

车载前视地表穿透 SAR 多视处理中的关键技术研究

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: 地表穿透合成孔径雷达(GPSAR)工作在低频区, 具有地表穿透获得浅埋目标二维高分辨图像的能力。利用车载前视 GPSAR 可以在前进过程中对前方地雷和雷场进行远距离快速探测, 是探雷的发展趋势。由于相干斑噪声会影响目标检测, 该文研究了适合车载前视 GPSAR 的多视处理, 提出了地距平面聚焦 BP 算法和地距平面图像折射和色散影响校正方法。提出的方法能解决多视处理中图像配准和浅埋目标二层介质成像问题。通用 Rail-GPSAR 实测数据对车载系统实际工作情况的模拟, 验证了该文提出的方法能有效提高图像的等效视数和辐射分辨率。

关键词: 合成孔径雷达; 地表穿透; 多视; 折射和色散

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)04-0925-04

Study of Key Techniques in Multi-look Processing for Vehicle-Borne Forward-Looking Ground Penetrating SAR

Jin Tian Zhou Zhi-min

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

Abstract: Ground Penetrating Synthetic Aperture Radar (GPSAR), working in low frequency, has the capability of ground penetrating to obtain the two-dimensional high-resolution image of shallow buried targets. Vehicle-borne forward-looking GPSAR can detect landmines and minefields in front from a standoff distance quickly, which is a trend of landmine detection. Because speckle noise will influence target detection, the multi-look processing is studied in this paper and ground plane focusing BP algorithm and refraction and dispersion effects correction techniques are proposed. The proposed methods can solve the problems of images registration and shallow buried target two-layered medium imaging in multi-look processing. The proposed methods can improve the image Equivalent Number of Looks (ENL) and Radiometric Resolution (RR) efficiently, which is proved by the practical operating condition simulation of vehicle-borne system with the field data collected by the Rail-GPSAR system.

Key words: Synthetic Aperture Radar (SAR); Ground penetrating; Multi-look; Refraction and dispersion

1 引言

地表穿透合成孔径雷达(GPSAR)工作在低频区, 具有穿透地表探测浅埋目标的能力。车载前视 GPSAR 能够实现大面积区域地雷的快速探测, 与传统下视地表穿透雷达(GPR)相比, 具有安全和高效的特点^[1-4]。由于地雷散射较弱, 地雷检测不仅需要高的空间分辨率, 而且需要高的辐射分辨率。SAR 是相干成像系统, 存在相干斑噪声干扰。相干斑为乘性衰落噪声, 它将使辐射分辨率指标变差。车载前视 GPSAR 探雷系统要求能够精确探测埋设的单个地雷, 因此有效抑制噪声是提高 SAR 辐射分辨率, 进而提高地雷检测性能的关键技术。

SAR 相干斑抑制技术主要分为两类: 多视处理和图像滤波方法。多视处理将全波束分成几个子波束, 对每个子波束录取的数据单独成像, 然后将这些图像非相干相加从而抑制

相干斑, 但这种多视处理是以牺牲方位分辨率为代价的^[5]。另一类基于图像滤波抑制相干斑的方法主要有 Lee 滤波^[6], Kuan 滤波^[7]和 Gamma-MAP 滤波^[8]等, 但这种图像滤波方法通常会使得边缘模糊, 同时很难再对图像进行辐射校正。因此大多数 SAR 系统图像产品均采用多视处理。

由于车载前视 GPSAR 通常工作在前视模式, 在前行的过程中对前方区域进行探测, 因此对于同一区域可以得到多幅不同俯视角的 SAR 图像。根据多视处理的原理, 通过对这些图像进行多视处理能够抑制相干斑。同时由于这些图像均是高分辨图像, 因此处理后分辨率不会降低。但是车载前视 GPSAR 的多视处理不能照搬以前的方法, 主要有两点原因: 一是车辆前进使得同一场景的成像平面不断变化, 成像平面之间畸变关系复杂, 配准难度加大; 二是为了探测埋设在地下的地雷, 必须考虑电磁波折射和色散对成像的影响。针对车载前视 GPSAR 多视处理中的这两个问题, 本文提出了地距平面聚焦 BP 算法及其相应的折射和色散影响校正方

法,能够简化配准运算并有效地校正折射和色散的影响。最后利用 Rail-GPSAR 系统不同天线高度实测数据对车载系统在前进过程中探测同一区域时俯视角不断变化情形的模拟,有效验证了提出方法的有效性。

