

探地雷达近场三维距离偏移成像算法¹

雷文太^{***} 粟毅^{*} 黄仕家^{**}

^{*}(国防科技大学电子科学与工程学院 长沙 410073)

^{**}(空军工程大学工程学院航空电子工程系 西安 710038)

摘要: 在距离偏移算法基础上提出了近场条件下的探地雷达三维成像方法,同时对后向投影算法进行了讨论。理论分析表明:近场三维距离偏移算法与后向投影算法相比,能在较大程度上减少运算量。利用试验数据对两种算法分别做了成像研究,验证了近场三维距离偏移算法的正确性及其实时处理能力。

关键词: 探地雷达, 距离偏移算法, 三维成像

中图分类号: TN951 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2003)12-1641-06

Ground Penetrating Radar Near Field 3-D Range Migration Imaging Technique

Lei Wen-tai^{***} Su Yi^{*} Huang Shi-jia^{**}

^{*}(College of Electron. Sci. and Eng., National Univ. of Defense Tech., Changsha 410073, China)

^{**}(Dept. of Aeronautic Electron. Eng., Eng. Inst. of Air Force Eng. Univ., Xi'an 710038, China)

Abstract Based on range migration imaging technique, this paper investigates ground penetrating radar three dimension imaging algorithm under near field condition, discusses the back propagation algorithm at the same time. Theoretical analysis shows that near field 3-D range migration imaging technique can reduce computational complexity in much degree by contrast with back propagation algorithm. Finally, through processing the experimental data, 3-D images of underground objects are obtained. The results validate the correctness of the near field 3-D range migration imaging algorithm and its capability at the aspect of real time processing.

Key words Ground penetrating radar, Range migration algorithm, 3-D imaging

1 引言

探地雷达是利用高频电磁波(10-3000MHz)获取地下未知目标信息的雷达系统,广泛应用于地质勘探、考古、城市建设、交通、军事等部门^[1,2]。对于探地雷达成像方法的研究,现在一般还是集中在二维成像上。地震信号处理中的频率波数域偏移算法已经被引入探地雷达成像和速度估计中,并取得了较好的效果^[3]。但是二维剖面成像可能与实际地下构造不一致^[4]。探地雷达三维成像可以解决二维成像的不足,有助于更加详细地了解地下目标的分布和相对位置关系。

基于惠更斯原理的三维后向投影成像算法^[4]运算量大,成像区域内每一点的强度值都需要做多次叠加才能得到,数据处理必须离线进行,无法满足雷达信号实时处理的要求。距离偏移算法运用于三维雷达成像,采用了FFT^[5],很大程度上减少了运算量。但一般现有的三维距离偏移成像算法是基于远场近似的。对探地雷达而言,成像区域一般位于近场区,有必要考虑近场效应,这样才有可能更真实反映实际地下构造。

¹ 2002-06-10 收到, 2002-12-06 改回

国家 863 高技术计划项目(2001AA132020)资助课题

本文第 2 节推导了近场三维距离偏移成像算法; 第 3 节给出了算法实现流程图并简要分析了算法的分辨率和计算量; 第 4 节对实测数据分别用近场三维距离偏移算法和后向投影算法进行了成像, 给出了成像结果并进行了比较和讨论; 最后对全文进行了总结。

2 近场三维距离偏移成像算法

距离偏移算法已经被引入三维雷达成像领域^[5]。探地雷达二维扫描模型如图 1 所示, 目标体 $O(x, y, z)$ 埋在地下 $z > 0$ 处, 雷达天线在 $z = 0$ 平面扫描, 横、纵向扫描点数分别为 M, N , 扫描间隔分别为 $\Delta m, \Delta n$ 。对于均匀无色散媒质, 考虑成像区域位于天线近场区, 球面波波前, 运用一阶玻恩近似^[6], 则在扫描点 $(x_n, y_m, 0)$ 处接收到的信号的频域表示为

$$s(x_n, y_m, k) = \iiint_V C \cdot O(x, y, z) \frac{e^{-jkR}}{R^2} dV \quad (1)$$

