

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

金 添, 宋 千, 孙晓坤, 周智敏

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南长沙 410073)

摘 要: 利用机载或车载地表穿透合成孔径雷达(GPSAR)可以实现地雷和雷场的远距离大区域快速探测,是探雷的发展趋势.为了降低地雷检测中的虚警,需要基于地雷和杂波电磁特征设计有效的检测器.本文提出了GPSAR浅地表金属地雷二维电磁特征计算方法,理论计算结果与Rai-GPSAR实测数据基本吻合.电磁建模结果表明,浅地表金属地雷图像具有双峰特征,它将有效的提高地雷检测性能.

关键词: 地表穿透; 合成孔径雷达; 金属地雷; 电磁特征

中图分类号: TN95 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2006)12-2246-04

Study of Subsurface Metallic Landmine 2-Dimensional Electromagnetic Signature in Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar

JIN Tian, SONG Qian, SUN Xiaokun, ZHOU Zhimin

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

Abstract: Air or vehicle borne ground penetrating synthetic aperture radar(GPSAR) has the capability to detect landmines and landmine fields over large area from a standoff distance quickly, which is the trend of landmine detection. In order to reduce the false alarms in landmine detection, it is needed the design efficient detector on the electromagnetic characteristics between landmine and clutter. A 2-dimensional electromagnetic signature modeling method of subsurface metallic landmine in GPSAR is proposed, whose results fit real data collected by the Rai-GPSAR system. Electromagnetic modeling result shows that the image of subsurface metallic landmine has the two-peak characteristic, which will improve the landmine detection performance greatly.

Key words: ground penetrating; synthetic aperture radar; metallic landmine; electromagnetic signature

1 引言

利用机载或车载地表穿透合成孔径雷达(Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar, GPSAR),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.因此, GPSAR是目前地雷探测的发展趋势.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:美国陆军实验室的车载 BoomSAR^[1],美国斯坦福研究所的机载 GPSAR^[2]和车载 FLGPR^[3],法国电子装备技术中心和微波光纤通讯研究所联合研制 PULSAR 系统^[4]等.国内也开展了超宽带 SAR 探雷的研究工作,并建成了轨道地表穿透 SAR(Rai-GPSAR)试验系统.

目前GPSAR探雷实用化的主要问题是虚警太多^[5].为了降低虚警,需要根据地雷的电磁特征设计检测器,区分地雷和杂波.因此,地雷电磁建模是GPSAR地雷探测的关键技术之一.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^[6],利用旋转体对称性质可以简化运算.具有代表性的方法有矩量法(MoM)^[7]和物理光学法(PO)^[8],但这些方法均只研究了地雷一维特征.本文基于GPSAR成像几何提出了GPSAR浅地表地雷二维电磁特征计算方法,该方法理论计算结果与Rai-GPSAR实测数据成像结果基本吻合,有效验证了理论模型的正确性,也为地雷检测器设计提供了指导.

2 有耗半空间目标回波模型

2.1 电磁波两层媒质折射模型

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、方位和高度.土壤一般为导电损耗媒质,其相对磁导率 $\mu_r=1$,相对介电常数 ϵ_r 为复数.雷达平台距地面高度 H 沿方位向匀速直线运动,在每个孔径位置 $(0, u, H)$ 发射和接收电磁波,电磁波在空气和土壤界面发生折射,如图1所示, θ_i and φ_i 分别是入射角和实折射角,入射角 θ_i 和复折射角 θ_t 满足Snell定理:

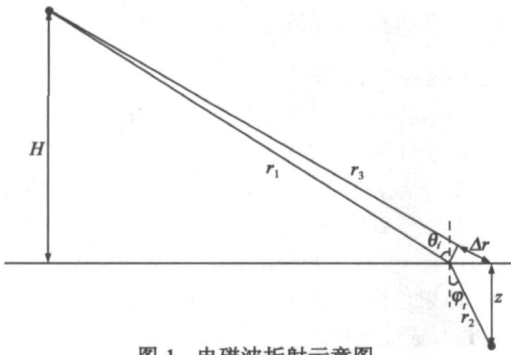


图 1 电磁波折射示意图

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_t} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (1)$$

设 $k = k_i a_i$ 和 $k_t = k_t a_t$ 分别表示空气和土壤中的传播矢量, 其中 a_i 和 a_t 为单位矢量,

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

由于 GPSAR 作用距离一般为十几米到几百米, 有 $z \ll r_1$, 因此入射到土壤中某点的电场为:

$$E_d \approx \frac{1}{4\pi r_1} E_0 \exp(-jk \cdot r_1 - jk_t \cdot r_2) T_1(\theta_i) \quad (3)$$