2 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。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 TEM 喇叭天线,波束角为 $\pm 60^\circ$ 。Rail-GPSAR 系统可以一次完成约 88m^2 场景的有效探测。通过改变天线高度可以模拟车载系统边前边进探测的工作模式,两次天线高度分别约为 2.9m 和 3.3m,对应成像区域中心俯视角分别为 19.9° 和 22.4° ,等效车辆前行 1m。

3 地距平面聚焦 BP 算法

3.1 不同俯视角成像平面的畸变关系分析

本文建立三维坐标系 (x, y, z) 解释条带式 SAR 成像平面的概念,其中 x, y 和 z 分别表示地距,方位和高度方向。SAR 只具有二维成像能力,实际三维场景的 SAR 图像就是其在成像平面的投影。通常将合成孔径中心 o_a 到成像场景中心点 o 的连线作为斜距向 r ,连同合成孔径方向 y 构成成像平面 r - y 。成像平面也称为斜距平面,而将 x - y 平面称为地距平面。

车载前视 GPSAR 前进过程中对同一场景成像,两次成像车辆沿地距向前进 Δx ,相应的成像平面(Imaging plane)如图 1 所示,分别称为成像平面 1 和成像平面 2,它们对应的成像区域中心俯视角(depression angle)分别为 $\theta_{\text{dec}1}$ 和 $\theta_{\text{dec}2}$ 。

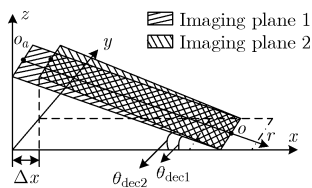


图1 不同俯视角成像平面示意图

设成像平面 1 对应的孔径中心 o_a 的三维坐标为 $(0, 0, H_R)$,某地面目标三维坐标为 $(x_n, y_n, 0)$,俯视角为 $\theta_{\text{dec}1}$,在成像平面 1 上的二维坐标为 (r_{n1}, y_{n1}) 。当车辆前进 Δx 后,目标俯视角变为 $\theta_{\text{dec}2}$,在成像平面 2 上的二维坐标为 (r_{n2}, y_{n2}) 。根据成像几何有

$$y_{n1} = y_{n2} = y_n \quad (1)$$

$$r_{n1} = x_n / \cos \theta_{\text{dec}1} \quad (2)$$

$$r_{n2} = (x_n - \Delta x) / \cos \theta_{\text{dec}2} \quad (3)$$

由式(1)可知,成像平面 1 和成像平面 2 在方位向上没有

畸变。目标在成像平面 1 和成像平面 2 上的斜距坐标差为

$$\begin{aligned} \Delta_r &= r_{n1} - r_{n2} \\ &\approx \frac{-2x_n \Delta \theta_{\text{dec}} \sin \theta_{\text{dec}}}{\cos(2\theta_{\text{dec}})} + \frac{\Delta x}{\cos \theta_{\text{dec}}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中

$$\theta_{\text{dec}} = (\theta_{\text{dec}1} + \theta_{\text{dec}2}) / 2 \quad (5)$$

$$\Delta \theta_{\text{dec}} = \theta_{\text{dec}2} - \theta_{\text{dec}1} \quad (6)$$

由于目标在不同成像平面上的斜距坐标差与目标位置有关,因此不同成像平面斜距向畸变是空变的。这跟传统子波束多视处理不同,子波束多视处理得到同一区域若干 SAR 图像在斜距和方位基本不存在畸变,不需要配准。而前视车载系统中不同俯视角图像之间不仅存在畸变,而且这种畸变是空变的。由于多视处理需要像素级的配准精度,因此直接利用斜距平面图像进行多视需要进行较复杂的配准。

3.2 地距平面聚焦 BP 算法

通过上面分析,由于畸变模型的空变特性,直接利用斜距平面图像进行多视处理较为复杂。很简单的一个想法是首先对斜距平面图像进行几何校正得到地距平面图像,然后对地距平面图像进行多视。这时两次地距平面图像在地距方向只存在平移,配准操作非常简单。

