

超宽带 SAR 探雷试验系统

周智敏 金添 宋千 常文革 孙晓坤 杨延光

(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 SAR 能够穿透地表远距离探测雷场或单个地雷。该文详细介绍了国防科技大学的超宽带 SAR 探雷系统: Rail-GPSAR 系统及其信息处理技术。通过大量的外场试验证明, Rail-GPSAR 系统能够有效检测到土壤中埋设的地雷。

关键词: 超宽带; 合成孔径雷达; 探雷

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)08-1805-04

Ultra-Wide Band SAR Landmine Detection Experimental System

Zhou Zhi-min Jin Tian Song Qian Chang Wen-ge Sun Xiao-kun Yang Yan-guang

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

Abstract: Ultra-wide band SAR has the capability of detecting minefield and single mine from a safe standoff distance. In this paper, an ultra-wide band SAR landmine detection experimental system, referred as Rail-GPSAR system, with its information processing techniques are introduced, which is developed by the National University of Defense Technology (NUDT). It is concluded from large amounts of experiment results that the ultra-wide band SAR system can detect landmines buried under the ground.

Key words: Ultra-wide band; SAR; Landmine detection

1 引言

超宽带SAR具有穿透地表获取埋设目标,如地雷、未爆炸武器等,二维高分辨率雷达图像的能力。机载和车载超宽带SAR能远距离探测雷场或单个地雷,并且能在较短的时间内完成大面积区域的探测,具有安全和高效的特点。国外在上世纪九十年代就开始了机载和车载超宽带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],英国国防部DERA研究局的飞艇载系统Mineseeker^[4],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^[5]等。国内国防科技大学也开展了超宽带SAR探雷的研究工作,并建成了轨道地表穿透SAR(Rail-GPSAR)试验系统及试验外场,开展超宽带SAR浅地表成像试验及目标检测等基础理论研究。外场试验表明,Rail-GPSAR系统能够有效地检测各种土壤中埋设的地雷目标,为下一步的工作奠定了基础。

2 Rail-GPSAR 系统构成

Rail-GPSAR 系统由 6 部分组成:超宽带天线,冲激信号源,超宽带接收机(包括低噪声放大器和示波器等),时序控制部分,主控计算机和轨道试验系统(包括轨道、小车和定位系统等),工作原理如图 1 所示。

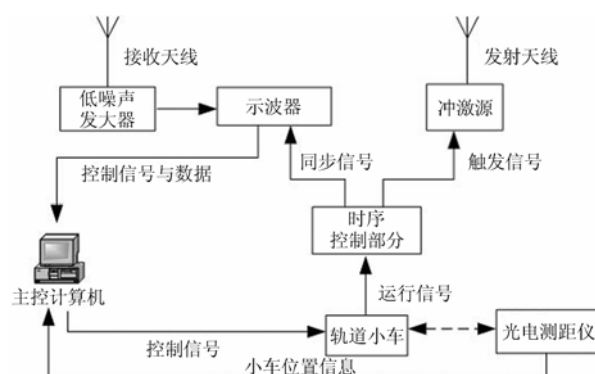


图 1 Rail-GPSAR 系统构成

脉冲产生器受轨道小车工作状态控制,产生系统的全部时序,如冲激源触发信号和示波器同步信号等。脉冲产生器触发冲激源产生冲激信号,由超宽带发射天线向外辐射;目标回波经超宽带接收天线和低噪声放大器做高通滤波和放大后,由示波器根据同步信号进行采样,并最终将采样数据经过局域网传送至主控计算机,完成数据处理与显示。同时在工作期间,主控计算机通过串口控制小车沿轨道匀速直线移动,小车输出工作状态信号给脉冲产生器。光电测距仪完成对小车位置的精确测量,并将测量数据通过串口传送到主控计算机,用于事后数据校正或轨道调整。

超宽带SAR探雷试验系统采用轨道SAR正侧视条带工作模式,轨道长约 24m,天线架高约 3.4m。测绘带近端和远端的俯视角分别约为 35° 和 10°。收发天线均为平面TEM喇叭天线,波束角为 ±60°。Rail-GPSAR可以快速对前面约