式中 $E_0 = E_0 p_i$ 为发射电场矢量, p_i 为发射天线极化单位矢量, T_1 为电场由空气进入土壤的透射系数, 当发射天线为 V 极化时

$$T_1(\theta_i) = \frac{2\sqrt{\epsilon_r} \cos \theta_i}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (4)$$

当发射天线为 H 极化时

$$T_1(\theta_i) = \frac{2 \cos \theta_i}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (5)$$

GPSAR 工作在远场, 有 $r_1 \approx r_3$. 根据图 1 所示的电磁波折射几何关系和式(1)、(2), 式(3)可以表示为

$$E_d \approx \frac{1}{4\pi r_3} E_0 \exp(-jkr_3 - jkr_3 \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}) T_1(\theta_i) \quad (6)$$

2.2 基于 PO 的浅地表地雷一维回波模型

GPSAR 系统的工作频段需要在穿透性能和分辨率之间取折中. 实际系统往往会将频段上限取到 GHz 量级, 如 BoomSAR 系统工作频段为 50~1200MHz, FLGPR 系统工作频段为 300~3000MHz. 因此 PO 方法虽然属于高频近似方法, 它还是比较适合本文的浅地表地雷电磁建模问题. 文献[8]利用 PO 进行地雷的电磁建模, 但推导过程不详细, 并且对透射系数等处的讨论不符合实际情况. 因此, 本文将详细推导浅地表金属地雷一维回波模型.

PO 方法的出发点是 Stratton Chu 散射场积分方程, 通过对感应场的近似积分求得散射场. 金属地雷为良导体, 它的散射场是入射电磁波照射引起的表面电流产生. 本文采用表面电磁流的 H- 公式^[9]:

$$J_s = 2n \times H_i \quad (7)$$

$$M_s = 0 \quad (8)$$

式中 J_s 和 M_s 分别为表面电流密度和磁流密度矢量, n 为垂直表面的单位矢量, H_i 为入射磁场.

我们以土壤中某点为原点建立局部球坐标系 (ρ, θ_i, ϕ) , $0 \leq \theta_i < \pi/2$ 表示空气半空间. 不失一般性, 在局部球面坐标系中, 可以设入射波沿 $\phi = 0$ 方向入射, 散射波沿 $\phi = \pi$ 方向回到雷达接收天线. 于是地雷表面磁场 H_i 与入射到地雷表面电场 E_d 的关系为:

$$H_i = \frac{1}{\eta} \exp(-jkx \sin \theta_i + jkz \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}) E_d \quad (9)$$

式中 $\eta = 120\pi$ 为自由空间的波阻抗.

设地雷全局坐标为 $(x', y', -d)$, 由表面电流产生的散射电场矢量幅度为:

$$E_s(k, \theta_i, \pi; x', y', -d) = \frac{j k \eta}{4\pi r_3} \int_S \exp[-jk(r_3 + d \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - x' \sin \theta_i)] T_2(\theta_i) p_r(\theta_i) \cdot J_s ds \quad (10)$$

式中 S 表示目标表面的照明部分, p_r 为接收天线极化单位矢量, T_2 为电场由空气进入土壤的透射系数, 当接收天线为 V 极化时

$$T_2(\theta_i) = \frac{2\sqrt{\epsilon_r^2 - \epsilon_r \sin^2 \theta_i}}{\epsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (11)$$

当接收天线为 H 极化时

$$T_2(\theta_i) = \frac{2\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (12)$$

浅地表金属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为 d . 则计算式(10)的积分可得 GPSAR 在 $(0, u, H)$ 处接收的地雷散射场为:

$$E_s(k, \theta_i) = \frac{dE_0}{8\pi^2 r_3^3 \sqrt{\epsilon_r}} \exp[-j2k(r_3 + d \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i})] T_1(\theta_i) \cdot T_2(\theta_i) Q(ka, kh, \theta_i, \epsilon_r) \quad (13)$$

式中

$$Q(ka, kh, \theta_i, \epsilon_r) = \frac{-j\pi \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\sin \theta_i} J_1(2kas \sin \theta_i) + \frac{\sin \theta_i}{\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} [1 - \exp(-j2jkh \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i})] \cdot \int_{\pi/2}^{\pi} \exp(-2jkas \sin \theta_i \cos \phi) \cos \phi d\phi \quad (14)$$

其中 $J_1(\cdot)$ 为 Bessel 函数.

