

## 超宽带 SAR 浅地表地雷聚焦与定位技术

金添 周智敏 宋千 常文革

(国防科学技术大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

**摘要:** 机载或车载超宽带合成孔径雷达可以大区域快速探测单个地雷和雷场,是探雷的发展趋势。由于传统成像算法基于均匀媒质的假设,在浅地表目标成像中不再适应。该文首先建立了浅地表目标回波模型,定量分析了折射和色散对成像的影响。基于回波模型,提出了分别在回波域和图像域补偿折射和色散影响的浅地表后向投影(Subsurface Back-Projection, SBP)成像算法。但是对未知区域进行地雷探测时,无法获得目标埋设深度和入射角先验信息。针对这个问题,提出了基于图像域 SBP 成像算法的粗、精补偿分级处理流程,实现了大区域多目标精确聚焦定位。最后利用 Rail-GPSAR 探雷试验系统实测数据验证了该文方法的有效性。

**关键词:** 超宽带合成孔径雷达; 浅地表成像; 聚焦; 定位

中图分类号: TN959.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)10-2384-04

## Focusing and Locating of Subsurface Landmines in Ultra-wideband SAR

Jin Tian Zhou Zhi-min Song Qian Chang Wen-ge

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

**Abstract:** Air- or vehicle-borne Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) can detect landmines or minefields over large area quickly, which is a trend of landmine detection. Traditional image formations, based on even medium assumption, are not suitable to the subsurface target imaging. In this paper, a subsurface target echo model is firstly developed to analyze the refraction and dispersion effects on imaging quantitatively. Based on the model, Subsurface Back-Projection (SBP) image formation is used to compensate the refraction and dispersion effects in echo domain and image domain, respectively. Unfortunately, prior knowledge of target buried depth and incident angle cannot be obtained in landmine detection over undiscovered areas. In order to solve the problem, a hierarchical processing procedure with coarse and fine compensation is proposed on SBP image formation in image domain, which realizes multi-target focusing and locating over wide areas. Finally, the proposed methods are verified using real data collected with the Rail-GPSAR landmine detection experimental system.

**Key words:** Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar (UWB SAR); Subsurface imaging; Focusing; Locating

### 1 引言

利用机载或车载超宽带合成孔径雷达(Ultra-WideBand Synthetic Aperture Radar, UWB SAR)可以大区域快速探测单个地雷和雷场,具有安全和高效的特点。虽然有些探地雷达(Ground Penetration Radar, GPR)也利用了合成孔径技术提高分辨率,但这些GPR采用下视(Down-looking)模式工作,不能实现远距离大面积探测<sup>[1,2]</sup>。工作在侧视(Side-looking)或前视(Forward-looking)模式下的机载或车载UWB SAR为了探测浅地表地雷,电磁波在空气和土壤两种媒质中传播,此时经典SAR成像理论中均匀非色散传播媒质假设不再成立。利用传统成像算法,如后向投影(Back-Projection, BP)算法等,会引起目标散焦和定位误差。同时由于目标没有精确聚焦,使得信噪比降低,给后续目标检测增加了困难。

本文首先建立了UWB SAR浅地表目标回波模型,并且

定量推导了电磁波折射和色散对成像的影响。理论推导和实测数据表明,折射和色散会引起目标散焦和定位误差。根据回波模型,本文提出了分别在回波域和图像域校正折射和色散影响的浅地表目标成像算法。为了实现大区域的浅地表地雷聚焦和定位,通过粗、精两步补偿实现了不同入射角和埋设深度下多个地雷的折射和色散补偿。最后利用Rail-GPSAR探雷试验系统实测数据验证了方法的有效性。

### 2 UWB SAR 浅地表目标回波模型

首先建立全局三维直角坐标系 $(x, y, z)$ ,其中 $x, y$ 和 $z$ 分别表示地距(ground-range),方位(azimuth)和高度(height)。设浅地表点目标 $P$ 的散射强度为 $A_n$ ,三维坐标为 $(x_n, y_n, -z_n)$ ,其中 $z_n > 0$ 。土壤为导电损耗媒质,其相对磁导率 $\mu_r \approx 1$ ,相对介电常数 $\epsilon_r = \epsilon'_r - j\epsilon''_r$ 。雷达沿方位向匀速直线运动,在每个孔径位置 $u$ 发射宽度脉冲 $p(t)$ ,电磁波在空气和土壤界面发生折射,如图1所示。 $\theta_{ni}$ ,  $\theta_{nt}$ 和 $\varphi_{nt}$ 分别是电磁波对目标 $P$ 的入射角、复折射角和实折射角, $\theta_{ni}$ 和 $\theta_{nt}$ 满足:

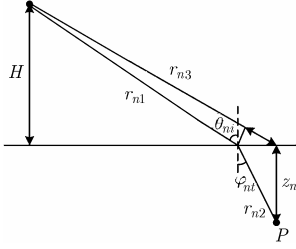


图1 电磁波两层介质传播示意图

$$\frac{\sin \theta_{ni}}{\sin \theta_{nt}} = \sqrt{\varepsilon_r} \quad (1)$$

设  $\mathbf{k}$  和  $\mathbf{k}_t$  分别表示电磁波在空气和土壤中的传播矢量, 其幅度  $k$  和  $k_t$  的关系为

$$k_t = \sqrt{\varepsilon_r} k \quad (2)$$

式中

$$k = 2\pi f / c \quad (3)$$

其中  $f$  为电磁波频率,  $c$  为电磁波在空气中的传播速度。

UWB SAR 作用距离一般为十几米到几百米, 故  $z_n \ll r_{n1}$ , 于是接收电场矢量幅度  $E_r$  为

$$E_r \approx \frac{1}{16\pi^2 r_{n1}^2} A_n E_t \exp[-j2(k \cdot r_{n1} + k_t \cdot r_{n2})] \quad (4)$$

式中  $E_t$  为发射电场矢量幅度。

根据图1所示的电磁波折射几何关系, 有

$$k_t \cdot r_{n2} = \frac{z_n k_t}{\cos \varphi_{nt}} (\sin \varphi_{nt} \sin \theta_{nt} + \cos \varphi_{nt} \cos \theta_{nt}) \quad (5)$$

$$r_{n1} = r_{n3} - z_n \tan \varphi_{nt} \sin \theta_{ni} \quad (6)$$

结合式(1)和式(2)并考虑  $r_{n1} \approx r_{n3}$ , 将式(5)和式(6)代入式(4)可得

$$E_r \approx \frac{1}{16\pi^2 r_{n3}^2} A_n E_t \exp[-j2k(r_{n3} + z_n \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_{ni}})] \quad (7)$$

因此浅地表点目标  $P$  的 UWB SAR 二维回波  $s_n(t, u)$  为

$$s_n(t, u) = \frac{1}{r_{n3}^2} A_n a(x_n, y_n - u, z_n) \text{FT}_t^{-1}\{P(k) \cdot \exp[-j2k(r_{n3} + z_n \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_{ni}})]\} \quad (8)$$

式中  $a(x_n, y_n - u, z_n)$  表征天线特性对回波的影响,  $\text{FT}_t^{-1}(\cdot)$  为对  $t$  的逆傅里叶变换算子,  $P(k)$  为发射信号频谱,

$$r_{n3} = \sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2 + H^2} \quad (9)$$

$$\theta_{ni} \approx \arctan(x_n / H) \quad (10)$$

### 3 折射和色散对成像的影响及补偿

#### 3.1 折射和色散对成像的影响

SAR 只具有二维成像能力, SAR 图像为空间三维散射函数在成像平面的投影。成像平面又称为斜距平面, 记为  $(r, y)$ , 其中  $r$  为斜距(Slant-range)。BP 等成像算法均基于球面波传播假设, 适合大积累角的 UWB SAR 成像<sup>[3]</sup>。下面利用 BP 算法分析折射和色散对成像的影响。固定积累角 BP (Constant Integration Angle Backprojector, CIAB) 算法为<sup>[4]</sup>

$$g_{\text{CIAB}}(r, y) = \iint r^{-1} t^2 h(r, u - y) s(t, u) \cdot \delta\left(t - \frac{2}{c} \sqrt{r^2 + (y - u)^2}\right) du dt \quad (11)$$