88m²的场地进行成像。

3 Rail-GPSAR 信息处理技术

3.1 耦合和射频干扰抑制处理

耦合信号和射频干扰是成像预处理的关键环节。耦合信号包括天线直接耦合和地面耦合信号。收发天线直接耦合信号非常强,并且其振铃一直延续到测绘带区域,严重影响成像与检测。雷达在侧视工作模式下,尽管地面耦合信号没有下视工作时严重,但是侧视模式的探测距离和范围比下视模式下大得多,因此地雷目标的信杂比很小。

我们采用分段平均相减的方法抑制全部天线直接耦合信号和大部分地面耦合信号。将二维回波信号 $s(t, u)$ 沿方位向 u 分成 K 端,第 j 段数据表示为 $s_j(t, u)$ 。将 j 端内的每条距离线减去 j 端回波沿方位向的均值得到抑制之后的信号 $s'_j(t, u)$ 如式(1)所示

$$s'_j(t, u) = s_j(t, u) - \frac{1}{N} \sum_{i=jN+1}^{(j+1)N} s(t, u_i), \quad j = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

利用式(1)抑制了全部天线直接耦合信号和大部分地面耦合信号。对于剩余的一部分地面耦合信号,我们采用对成像之后的结果进行带通滤波,进一步抑制耦合信号。

超宽带 SAR 工作在低频区,此频段内存在广播、电视和移动通信等射频信号。射频信号与目标回波幅度相当,甚至更强,使得最终图像中出现网格状的干扰,同样影响成像和检测。因此耦合信号和射频干扰抑制的效果直接影响了最终目标检测的性能。

对于射频干扰的抑制,我们利用目标回波和射频信号在二维频率域的支撑区域不同,分别估计每个快时间频率单元回波能量 $E_s(f)$ 和射频信号能量 $E_{r_{fi}}(f)$,然后自适应地构造滤波器抑制射频干扰。滤波器的频率响应为

$$H(f) = \frac{E_s(f)}{E_s(f) + E_{r_{fi}}(f)} \quad (2)$$

通过式(2)的滤波器,射频干扰得到了有效的抑制。对实际数据处理的结果如图2所示,图中右侧的色彩条表示 SAR 图像的电平幅度。

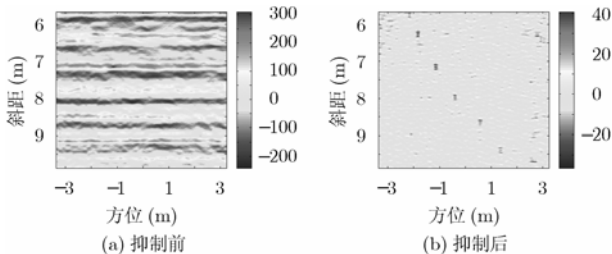


图2 耦合和射频干扰抑制

3.2 成像算法

超宽带SAR工作在低频区,为了获得二维的高分辨,需要大的相对带宽和大积累角。这些特点使得高波段SAR成像中的菲涅尔近似不再成立,超宽带SAR距离和方位存在严重的耦合,并且具有空变特性。针对上述特点, $\omega-k$ 和后向投

影(BP)算法被普遍认为适合超宽带SAR成像处理。 $\omega-k$ 在二维频域进行,计算效率高,但是运动补偿困难。BP是时域算法,能够较好地结合运动补偿,但计算效率不高。为了提高BP的计算效率,可以采用快速BP(FBP)算法,其计算量与 $\omega-k$ 等基于FFT的算法相当^[6]。当地雷埋设在土壤中时,由于地表面的折射和土壤的色散效应,使得传统FBP成像算法得到的图像散焦,并且出现了定位误差。我们利用折射及色散补偿(Refraction and Dispersion Compensation, RDC)因子 $A(d, \hat{\varepsilon}_r, \theta_{t0})$ 补偿回波中的折射和散射效应^[7]:

$$A(d, \hat{\varepsilon}_r, \theta_{t0}) = \exp(j2wd \operatorname{Re}(\sqrt{\hat{\varepsilon}_r} \cos \theta_{t0})) \quad (3)$$