考虑到实际土壤的 $|\epsilon_r|$ 一般远大于 1, 当 $kas \sin \theta_i \rightarrow \infty$ 时, 式(14)的极限近似为:

$$Q(ka, kh, \theta_i, \epsilon_r) \rightarrow -0.5 \frac{\sqrt{\pi \epsilon_r}}{\sqrt{jkas \sin \theta_i}} \exp(2jkas \sin \theta_i) \frac{1 - j \exp(-4jkas \sin \theta_i)}{\sin \theta_i} \quad (15)$$

通过式(13)和(15)可得一维回波频谱为:

$$S(k) = \frac{-dT_1(\theta_i)T_2(\theta_i)}{16\pi^2 r_3^3 \sqrt{\epsilon_r \sin \theta_i}} \frac{\sqrt{\pi \epsilon_r}}{\sqrt{jkas \sin \theta_i}} P(k) [\exp(jk\rho - j2kr') + \exp(jk\rho - j2kr'')] \quad (16)$$

式中 $P(k)$ 是发射信号的频谱, r' 和 r'' 分别表示浅地表地雷目标在径向上两个等效散射中心的位置:

$$r' = r_3 + d \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - a \sin \theta_i \quad (17)$$

$$r'' = r_3 + d \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} + a \sin \theta_i \quad (18)$$

其中

$$r_3 = \sqrt{x'^2 + (y' - u)^2 + H^2} \quad (19)$$

$$\theta_i = \arctan(\sqrt{x'^2 + (y' - u)^2} / H) \quad (20)$$

上面式(16)~(20)就是 GPSAR 在孔径位置(0, u , H)处, 浅地表地雷的一维回波模型。

3 GPSAR 浅地表地雷二维电磁特征模型

GPSAR 在某个孔径位置(0, u , H)发射冲激脉冲 $p(t)$, 回波是快时间 t 的一维函数, 其傅立叶变换为式(16)。当 GPSAR 沿方位向匀速直线运动, 在每个孔径位置 u 均发射和接收目标回波, 则回波是 t 和 u 二维函数:

$$s(t, u) = \iiint \frac{1}{x'^2 + (y' - u)^2 + H^2} a_M(x', y' - u, k, \theta_a) \cdot a_A(x', y' - u, k, \theta_a) p(t) dx' dy' dz' \quad (21)$$

其中, a_A 表示发射和接收天线特性, $\odot_t$ 表示对快时间 t 的卷积运算, θ_a 是雷达对目标的方位角:

$$\theta_a = \arctan[(u - y') / \sqrt{x'^2 + H^2}] \quad (22)$$

a_M 表示地雷特性, 由式(16)、(17)和(18)可得

$$a_M(x', y' - u, k, \theta_a) \approx \text{FT}_t^{-1} \left[\frac{-aT_1(\theta_i)T_2(\theta_i)}{16\pi^2 \epsilon_r \sin \theta_i} \sqrt{\frac{\pi \epsilon_r}{jk a \sin \theta_i}} \right] \odot_t [\delta(t - 2r'/c) + \delta(t - 2r''/c)] \quad (23)$$

式中 c 为电磁波在自由空间中的速度, $\text{FT}_t^{-1}(\bullet)$ 为对 t 的逆傅立叶变换。

传统的成像方法均是基于电磁波在均匀介质中传播的假设, 对于 GPSAR 中浅地表目标成像不再适用^[10]。文献[11]提出了结合折射和色散校正的修正后向投影算法(MBP)。利用 MBP 算法可以得到浅地表地雷在成像平面(r , y)上的图像, 其中 r 为斜距。

$$f(r, y) = \iint r^{-1} h(r, y - u) \text{FT}_t^{-1} \{ \text{FT}_t [t^2 s(t, u)] \exp(j2\omega d \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_{i0}/c}) \} \delta(r - 2\sqrt{r^2 + (y - u)^2}/c) dt du \quad (24)$$