式中  $h(r, u - y)$  是用来控制积累孔径形状和抑制旁瓣的窗函数。

跟其它成像算法一样, CIAB 算法基于电磁波在均匀媒质中传播的假设。由于没有考虑折射和色散对浅地表目标回波轨迹的影响, CIAB 算法会引起目标方位分辨率降低和距离向定位误差。同时根据回波模型可以大致得到目标  $P$  的图像峰值在斜距平面上的坐标  $(r'_n, y'_n)$  为

$$r'_n = \sqrt{x_n^2 + H^2 + z_n \sqrt{\varepsilon'_{r,\infty} - \frac{x_n^2}{x_n^2 + H^2}}} \quad (12)$$

$$y'_n = y_n \quad (13)$$

式中  $\varepsilon'_{r,\infty}$  为高频时土壤相对介电常数的实部。式(12)表明, CIAB 算法会引起斜距定位误差。

#### 3.2 回波域和图像域的折射和色散补偿

针对浅地表目标, 本文提出了浅地表 BP (Subsurface BP, SBP) 算法, 用来补偿折射和色散的影响。在回波域进行补偿的 SBP 算法为

$$g_{\text{SBP}}(r, y) = \iint r^{-1} h(r, u - y) \text{FT}_t^{-1}\{\text{FT}_t[t^2 s(t, u)] \cdot F_{\text{EDRDC}}(d, \tilde{\varepsilon}_r, \tilde{\theta}_i)\} \delta\left(t - \frac{2}{c} \sqrt{r^2 + (y - u)^2}\right) du dt \quad (14)$$

式中  $\text{FT}_t(\cdot)$  为对  $t$  的傅里叶变换算子,  $F_{\text{EDRDC}}(d, \tilde{\varepsilon}_r, \tilde{\theta}_i)$  为回波域折射和色散补偿 (Echo Domain Refraction and Dispersion Compensation, EDRDC) 因子,

$$F_{\text{EDRDC}}(d, \tilde{\varepsilon}_r, \tilde{\theta}_i) = \exp[j4\pi f d \text{Re}(\sqrt{\tilde{\varepsilon}_r - \sin^2 \tilde{\theta}_i}) / c] \quad (15)$$

其中  $\text{Re}(\cdot)$  为取实部算子,  $d$  为补偿深度,  $\tilde{\varepsilon}_r$  和  $\tilde{\theta}_i$  分别是土壤介电常数和目标入射角的估计。

对大区域中多个目标进行探测时, 它们的埋设深度和入射角不尽相同, 因此本文考虑在图像域补偿折射和色散。通过回波域处理与图像域处理的关系<sup>[4]</sup>, 可以得到在图像域进行补偿的 SBP 算法为

$$g_{\text{SBP}}(r, y) = \text{FT}_{r,y}^{-1}\{\text{FT}_{r,y}[g_{\text{CIAB}}(r, y)] F_{\text{IDRDC}}(d, \tilde{\varepsilon}_r, \tilde{\theta}_i)\} \quad (16)$$

式中  $\text{FT}_{r,y}[\cdot]$  和  $\text{FT}_{r,y}^{-1}[\cdot]$  分别表示对  $r$  和  $y$  的二维傅里叶变换和二维逆傅里叶变换算子,  $F_{\text{IDRDC}}(d, \tilde{\varepsilon}_r, \tilde{\theta}_i)$  为图像域折射和色散补偿 (Image Domain Refraction and Dispersion Compensation, IDRDC) 因子:

$$F_{\text{IDRDC}}(d, \tilde{\varepsilon}_r, \tilde{\theta}_i) = \exp[jd \sqrt{k_r^2 + k_y^2} \text{Re}(\sqrt{\tilde{\varepsilon}_r - \sin^2 \tilde{\theta}_i})] \quad (17)$$

其中  $k_r$  和  $k_y$  分别是斜距波数和方位波数。

对于单个目标而言, 回波域补偿 SBP 与图像域补偿 SBP 计算量相当。但当对大区域进行成像检测, 不同目标的埋设深度等是不一样的。回波域补偿需要利用不同的  $d$  对应的 EDRDC 因子对回波进行补偿然后分别成像处理; 而图像域补偿只需要进行一次成像过程, 然后再利用图像域 IDRDC 因子在图像域完成折射和色散补偿。由于二维傅里

叶变换可以利用FFT实现,因而计算效率得到大幅度提高。

### 3.3 折射和色散补偿参数的确定

折射和色散补偿需要确定3个参数:目标埋设深度、土壤介电常数和目标入射角。土壤介电常数可以通过实测或利用经验公式等方法获得。本文利用同轴探头法<sup>[5]</sup>和Peplinski等<sup>[6,7]</sup>提出的经验公式对Rail-GPSAR系统实验环境中含水量10%的黏土分别进行了实测和预测,结果如图2所示。经验公式预测结果与实际测量结果比较一致;在后面实测数据处理时,利用经验公式结果作为 $\tilde{\epsilon}_r$ 。