式中 V 表示成像区域; C 表示与入射信号和天线方向图有关的常量, 可通过系统校正去除其影响; $k = 4\pi f/v$ 表示双程波数, v 表示电磁波在媒质中的传播速度; R 表示扫描点到散射点的距离, $R = \sqrt{(x - x_n)^2 + (y - y_m)^2 + z^2}$ 。

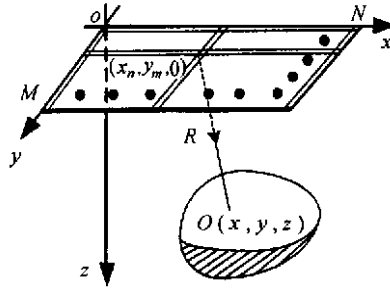


图 1 探地雷达二维扫描示意图

为简化推导, 式 (1) 没有考虑收发天线之间的偏移和天线距地面的距离。

不考虑 C 的影响, 由式 (1) 可得

$$O(x, y, z) = \iiint_{A, k} s(x_n, y_m, k) \cdot R^2 e^{jkR} dx_n dy_m dk \quad (2)$$

A 表示合成孔径区域。式 (2) 可以表示为二维空域卷积和频域积分的形式:

$$\begin{aligned} O(x, y, z) &= \int_k dk \iint_A s(x_n, y_m, k) \cdot [(x - x_n)^2 + (y - y_m)^2 + z^2] e^{jk\sqrt{(x-x_n)^2 + (y-y_m)^2 + z^2}} dx_n dy_m \\ &= \int_k s(x, y, k) \otimes [x^2 + y^2 + z^2] e^{jk\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \cdot dk \end{aligned} \quad (3)$$

\otimes 表示空间变量 x, y 的二维卷积。空域卷积等效于谱域的相乘, 令

$$F(k_x, k_y) = \iint (x^2 + y^2 + z^2) \cdot e^{jk\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \cdot e^{-j(k_x x + k_y y)} dx dy \quad (4)$$

令 $\Phi(x, y) = k\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - k_x x - k_y y$, 可得其一阶驻相点为 $x_0 = k_x z / k_z, y_0 = k_y z / k_z$ 。由驻相法^[6], 得

$$F(k_x, k_y) = (j \cdot 2\pi k^3 z^3 / k_z^4) e^{jk_z z} \quad (5)$$

式中 $k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}$ 。由于探地雷达是发射沿 +z 方向传播的电磁波对地下目标的上表面进行扫描, 从而限制了 k_z 只能取正值。

式 (3) 可表示为

$$O(x, y, z) = \iiint_K S(k_x, k_y, k) \cdot \frac{j \cdot 2\pi k^3 z^3}{k_z^4} e^{jk_z z} \cdot e^{j(k_x x + k_y y)} dk_x dk_y dk \quad (6)$$

式中 $S(k_x, k_y, k)$ 表示后向散射场数据 $s(x_n, y_m, k)$ 的二维傅里叶变换。积分表达式中的指数项可以看作是由波数域 (k_x, k_y, k_z) 到空域 (x, y, z) 的逆傅里叶变换的核函数。因此, 成像算法可以由 IFFT 实现。在进行逆傅里叶变换之前, 需要在波数域对 $S(k_x, k_y, k)$ 进行 Stolt 插值, 则有

$$O(x, y, z) = \iiint_K S(k_x, k_y, k_z) \cdot \frac{j \cdot 2\pi k^2 z^3}{k_z^4} e^{j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y dk_z \quad (7)$$

对基于平面波近似的三维距离偏移算法而言, 式 (1) 对应为

$$s(x_n, y_m, k) = \iiint_V C \cdot O(x, y, z) e^{-jkR} dV \quad (8)$$

成像算法可表示为

$$\frac{O(x, y, z)}{z} = \iiint_K S(k_x, k_y, k_z) \cdot \frac{j \cdot 2\pi}{k_z} e^{j(k_x x + k_y y + k_z z)} dk_x dk_y dk_z \quad (9)$$