其中 $\text{FT}_t(\bullet)$ 为对 t 的傅立叶变换, ϵ_r 为土壤相对复介电常数的估计, 可以通过测量或经验公式得到, $h(r, y - u)$ 为抑制旁瓣的窗函数, d 为成像深度, 当 d 与目标埋设真实深度相等时, 折射和色散的影响能够完全校正, θ_{i0} 为成像区域中心对应的入射角:

$$\theta_{i0} = \arctan(x_c/H) \quad (25)$$

式中 x_c 为成像区域中心对应的地距坐标。

BP 算法与其它成像算法一样, 其原理是将目标的一维回波相干叠加获得二维 SAR 图像。由于浅地表金属地雷有两个等效散射中心, 传统一维回波模型域二维图像模型中基于理想点目标的假设不再成立, 金属地雷的一维电磁建模结果与二维电磁特征沿斜距的一维剖面是不同的。我们的研究表明, 两个等效散射中心不能同时精确聚焦, 相关研究结果将另文阐述。下面我们就利用 Rail GPSAR 实测数据与本文提出的二维电磁特征模型进行对比。

4 理论计算结果与实测结果的比较

4.1 Rail GPSAR 系统简介

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, 用于模拟车载和机载超宽带 SAR 地雷探测方式。天线高约 3.5m, 测绘带近端和远端的俯视角分别约为 35° 和 10°。系统采用收发分置, 通过收发双天线的不同配置, 可以实现 VV 极化和 HH 极化。收发天线均为平面 TEM 喇叭天线, 波束角为 ±60°。Rail GPSAR 系统可以对约 88m² 的场景同时进行成像处理。

4.2 理论计算与实测数据二维电磁特征对比结果

埋设地雷为 M6A1 金属地雷, 其半径 $a = 0.16\text{m}$, 高度 $h = 0.08\text{m}$ 。土壤相对复介电常数的经验公式为^[12]

$$\epsilon_r = \epsilon_r \infty - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (26)$$

试验中采用的土壤为黏土, 由测量结果进行拟合得到 $\epsilon_r \infty = 12 - 1.2j$, 电导率 $\sigma = 0.04\text{S/m}$ 。

名义入射角为 60° 时 M6A1 地雷的理论计算和实测二维包络幅度图如图 2 所示, 理论计算结果和实测结果基本吻合, 其中图 2(c) 中目标右侧的亮点为一干扰杂波。理论计算结果中目标双峰间距约为 0.25m, 实测结果中目标双峰间距约 0.19m。理论计算结果与实测结果的差异主要有三个方面的原因: 一是理论建模采用的 PO 方法利用了高频近似; 二是把金属地雷作为理想圆柱体存在一定误差; 三是土壤相对复介电常数的经验公式对于 88m² 的实际土壤环境并不完全精确。但理论建模结果对后续检测器设计有重要的指导意义。

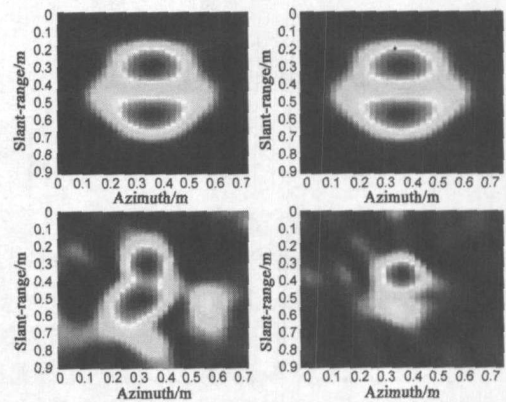


图 2 名义入射角为 60° 的 M6A1 地雷理论计算和实测结果: (a) VV 极化理论计算结果; (b) HH 极化理论计算结果; (c) VV 极化实测结果; (d) HH 极化实测结果

不同名义入射角下, VV 极化的目标中心斜距一维像如图 3 所示。理论计算的散射强度与名义入射角的关系与实测结果基本吻合, 进一步验证了理论模型的正确性, 也为设计地雷检测器提供了有益的信息。

5 结论

本文提出了 GPSAR 浅地表金属地雷不同极化下的二维电磁特征建模方法。理论计算表明, 浅地表金属地雷具有双峰特征, 与 Rail GPSAR 实测结果吻合。电磁建模结果将提高 GP-