因此本文提出将几何校正结合到成像算法中的地距平面聚焦 BP 算法(简称地距平面 BP 算法, Ground-Plane Back-Projection, GPBP):

$$\begin{aligned} f_{\text{GPBP}}(x, y) &= \iint (x^2 + H_R^2)^{-1/2} t^2 s(t, u) \\ &\cdot \delta \left(t - \frac{2}{c} \sqrt{x^2 + H_R^2 + (u - y)^2} \right) du dt \end{aligned} \quad (7)$$

式中 c 为电磁波在自由空间的速度, $s(t, u)$ 为 SAR 关于快时间 t 和方位孔径位置 u 的二维回波,

$$\begin{aligned} s(t, u) &= \iiint \frac{1}{x^2 + (H_R - z)^2 + (u - y)^2} g(x, y, z) \\ &\cdot p \left(t - \frac{2}{c} \sqrt{x^2 + (H_R - z)^2 + (u - y)^2} \right) dx dy dz \end{aligned} \quad (8)$$

其中 $p(t)$ 是发射信号, $g(x, y, z)$ 为成像场景散射函数。为表达式的简洁,将天线特性合并到 $g(x, y, z)$ 中。

这里还要特别说明的是,式(8)中仅考虑地面上的反射情况,即适用于 $z \geq 0$ 的情形。当超宽带 SAR 探测地下目标时,电磁波需要在空气和土壤组成的二层介质中传播,这时需要考虑电磁波折射和色散对回波的影响。该内容将在下面研究。

4 地距平面图像折射和色散影响校正

4.1 折射和色散影响校正原理

车载前视 GPSAR 为了探测浅埋的地雷,电磁波在空气和土壤组成的二层介质中传播。设埋设地雷的三维坐标为 $(x_n, y_n, -z_n)$, $z_n > 0$,散射强度为 A_n 。土壤一般为导电损耗媒质,其相对磁导率 $\mu_r \approx 1$,相对介电常数 $\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$

为复数, 并且是电磁波频率 f 的函数。浅埋目标二维回波 $s(t, u)$ 为^[9]

$$s(t, u) = \iiint_{r_3} \frac{1}{2} g(x, y, z) FT_t^{-1} \cdot \left[P(k) \exp\left(-j2k\left(r_3 + z\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2\theta_i}\right)\right) \right] dx dy dz \quad (9)$$

式中 k 为快时间波数, θ_i 为入射角, $FT_t^{-1}(\cdot)$ 为对 t 的逆傅里叶变换算子, $P(k)$ 为发射信号频谱,

$$r_3 = \sqrt{x^2 + (y-u)^2 + H_R^2} \quad (10)$$

$$\theta_i = \arcsin(\sqrt{r_3^2 - H^2} / r_3) \quad (11)$$

$$g(x, y, z) = A_n \delta(x - x_n) \delta(y - y_n) \delta(z - z_n) \quad (12)$$

其中 $\delta(\cdot)$ 为 Dirac 函数。

利用 GPBP 算法对浅埋目标成像时, 由于没有考虑电磁波折射和色散, 会出现散焦和定位错误的现象。虽然可以通过分别计算电磁波在空气和土壤中的传播时间修正积累轨迹^[10], 但这个方法需要计算折射点, 计算量太大, 并且只适用于介电常数随频率变化不大的土壤环境。

对于 $(x_n, y_n, -z_n)$, $z_n > 0$ 处目标而言, 其 GPBP 成像结果为

$$f_{\text{GPBP}}(x, y) = FT_{x,y}^{-1} \left[A_n P \left(\frac{1}{2} \sqrt{k_x^2 / \sin^2 \theta_i + k_y^2} \right) \cdot \exp\left(-jk_x x_n - jk_y y_n - jz_n \sqrt{(k_x^2 / \sin^2 \theta_i + k_y^2)(\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i)}\right) \right] \quad (13)$$

式中 $FT_{x,y}^{-1}(\cdot)$ 为对 x 和 y 的二维逆傅里叶变换算子, k_x 和 k_y 分别为地距波数和方位波数。式(13)隐含了 k_x 和 k_y 与 k 的关系式^[11],

$$\left. \begin{aligned} k_x &= 2k \cos \theta_a \sin \theta_i \\ k_y &= 2k \sin \theta_a \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中 θ_a 是目标的方位角,

