T(\cdot)$ 为电磁波在两次通过空气和土壤界面的透射系数。

由式(1)可知,地雷双峰对应的时沿 t_1 和 t_2 分别为

$$t_1 \approx 2(\rho_0 + d\sqrt{\varepsilon'_{r,\infty} - \sin^2 \theta_i} - a \sin \theta_i) / c \quad (3)$$

$$t_2 \approx 2(\rho_0 + d\sqrt{\varepsilon'_{r,\infty} - \sin^2 \theta_i} + a \sin \theta_i) / c \quad (4)$$

式中 $\varepsilon'_{r,\infty}$ 为土壤复介电常数在高频时的实部。

由双峰延时表达式(3)和式(4)可知,双峰对应的位置为雷达与地雷上表面圆心连线在上表面的投影与圆周的两个交点。因此双峰为地雷上表面前沿和后沿产生的散射,与文献[9]得到的结论是一致的。由于地雷具有轴对称特性,因而不同孔径位置接收的地雷回波的双峰间距基本保持不变,前沿和后沿散射位置随着雷达平台的运动在圆周上移动。因此地雷回波中的双峰结构不能作为两个等效散射中心来处理。

2.2 地雷双峰结构对 SAR 成像的影响

下面利用后向投影(BP)算法说明地雷双峰结构对 SAR 成像的影响。SAR 只有二维成像能力,其成像问题均在斜距平面 r - y 上讨论,其中 r 和 y 分别称为斜距和方位。BP 算法的基本原理是沿成像区域中各点对应的积累轨迹进行相干叠加实现方位压缩。但是根据建立的地雷电磁模型,地雷双峰不能看成两个等效散射中心。因此利用 BP 算法对地雷成像时,积累轨迹与回波轨迹不重合,将引起散焦。

设地雷上表面圆心在成像平面上的坐标为 (r_0, y_0) 。由式(3)和式(4)可知,当折射和色散校正后,双峰的回波轨迹在 t - u 平面分别为

$$t - \frac{2}{c}(\sqrt{r_0^2 + (u - y_0)^2} - a \sin \theta_i) = 0 \quad (5)$$

$$t - \frac{2}{c}(\sqrt{r_0^2 + (u - y_0)^2} + a \sin \theta_i) = 0 \quad (6)$$

利用 BP 算法对地雷成像时,地雷图像可以近似表示为
$$f_M(r, y) = f_{\text{PSF}}(r, y) \otimes_r \otimes_y [A_1 f_1(r, y) \otimes_r \delta(r - r_0 + a \sin \theta_i) + A_2 f_2(r, y) \otimes_r \delta(r - r_0 - a \sin \theta_i)] \otimes_y (y - y_0) \quad (7)$$

式中 A_1 和 A_2 分别表示双峰散射的幅度, \otimes_r 和 \otimes_y 分别表示对 r 和 y 的卷积, $f_{\text{PSF}}(r, y)$ 表示理想点目标的点扩展函数(PSF), $f_1(r, y)$ 和 $f_2(r, y)$ 分别表示前峰和后峰由于积累轨迹与回波轨迹不一致引起的散焦,

$$f_1(r, y) = FT_{r,y}^{-1}[\exp(j0.5a \sin \theta_i k_y^2 / k_r)] \quad (8)$$

$$f_2(r, y) = FT_{r,y}^{-1}[\exp(-j0.5a \sin \theta_i k_y^2 / k_r)] \quad (9)$$

其中 k_r 和 k_y 分别为斜距波数和方位波数, $FT_{r,y}^{-1}[\cdot]$ 表示对 r 和 y 的二维逆 Fourier 变换。

3 地雷双峰特征增强算法

3.1 双峰散焦校正方法

BP 算法对地雷目标成像时引起的散焦可以利用图像域滤波的方法进行校正:

$$f'_M(r, y; r_M) = FT_{r,y}^{-1}\{FT_{r,y}[f_M(r, y)]H(k_r, k_y, r_M)\} \quad (10)$$

式中 $FT_{r,y}[\cdot]$ 表示对 r 和 y 的二维 Fourier 变换, $H(k_r, k_y, r_M)$ 为图像二维频域(也称为波数域)滤波器,

$$H(k_r, k_y, r_M) = \exp(j0.5r_M k_y^2 / k_r) \quad (11)$$

其中 r_M 为滤波器参数。当 $r_M = -a \sin \theta_i$ 时,前峰散焦被完全校正,当 $r_M = a \sin \theta_i$ 时后峰散焦被完全校正,不过地雷双峰的散焦不可能同时被完全校正。由于图像域滤波是针对成像之后的 SAR 图像进行,相对于成像之前在回波域进行的滤波操作而言, $H(\cdot)$ 也称为后滤波器。