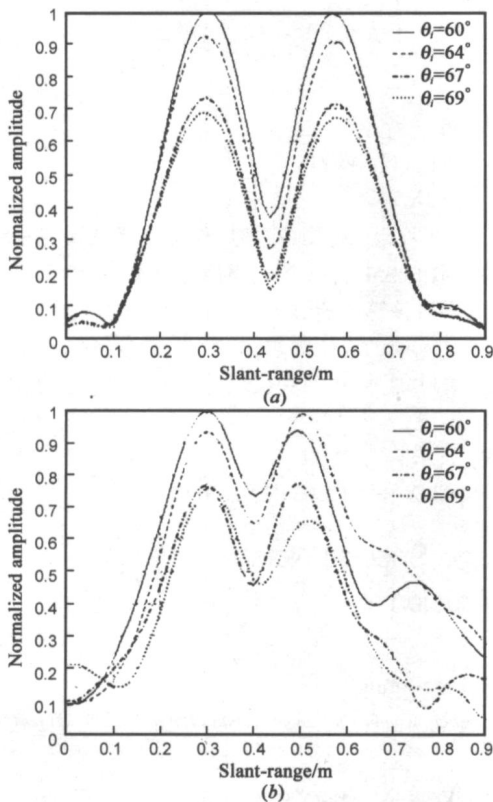


图 3 VV 极化不同入射角的目标中心斜距一维像:
(a) 理论计算结果; (b) 实测结果

SAR 浅地表地雷检测性能, 促进机载和车载 GPSAR 探雷技术的实用化。

参考文献:

- [1] Carin L, Geng N, McClure M, Dong Y, et al. Wide area detection of land mines and unexploded ordnance[J]. Inverse Problems, 2002, 18(3): 575– 609.
- [2] Vickers R S, Design and applications of airborne radars in the VHF/UHF band [J]. IEEE Aerospace & Electronics Systems Magazine, 2002, 17(6): 26– 29.
- [3] Kositsky J, Cosgrove R, Amazeen C, et al. Results from a forward looking GPR mine detection system [A]. Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII [C]. Orlando, FL: SPIE, 2002. 206– 217.
- [4] Andrieu J, Gallais F, Mallepeyre V, et al. Land mine detection with an ultrawideband SAR system [A]. Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VII [C]. Orlando, FL: SPIE, 2002. 237– 247.
- [5] Andrews A, Ralston J, Tuley M, Research on ground penetrating radar for detection of mines and unexploded ordnance: current status and research strategy [R]. Alexandria, VA: Institute for Defense Analyses (IDA) (Document D-2416), 1999.
- [6] Carin L, Kapoor R, Baum C E, Polarimetric SAR imaging of buried landmines [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote

Sensing, 1998, 36(6): 1985– 1988.

- [7] Vitebskiy S, Carin L, Ressler M A, et al. Ultrawideband, short pulse ground penetrating radar: simulation and measurement [J]. IEEE Trans on Geoscience and Remote Sensing, 35(3): 762– 772.
- [8] Casey K F, Oetzel G N, Physical optics models for scattering from buried mines [A]. The second Australian American Joint Conference on the Technology of Mine Countermasures [C]. Sydney: The Mine Warfare Association, 2001. 1– 15.
- [9] 黄培康, 殷红成, 徐晓剑. 雷达目标特性 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005. 24– 26.
- [10] Jin T, Zhou Z, Chang W. Modified wavefront reconstruction imaging formation for stand off GPEN SAR [J]. Electronics Letters, 2005, 41(10): 63– 64.
- [11] Jin Tian, Zhou Zhimin, Chang Wenge. Ground penetrating synthetic aperture radar subsurface imaging model and its modified Back Projection algorithm [A]. The 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing [C]. Beijing: ISPRS Working Groups, 2005. 11– 13.
- [12] Zhou Chaoguang, Liu Lanbo, Lane Jr J W. Nonlinear inversion of borehole radar tomography data to reconstruct velocity and attenuation distribution in earth materials [J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 47: 271– 284.

作者简介:



金 添 男, 1980 年 2 月出生于湖北省武汉市, 博士, 主要研究方向为 SAR 成像算法、目标检测技术、目标电磁建模、机器学习等, 发表学术论文 20 余篇. E-mail: jin_nudt@sina.com



宋 千 男, 1973 年 10 月出生于江苏省张家港市, 副教授, 主要研究方向为实时信号处理、超宽带 SAR 信息处理技术、超宽带探地雷达技术等, 获国家科技进步二等奖一次, 军队科技进步奖多次, 发表学术论文 10 余篇. E-mail: deno@china.com

孙晓坤 女, 1980 年 2 月出生于河北省赵县, 博士, 主要研究方向为目标电磁建模. E-mail: sk1227@tom.com

周智敏 男, 1957 年 3 月出生于河北省易县, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为现代雷达系统设计、实时信号处理等, 获国家科技进步二等奖一次, 军队科技进步奖多次, 在国内外发表学术论文 30 余篇. E-mail: zhouzhim@x263.com