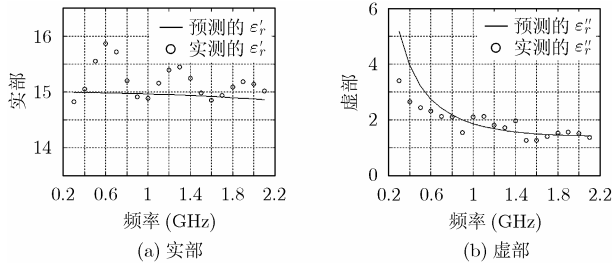


图2 黏土相对介电常数实测和预测结果

剩下的关键问题便是如何获得目标埋设深度和入射角的估计。不同位置目标的入射角不同,并且埋设深度也可能不同。因此本文提出利用粗补偿和精补偿分别获得目标入射角和埋设深度的估计,进而精确聚焦和定位。粗补偿利用成像区域中心 $(x_c, y_c, 0)$ 对应的名义入射角 $\theta_{ic}$ 获得若干补偿深度 $d_i$ 下的SAR图像:

$$g_{SBP}(r, y; d_i) = \text{FT}_{r,y}^{-1} \{ \text{FT}_{r,y} [g_{CIAB}(r, y)] F'_{IDRDC}(d_i, \tilde{\epsilon}_r, \theta_{ic}) \} \quad (18)$$

式中

$$\theta_{ic} = \arctan(x_c / H) \quad (19)$$

利用恒虚警(CFAR)技术对每幅 $g_{SBP}(r, y; d_i)$ 进行检测,获得若干怀疑目标;某个目标可能在多幅图像中被判为怀疑目标,也可能只在一幅图像中被判为怀疑目标,因此需要对相同目标进行合并处理。通过粗补偿最后获得 $N$ 个怀疑目标切片 $\{g_{CIAB}(r_n, y_n)\}_{n=1}^N$ ,切片大小由目标尺寸确定,地雷目标切片通常取 $0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ 。

接下来利用IDRDC因子获得不同补偿深度 $d_i$ 下的怀疑目标切片图像序列,此过程称为精补偿:

$$g_{SBP}(r_n, y_n; d_i) = \text{FT}_{r,y}^{-1} \{ \text{FT}_{r,y} [g_{CIAB}(r_n, y_n)] F'_{RDC}(d_i, \tilde{\epsilon}_r, \tilde{\theta}_n) \} \quad (20)$$

式中

$$\tilde{\theta}_n = \arccos(H / r_n) \quad (21)$$

埋设深度引起的距离向平移通常在分米量级,因此式(21)表示的 $\tilde{\theta}_n$ 可以近似为目标真实入射角。此时当 $d_i = z_n$ 时折射和色散被完全补偿,目标精确聚焦,此时方位向压缩增益最大。因此怀疑目标埋设深度估计为使目标幅度最大的补偿深度:

$$\hat{d}_n = \arg \max_{d_i} \text{Amp}[g_{SBP}(r_n, y_n; d_i)] \quad (22)$$

式中,  $\text{Amp}(\cdot)$ 表示对图像切片的幅度进行统计,为了提高埋设深度估计对噪声的鲁棒性,可以取目标切片幅度前10%~20%个最大像素值的平均。

## 4 Rail-GPSAR 实测数据处理结果

### 4.1 Rail-GPSAR 探雷试验系统简介

Rail-GPSAR系统是轨道地表穿透冲激SAR,轨道长约24m,天线高约3.5m,测绘带近端和远端的俯视角分别约为 $35^\circ$ 和 $10^\circ$ ,用于模拟车载和机载UWBSAR地雷探测方式。系统中心频率为1.1GHz,带宽1.6GHz,为了获得0.1m的名义方位分辨率,需要积累角为 $86^\circ$ 。系统采用收发分置,通过收发双天线的不同配置,可以实现多种极化方式。收发天线均为平面TEM喇叭天线,波束角为 $\pm 60^\circ$ 。Rail-GPSAR系统可以快速对约 $88\text{m}^2$ 的场地进行成像。设轨道中心的方位向坐标为0,建立地距-方位-高度三维坐标系,于是轨道中心的三维坐标为 $(0, 0, 3.5)$ 。