$$\theta_a = \arctan[(y_n - u) / \sqrt{H_R^2 + x_n^2}] \quad (15)$$

由式(11)可知, 不同孔径位置对应的目标入射角 θ_i 是不同的,

$$\cos \theta_i = \cos \theta_{i0} \cos \theta_a \quad (16)$$

式中 θ_{i0} 为正侧视(broadside)时目标入射角,

$$\theta_{i0} = \arctan(x_n / H_R) \quad (17)$$

根据浅埋目标成像模型, 本文提出地距平面图像折射和色散影响校正方法:

$$\begin{aligned} & \tilde{f}_{\text{GPBP}}(x, y) \\ &= FT_{x,y}^{-1} \left\{ FT_{x,y} [f_{\text{GPBP}}(x, y)] \exp \left[jd \operatorname{Re} \sqrt{\left(\frac{k_x^2}{\sin^2 \theta_{i0}} + k_y^2 \right) \left(\varepsilon_r - \frac{(k_x^2 + k_y^2) \sin^2 \theta_{i0}}{k_x^2 + k_y^2 \sin^2 \theta_{i0}} \right)} \right] \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

式中 $FT_{x,y}^{-1}(\cdot)$ 为对 x 和 y 的二维傅里叶变换算子, $\operatorname{Re}(\cdot)$ 表示

取复数的实部, d 为校正深度。

当 $d = z_n$ 时, 折射和色散引起的定位误差和散焦能够得到比较好的校正。由于式(18)中的 $\operatorname{Re}(\cdot)$ 算子只补偿了折射和色散对回波相位的影响, 没有补偿土壤对电磁波的衰减, 因此可以利用目标幅度最大准则确定最优的 d , 并将 d 作为目标埋设深度的估计。式(18)中土壤的 ε_r 可以采用实测或利用经验公式估计得到, 将在后面详细讨论。

对车辆前进 Δx 获得的 L 幅地距平面聚焦并经过了折射和色散校正的图像 $\tilde{f}_{\text{GPBP}}^\ell(x, y)$, $\ell = 1, 2, \dots, L$ 进行多视处理。假设相邻两幅图像之间车辆前进距离相等, 以最后一幅图像为基准, 采用平均加权得到的 L 视结果为

$$\tilde{f}_{\text{GPBP}}^{ml}(x, y) = \frac{1}{L} \sum_{\ell=1}^L \tilde{f}_{\text{GPBP}}^\ell \left(x + \frac{(L-\ell)\Delta x}{L-1}, y \right), \quad 0 < x < R_y - \Delta x \quad (19)$$

式中 R_y 为所成图像的地距宽度。

4.2 校正参数的确定

利用式(18)对折射和色散影响进行校正时, 需要知道两个参数: d 和 ε_r 。前面已经说明, 可以基于最大幅度准则确定 d ; 而对于 ε_r 的确定可以通过实测或是经验公式进行估计。

目前同轴探头法是土壤介电常数测量常用方法之一^[12], 它通过网络分析仪测量的反射系数确定土壤介电常数。利用 Agilent 公司的 85071E 材料测量软件可以实现基于同轴探头法的土壤介电常数测量, 但是该方法耗时较长, 因此利用经验公式预测土壤介电常数更适合实际应用要求。本文利用 Peplinski 等^[13, 14]提出的经验公式预测土壤相对介电常数, 并与实测结果进行对比(如图 2 所示)。虽然当频率超过 1.3GHz 时, 经验公式预测结果的误差有所增大, 但由于浅埋目标回波能量主要来自低频区, 并且高频时的预测误差仍控制在一定范围内, 因此利用经验公式得到的 ε_r 能够满足式(18)校正精度要求。

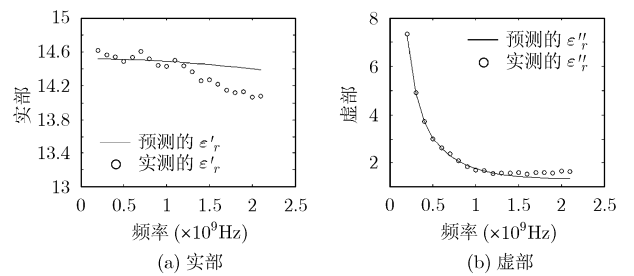


图2 土壤相对介电常数实测和预测结果

5 Rail-GPSAR 系统实测数据处理结果

成像区域中有 5 颗 M6A1 地雷埋在沙土中约 0.15m。当天线高度 3.3m 时, 进行折射和色散影响校正前后的 GPBP 算法电平幅度图如图 3 所示, 校正深度根据目标幅度最大准则确定。