鉴别利用的是双峰特征,而沿二维图像切片中心的一维斜距像完全能够体现双峰特征,因此利用该一维距离像作为鉴别器特征向量不仅没有损失信息,而且降低了特征向量维数从而提高了鉴别器学习和分类的效率。同时为了解决不同埋设深度时,土壤对目标回波能量衰减不同的问题,本文对沿二维图像切片中心的一维斜距像利用其最大值进行归一化处理,处理后的结果简称为归一化一维斜距像。

3.2 后滤波器参数的确定

通过前面分析可以知道,不存在最佳后滤波器参数使得双峰散焦同时精确校正,从而使得双峰 SCNR 等指标同时达到最好。但实际数据存在相干斑噪声等干扰,地雷图像切片的双峰特征往往不明显;这时存在最佳后滤波器参数 r_M^* 使得地雷双峰特性最显著。

基于 GLRT 鉴别器原理,本文利用主成分分析(PCA)定量衡量双峰显著度。首先利用 m 个双峰特征比较明显的地

雷 ROI 切片构造矩阵 \mathbf{X} ; \mathbf{X} 的列向量为每个地雷切片的归一化一维斜距像。对 \mathbf{X} 进行奇异值分解(SVD):

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V} \quad (12)$$

式中 \mathbf{S} 为对角矩阵, 对角线元素 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$ 从大到小依次排列。

取矩阵 \mathbf{U} 前 m' 列构成矩阵 $\tilde{\mathbf{U}}$, 取矩阵 \mathbf{S} 前 m' 个对角线的值构成矩阵 $\tilde{\mathbf{S}}$ 。 m' 的选取根据矩阵 \mathbf{S} 前 m' 个对角线元素的和与所有元素和的比值进行选取, m' 的经验值为 1 到 3^[3]。在本文实际数据处理结果中, 取 $m' = 2$ 。

于是怀疑目标双峰特征显著度定义为

$$\Upsilon = \mathbf{z}^H \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{S}} \tilde{\mathbf{U}}^H \mathbf{z} \quad (13)$$

式中 \mathbf{z} 为怀疑目标图像切片经过后滤波之后的归一化一维斜距像。

最优后滤波器参数 r_M^* 使得 Υ 达到最大, 即

$$r_M^* = \arg \max_{r_M} \Upsilon \quad (14)$$

不同 ROI 切片的 θ_i 不同, 从而相应的 r_M^* 值也不同, 需要针对每个 ROI 切片利用式(14)分别确定。虽然有些怀疑目标 ROI 切片也存在两个散射点, 但与地雷双峰表现出的不同方位角双峰间距恒定的特性相差甚远。因此本文提出的双峰特征增强算法只对怀疑目标中的地雷目标有效; 后面实测数据处理结果也验证了这一结论。

通过前面对双峰特性的分析可知, $r_M^* \in [-a \sin \theta_i, a \sin \theta_i]$, 因此可以通过穷举法得到式(14)的解。为了提高计算效率, 实测数据处理时采用直接法(也称为 0.618 法)^[10]求解式(14)。

4 实测数据处理结果

4.1 地雷双峰散焦校正结果

实测数据为 Rail-GPSAR 系统黏土环境的 M6A1 型金属反坦克地雷数据。每次试验埋设 5 颗地雷, 埋设深度分别为地表(surface), 浅埋(flush), 5cm, 10cm, 15cm, 20cm。经过 CFAR 检测, 共有检测到 93 个怀疑目标, 其中包括 30 个地雷目标和 63 个杂波。63 个杂波当中包括土块、石头等自然杂波和螺丝钉、锡纸团等事先布置的人造杂波。

利用 Rail-GPSAR 系统数据中一个具有典型双峰结构的 M6A1 地雷图像切片获取不同后滤波器参数下相应的图像, 双峰幅度随 r_M 变化曲线如图 2 所示。M6A1 地雷的半径约为 0.15m, 该目标对应的入射角为 72° 。当 $r_M = -0.14$ (即 $-a \sin \theta_i$) 时, 前沿散射完全聚焦积累, 峰值幅度达到最大; 当 $r_M = 0.14$ (即 $a \sin \theta_i$) 时, 后沿散射完全聚焦积累, 峰值幅度达到最大。图 2 的曲线进一步证明了对地雷双峰结构散射机理的分析是正确的。