### 4.2 实测数据处理结果

根据工兵布雷规范,反坦克地雷覆土不超过10cm,因此取 $d_i$ 分别为0cm, 5cm, 10cm, 15cm, 20cm和25cm。试验中使用M6A1金属反坦克地雷,直径约0.3m。在黏土环境下,某个M6A1地雷上表面圆心的地距平面坐标为 $(7.03, -0.16)$ ,相应的斜距平面坐标为 $(7.85, -0.16)$ ,埋设深度约0.1m。利用粗补偿获得目标入射角的估计,然后利用不同补偿深度对图像切片进行精补偿。不同补偿深度下,目标中心斜距-方位-高度三维坐标、斜距和方位分辨率及其峰值幅度如表1所示,其中分辨率采用主瓣3dB宽度定义,由于Rail-GPSAR斜距分辨率很高,M6A1地雷SAR图像表现为两个散射点的双峰,因此斜距和方位分辨率均为双峰相应指标的平均。传统BP成像算法斜距定位误差达到0.44m,而利用式(22)的判别准则能够正确定位和聚焦地雷。

表1 不同补偿深度下,定位精度、分辨率和峰值幅度比较

补偿深度(m)	0	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25
斜距坐标(m)	8.29	8.07	7.88	7.72	7.51	7.39
方位坐标(m)	-0.09	-0.20	-0.16	-0.13	-0.11	-0.13
斜距分辨率(m)	0.129	0.127	0.125	0.128	0.140	0.140
方位分辨率(m)	0.258	0.205	0.115	0.182	0.146	0.152
峰值幅度	51.4	59.4	68.6	62.8	57.5	52.8

本文利用多次实验数据统计算法性能。利用两种含水量的黏土,重量含水量分别为10%和15%。每种含水量黏土每次埋设5颗M6A1地雷,埋设深度分别为浅埋,5cm,10cm,15cm和20cm。利用提出的SBP成像方法结合粗、精补偿流程对10种场景数据进行处理,50颗地雷斜距坐标平均定位误差小于0.05m,达到实际应用要求。由于折射和色散补偿之后,地雷图像信噪比增强,因此预筛选检测性能也得到了提高。

## 5 结束语

本文提出了分别在回波域和图像域对折射和色散进行补偿的SBP成像算法。针对实际应用中不可能获得浅地表地雷埋设深度和入射角的情况,本文提出利用粗、精两步补偿实现大区域多目标的聚焦和定位。Rail-GPSAR系统实测数据处理结果表明,本文提出的SBP算法和粗、精补偿处理流程能够较好地校正折射和色散对浅地表目标聚焦和定位的影响,满足实际应用要求。

**致谢** 感谢中电集团电波传播研究所李清亮研究员等在土壤介电常数测量中给予的帮助!

## 参 考 文 献

- [1] Montoya T P and Smith G S. Land mine detection using a ground-penetrating radar based on resistively loaded Vee dipoles. *IEEE Trans. on Antenna and Propagation*, 1999, 47(12): 1795-1806.
  - [2] Zoubir A M, Iskander D R, and Chant I, *et al.* Detection of landmines using ground penetrating radar. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3710(II): 1301-1312.
  - [3] 刘光平. 超宽带合成孔径雷达高效成像算法. [博士论文], 长沙: 国防科学技术大学, 2003.  
Liu Guang-ping. Efficient imaging algorithm of ultra-wideband synthetic aperture radar. [phD], Changsha: National University of Defense Technology, 2003.
  - [4] Rau R and McClellan J H. Analytic models and postprocessing techniques for UWB SAR. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 2000, 36(4): 1058-1074.
  - [5] Blackham, D V and Pollard R D. An improved technique for permittivity measurements using a coaxial probe. *IEEE Trans. on Instr. Meas.*, 1997 46(50): 1093-1099.
  - [6] Peplinski N R, Ulaby F T, and Dobson M C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(3): 803-807.
  - [7] Peplinski N R, Ulaby F T, and Dobson M C. Corrections to Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3GHz range. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(6): 1340.
- 金 添: 男, 1980年生, 博士, 主要研究方向为超宽带合成孔径雷达成像与目标检测。
- 周智敏: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 电子学会高级会员, 主要研究方向为超宽带合成孔径雷达系统技术及高速实时信号处理。
- 宋 千: 男, 1973年生, 副教授, 主要研究方向为实时信号处理和超宽带探地雷达技术。
- 常文革: 男, 1965年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自适应信号处理和合成孔径雷达系统技术。