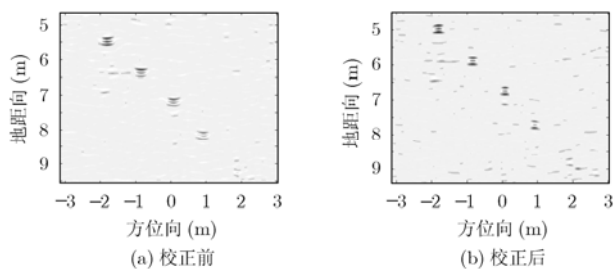


图3 折射和色散影响校正前后 GPBP 算法成像结果

当不校正折射和色散的影响时,目标平均地距定位误差达到 0.4m,方位分辨率平均降低约 0.11m。对天线高度 2.9m 同一场景的数据也进行地距平面成像和校正处理,然后将两幅图像利用式(19)进行多视处理($L=2$)。多视结果表明相干斑噪声得到了一定程度的抑制而图像分辨率没有降低。利用等效视数(Equivalent Number of Looks, ENL)和辐射分辨率(Radiometric Resolution, RR)定量衡量多视的效果;它们定义式分别为^[15, 16]

$$\text{ENL} = [E(I)]^2 / \text{VAR}(I) \quad (20)$$

$$\text{RR} = 10 \lg [1 + (1 + \text{SNR}^{-1}) / \sqrt{\text{ENL}}] \quad (21)$$

式中 I 为像素强度(intensity)值, $E(\cdot)$ 和 $\text{VAR}(\cdot)$ 分别为均值和方差算子, SNR 为目标信噪比。

将成像得到的电平幅度图沿地距方向进行 Hilbert 变换然后取模值就可以得到相应的强度图。不同俯视角对应的图像 1 和图像 2 以及多视结果的 ENL 和 RR 如表 1 所示,多视处理后图像的 ENL 和 RR 都得到了提高。

表1 多视处理前后 ENL 和 RR 比较

	图像 1	图像 2	多视结果
ENL	0.85	0.97	1.84
RR(dB)	3.35	3.18	2.45

6 结束语

本文针对车载前视 GPSAR 系统探测浅埋目标的工作特点,研究了车辆在前进过程中对同一场景不同俯视角图像进行多视处理的两项关键技术,提出了直接在地距平面聚焦的 GPBP 成像算法和浅埋目标地距平面图像折射和色散影响校正方法。GPBP 算法简化了多视处理中的配准操作,提高了处理的实时性能。对地距平面图像进行折射和色散影响校正,可以根据小区域环境实时调整土壤介电常数估计值,能够满足探测非均匀土壤环境中浅埋目标的要求。Rail-GPSAR 系统实测数据处理结果有效地验证了本文提出方法的有效性。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术. 北京: 电子工业出版社, 2005: 117-118.

[6] Brown L G. A survey of image registration techniques. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24(4): 325-376.

[7] Zitova B and Flusser J. Image registration methods: A survey. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(11): 977-1000.

[8] Oliver C and Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images. Boston, MA: Artech House, 1998: 166-167.

[9] Jin T, Zhou Z, and Song Q, *et al.* Ultra-wide band SAR subsurface metallic landmine images: simulation and measurement. CIE International Conference on Radar, Shanghai, China, 2006: 1667-1670.

[10] 金添, 周智敏, 常文革. 基于两层均匀媒质的 GPEN SAR 地下目标成像方法及其性能分析. *信号处理*, 2006, 22(2): 238-243.

[11] Jin T, Zhou Z, and Chang W. UWBWA SAR imaging modeling and its time-frequency processing. The 7th international Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2004: 1930-1933.

[12] 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.

[13] 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.

[14] Peplinski N R, Ulaby F T, and Dobson M C. Corrections to "Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range". *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(6): 1340.

[15] Moreira A. An improved multi-look technique to produce SAR imagery. IEEE International Radar Conference, Arlington, VA, USA, 1990: 57-63.

[16] Moreira A. Improved multi-look techniques applied to SAR and SCANSAR imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(4): 529-534.

金添: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为超宽带 SAR 成像与目标检测。

周智敏: 男, 1957年生, 教授, 博士生导师, 长期从事超宽带 SAR 系统技术及实时信号处理的研究工作。