式中 w 为角频率, $\operatorname{Re}(\cdot)$ 表示取复数的实部, d 和 $\hat{\varepsilon}_r$ 分别为成像深度和土壤相对复介电常数的估计, θ_{t0} 为名义复折射角

$$\theta_{t0} = \arcsin\left(\frac{r_c}{\hat{\varepsilon}_r \sqrt{r_c^2 + H^2}}\right) \quad (4)$$

式中 H 和 r_c 分别为天线距地面高度和成像区域中心的斜距。

引入 RDC 因子的固定积累角 BP 算法为

$$f(r, y) = \int h\left(\frac{u-y}{r}\right) \operatorname{FT}_t^{-1}[\operatorname{FT}_t[s(t, u)]A(d, \hat{\varepsilon}_r, \theta_{t0})] \cdot \delta\left(t - \frac{2}{c}\sqrt{r^2 + (y-u)^2}\right) du \quad (5)$$

式中 r, y 分别表示距离(斜距)和方位, $s(t, u)$ 为 SAR 原始回波,它是快时间 t 和孔径位置 u 的二维函数, $h(\cdot)$ 为窗函数用于控制孔径形状和抑制旁瓣, $\operatorname{FT}_t[\cdot]$ 和 $\operatorname{FT}_t^{-1}[\cdot]$ 分别对 t 的 Fourier 变换算子和逆 Fourier 变换算子, $\delta(\cdot)$ 为 Dirac 函数。

补偿前后的结果如图3所示,图中右侧的色彩条表示 SAR 图像的电平幅度。5 颗 M6A1 地雷埋设于干黏土中 15cm。补偿前的平均距离和方位分辨率分别为 0.13m 和 0.21m,距离向平均定位误差约 0.5m;补偿后的平均距离和方位分辨率分别为 0.12m 和 0.14m,距离向平均定位误差小于 0.1 米。

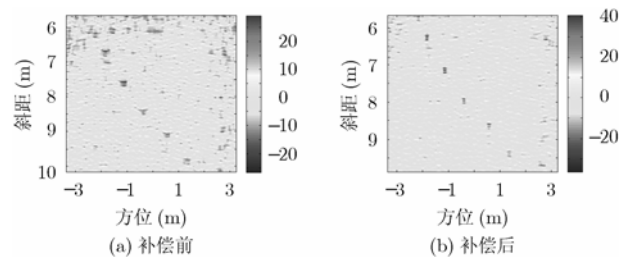


图3 埋设深度 0.15m 地雷的电平幅度 SAR 图像

3.3 目标检测

目标检测是超宽带 SAR 探雷实用化的重要方面,但实现对地雷目标的检测难度极大。首先地雷目标小,反射很弱,导致目标回波亦很弱;其次地雷埋设于土壤中,土壤对信号的衰减使得信杂比(SCR)进一步降低。因此利用基于能量信息如 CFAR 等检测方法时,为了保证高的地雷检测概率,虚警也会相当多。如何有效检测地雷并最大程度地减小虚警概是国内外同样面临的难题。目前普遍采用的方法为先利用能量信息提取若干怀疑目标,然后根据地雷的目标特性设计相

应的检测器进一步剔除杂波。

3.3.1 地雷电磁建模 为了针对地雷设计合适的检测器,首先需要了解地雷的电磁特征。地雷的电磁建模问题与一般电磁建模问题相比具有其特殊性。首先,浅地表地雷的电磁建模是在有耗色散半空间中进行,许多成熟的自由空间的方法不能照搬;其次,地雷一般可以看成旋转轴垂直于地面的旋转体^[8],利用旋转体对称性质可以简化运算。基于上述特点,不少学者提出地雷目标电磁建模的方法,其中具有代表性有矩量法(MoM)^[9]和物理光学法(PO)^[10]。由于PO方法利用了高频近似,计算量比MoM方法明显减小。我们利用PO方法得到的M6A1地雷电磁建模理论结果和实测结果的包络幅度如图4所示,极化方式为VV和HH极化,名义入射角为60°。理论和实测结果显示地雷回波具有双峰结构,这与SRI的FLGPR探雷SAR系统的实测结果是一致的^[3]。由于PO方法利用了高频近似,理论结果与实际回波有一定差异,如双峰间距。因此在后面的检测器训练中,仍利用实测结果中的部分数据。目前电磁建模的意义在于指导检测器的设计,更精确的理论模型需要进一步研究,希望达到利用电磁建模结果训练检测器的应用程度。