4.2 双峰特征增强结果及其对检测性能的提高

对预筛选得到的 93 个怀疑目标均进行双峰特征增强处理, 处理前后地雷和杂波平均双峰显著度指标如表 1 所示。地雷双峰特征得到增强, 而杂波的双峰显著度指标几乎没有

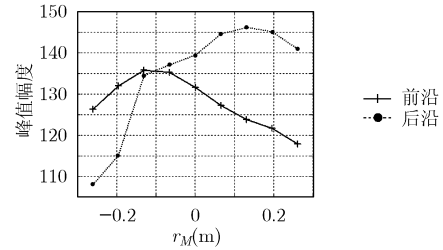


图 2 双峰幅度与后滤波器参数 r_M 的关系

表 1 双峰特征增强前后地雷和杂波平均双峰显著度比较

平均双峰显著度	增强前	增强后
地雷	132	175
杂波	114	119

变化。

我们曾提出了基于方位不变特征的超球面支持向量机地雷鉴别器^[11, 12]。利用该鉴别器对双峰特征增强前后的数据进行处理, 采用交叉验证的方法统计地雷检测性能。双峰特征增强前后, 超球面支持向量机的接收机工作特性(ROC)曲线如图 3 所示; 当检测概率为 0.9 时, 特征增强前后的虚警率分别为 0.035m^{-2} 和 0.017m^{-2} , 检测性能明显提高。

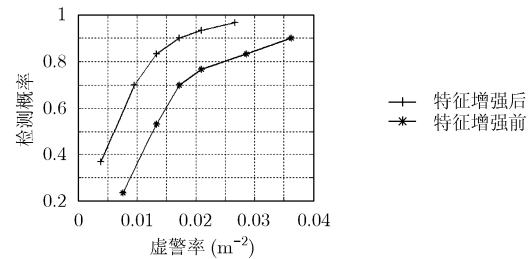


图 3 双峰特征增强前后金属地雷检测性能比较

5 结束语

本文提出了基于后滤波方法的金属地雷双峰特征增强算法, 能有效提高金属地雷鉴别器输入特征的有效性。Rail-GPSAR 系统实测数据处理结果也验证了该算法能够有效增强怀疑目标中金属地雷的双峰特征, 从而提高基于双峰特征的金属地雷鉴别器检测性能。本文主要针对金属地雷进行研究, 试验表明, 塑料地雷上表面前沿和后沿的散射也会产生双峰^[13], 同时由于电磁波会穿透塑料表壳进入地雷内部, 因此塑料地雷的散射特征更加复杂。如何有效增强塑料地雷特征从而提高塑料地雷检测性能是下一步的研究重点之一。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Vickers R S. Design and applications of airborne radars in the

- VHF/UHF band. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2002, 17(6): 26-29.
- [3] Kositsky J, Cosgrove R, and Amazeen C, *et al.* Results from a forward-looking GPR mine detection system. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4742: 206-217.
- [4] Andrieu J, Gallais F, and Mallepeyre V, *et al.* Land mine detection with an ultra-wideband SAR system. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4742: 237-247.
- [5] Kaplan L M, McClellan J H, and Oh S M. Prescreening during image formation for ultrawideband radar. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronics Systems*, 2002, 38(1): 74-88.
- [6] Sun Y and Li J. Adaptive learning approach to landmine detection. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(3): 973-985.
- [7] Cosgrove R B, Milanfar P, and Kositsky J. Trained detection of buried mines in SAR images via the deflection-optimal criterion. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(11): 2569-2575.
- [8] 金添, 宋千, 孙晓坤, 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. *电子学报*, 2006, 34(12): 2246-2249.
- Jin T, Song Q, Sun X K, and 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.
- [9] Vitebskiy S, Carin L, and Ressler M A, *et al.* Ultra-wideband, short-pulse ground-penetrating radar: Simulation and measurement. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 762-772.
- [10] 粟塔山, 彭维杰, 周作益, 曾之华. 最优化计算原理与算法程序设计. 长沙: 国防科技大学出版社, 2001: 36-37.
- [11] 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.
- [12] 金添, 周智敏, 宋千. 一种基于空间-波数分布的超宽带 SAR 地雷目标特征提取新方法. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 114-121.
- Jin T, Zhou Z M, and Song Q. A novel ultra-wideband SAR landmine target feature extraction method using space-wavenumber distribution. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(1): 114-121.
- [13] Sun Y and Li J. Time-frequency analysis for plastic landmine detection via forward-looking ground penetrating radar. *IEEE Proceedings: Radar, Sonar and Navigation*, 2003, 150(4): 253-261.
- 金添: 男, 1980年生, 讲师, 博士, 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.