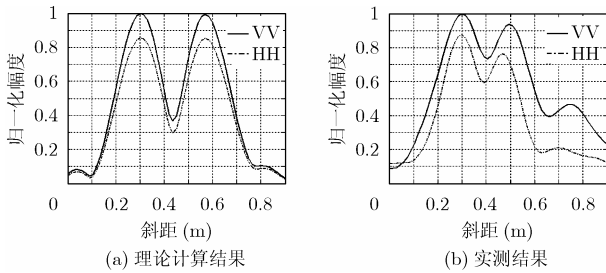


图4 M6A1地雷的包络幅度距离像

3.3.2 广义似然比检验融合检测器 由上面的电磁建模结果可知,地雷的SAR图像具有双峰特征。利用双峰特征构造的基于主分量分析(PCA)的广义似然比检验(GLRT)检测器^[3]和最优偏差(Deflection-Optimal)检测器^[11]均能用于地雷的进一步检测。双峰结果在SAR图像上表现为两个亮点,但是不能看成两个等效散射中心。地雷回波的双峰结构更类似谐振模型,因此它们不能同时精确聚焦^[12]。没有达到最佳的相干积累可能会使地雷双峰中的一个湮没在强相干斑噪声和杂波背景之中,从而在SAR图像中表现为单峰结构。虽然在利用能量信息的预处理中,地雷能被作为怀疑目标提取出来,但在后面利用目标特性进一步检测时会被误判为杂波。

针对双峰特征丢失影响检测性能的问题,我们提出了一种利用滤波器组获取图像序列,然后进行广义似然比检验融合的新方法。Rail-GPSAR实测数据检测结果表明,广义似然比检验融合(Generalized Likelihood Ratio Test Fusion, GLRTF)检测器能充分利用地雷的双峰特征,比文献[3]的广义似然比检验(Generalized Likelihood Ratio Test, GLRT)检测器具有更好的检测性能。

首先利用CFAR从SAR图像 $f(r, y)$ 中提取若干怀疑目

标切片 $f_i(r, y)$,然后利用全通滤波器 $H(k_r, k_y; \tau)$ 获取该目标对应不同时移参数 τ 的图像序列:

$$f_i(r, y; \tau) = \text{FT}_{r,y}^{-1}[\text{FT}_{r,y}(f_i(r, y))H(k_r, k_y; \tau)] \quad (6)$$

式中 $\text{FT}_{r,y}(\cdot)$ 和 $\text{FT}_{r,y}^{-1}(\cdot)$ 分别为对 r 和 y 的二维傅里叶变换和逆变换。

全通滤波器 $H(k_r, k_y; \tau)$ 为^[12]

$$H(k_r, k_y; \tau) = \exp\left[j\tau \frac{c}{2} \text{sgn}(k_r) \sqrt{k_r^2 + k_y^2}\right] \quad (7)$$

式中 k_r 和 k_y 分别为斜距波数和方位波数, $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数。

GLRTF检测器的训练与文献[3]中GLRT检测的训练类似。取双峰特性明显的地雷目标切片作为训练样本,其目标中心对应的一维距离像记为 \mathbf{x} , \mathbf{x} 为 $n \times 1$ 的列向量。利用若干训练样本构造矩阵 \mathbf{X} ,每个切片的一维距离像作为 \mathbf{X} 的一列,对 \mathbf{X} 进行奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD):

$$\mathbf{X} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V} \quad (8)$$

其中 \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,文献[3]中 m' 的经验值为1到3。实际数据处理结果表明, $m' = 2$ 比较合适,下面如果不另外说明,我们均取2。

当需要对某怀疑目标进行检测时,我们利用式(7)获得怀疑目标 k 个不同时移参数下的图像切片,分别取其目标中心对应的一维距离像,记为 $\{\mathbf{z}_i\}_{i=1}^k$ 。

则GLRTF检测器的检测规则为

$$\gamma = \text{sgn}\left(\max\left\{\left\{\mathbf{z}_i^H \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\mathbf{S}} \tilde{\mathbf{U}}^H \mathbf{z}_i\right\}_{i=1}^k\right\} - \eta\right) \quad (9)$$

其中 η 为判决门限。当 $\gamma = 1$ 时,怀疑目标判为地雷; $\gamma = -1$ 时,怀疑目标判为杂波。

分别用GLRTF检测器和GLRT检测器对Rail-GPSAR埋设深度为浅埋,5cm, 10cm, 10cm和20cm的M6A1地雷实测数据进行检测。利用一部分具有典型双峰结构的地雷样本训练检测器,然后对剩下的样本进行检测。取若干个不同的判决门限 η 就可以得到不同的检测概率及其对应的虚警, GLRTF和GLRT检测器的接收机工作特性(Receive Operating Characteristic, ROC)曲线如图5所示。GLRTF检测器在检测概率0.9时,虚警为0.29/m²,比GLRT检测

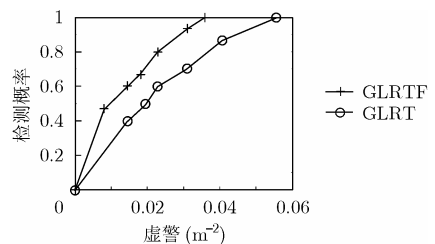


图 5 GLRTF 检测器与 GLRT 检测器的 ROC 曲线器具有更好的检测性能。

4 结束语

目前的研究和试验表明,超宽带 SAR 是探雷的一种有效手段,在雷场探测方面极有应用前景。但要将其实用化,还有许多问题有待研究和改进,如进一步提高雷达的分辨力,杂波和目标特性的研究,目标检测和识别技术研究等。相信随着这些技术问题的逐步解决,超宽带 SAR 在地雷探测方面大显身手的时间为期不远。

参 考 文 献

- [1] Carin L, Geng N, McClure M, Dong Yanting, Liu Zhijun, He Jiangqi, Sichina J, Ressler M, Nguyen L, and Sullivan A. 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 & Electronics Systems Magazine*, 2002, 17(6): 26-29.
 - [3] Kositsky J, Cosgrove R, Amazeen C, and Milanfar P. Results from a forward-looking GPR mine detection system. Proc. of SPIE, 2002, vol. 4742: 206-217.
 - [4] <http://www.mineseeker.org>, MINESEEKER FOUNDATION PERSHORE Trials Report, 2001.
 - [5] Andrieu J, Gallais F, Mallepeyre V, Bertrand V, Beillard B, and Jecko B. Land mine detection with an ultra-wideband SAR system. Proc. Of SPIE, 2002, vol. 4742: 237-247.
 - [6] Ulander L M H, Hellsten H, and Stenström G. Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic System*, 2003, 39(3): 760-776.
 - [7] Jin T, Zhou Z, and Chang W. Modified wavefront reconstruction imaging formation for stand-off GPEN SAR. *Electronics Letters*, 2005, 41(10): 63-64.
 - [8] Carin L, Kapoor R, and Baum C E. Polarimetric SAR imaging of buried landmines. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(6): 1985-1988.
 - [9] Vitebskiy S, Carin L, Ressler M A, and Le F H. Ultra-wideband, short-pulse ground-penetrating radar: Simulation and measurement. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(3): 762-772.
 - [10] Casey K F and Oetzel G N. Physical-optics models for scattering from buried mines. Proc. of the second Australian-American Joint Conference on the Technology of Mine Countermeasures, Sydney, Australia, 2001: 1-15.
 - [11] 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.
 - [12] Rau R and McClellan J H. Focusing resonance signatures in ultra-wideband SAR images by allpass filtering. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, 9(9): 1640-1644.
- 周智敏: 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 电子学会高级会员, 主要从事超宽带 SAR 系统技术及高速实时信号处理等研究工作.
- 金 添: 男, 1980 年生, 博士, 主要从事 SAR 成像算法、目标检测识别、数据融合等研究工作.
- 宋 千: 男, 1973 年生, 副教授, 主要从事实时信号处理等研究工作.
- 常文革: 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要从事 SAR/ISAR 信号处理、自适应信号处理等研究工作.
- 孙晓坤: 女, 1979 年生, 博士, 主要从事目标电磁建模等研究工作.
- 杨延光: 男, 1980 年生, 博士, 主要从事阵列信号处理和目标检测等研究工作.