3 算法分析

由式 (7) 可见: 探地雷达近场三维成像可分为 3 个步骤: 傅里叶变换, Stolt 插值, 三维逆傅里叶变换。对脉冲探地雷达而言, 接收到的后向散射场是空间坐标和时延的函数, 成像的第一步是进行空域二维傅里叶变换和时域傅里叶变换; 对于在频域进行测量的雷达系统, 第一步只需在空域进行二维傅里叶变换。经过傅里叶变换后, 散射场数据在波数域 (k_x, k_y, k) 中是等间隔的。为运用三维逆傅里叶变换, 需要将数据进行插值, Stolt 插值通过波数域 Stolt 变换关系对所有散射点的距离弯曲进行补偿使散射场数据在波数域 (k_x, k_y, k_z) 中等间隔排列。本文采用最临近点近似完成插值运算。而后就可以直接运用三维逆傅里叶变换得到成像区域中目标体的像函数。时域采样数据的算法流程图见图 2。

式 (7) 的成像算法中, 距离向分辨率 Δz 与媒质中波的传播速度 v 和发射信号带宽 B 有关; 方位向分辨率与合成孔径长度, 发射信号中心频率对应的波长 λ_0 以及深度 z 有关: $\Delta z = v/(2B)$, $\Delta x = \lambda_0 z / (2N \Delta n)$, $\Delta y = \lambda_0 z / (2M \Delta m)$ 。

由于采用了 FFT, 该算法在较大程度上减少了运算量。对一横、纵向空间采样点数分别为 M, N , 深度 z 方向采

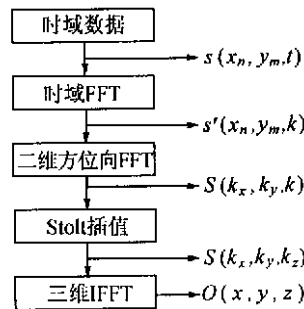


图 2 时域测量数据的三维距离偏移算法

样点数为 L 的区域, 用后向投影算法进行成像时, 需要 $5M^2N^2L$ 次加法和 $5M^2N^2L$ 次乘法, 用本文提供的算法, 约需 $MNL \log_2 MNL + 3MN$ 次复数乘法和 $2MNL \log_2 MNL + 2MN$ 次复数加法。

4 试验数据处理结果

试验场地为一长方形水泥池, 尺寸为 $L \times W \times H = 150 \times 100 \times 50\text{cm}^3$ (L, W, H 分别表示长度、宽度和深度), 填入均匀细沙。测试设备采用中国电波传播研究所研制的 1GHz 无载频脉冲冲地雷达系统。其天线为收发一体的加载平面天线, 背面加了屏蔽。天线由伺服电机控制在水平面内先沿横向进行扫描, 纵向步进后再进行横向扫描, 如此往复完成对整个探测面积的扫描。为进行成像运算, 需要已知电磁波在媒质中的传播速度, 可以对深度已知的金属平行板进行测量, 根据测量的波达时刻, 由公式 $v = 2h/t$ 算出媒质中电磁波的实际传播速度^[3]。

(1) 一半径为 10cm 的金属半球埋在沙坑中, 球顶距沙坑表面 22cm。天线距沙坑表面 1cm, 扫描间隔 $1 \times 1\text{cm}^2$, 扫描点数 70×35 , 采样时窗 20ns, 每道采样点数 512。分别用三维距离偏移算法和后向投影算法进行了处理, 原始数据和处理结果见图 3。

直达波的去波采用抵消法, 近场三维距离偏移算法进行了约 2.16×10^7 次复数乘法和 4.31×10^7 次复数加法, 在 Pentium 1.6GHz, 256Mb RAM 的 PC 机上耗时 1.1min。结合图 3(c) 和 3(d)

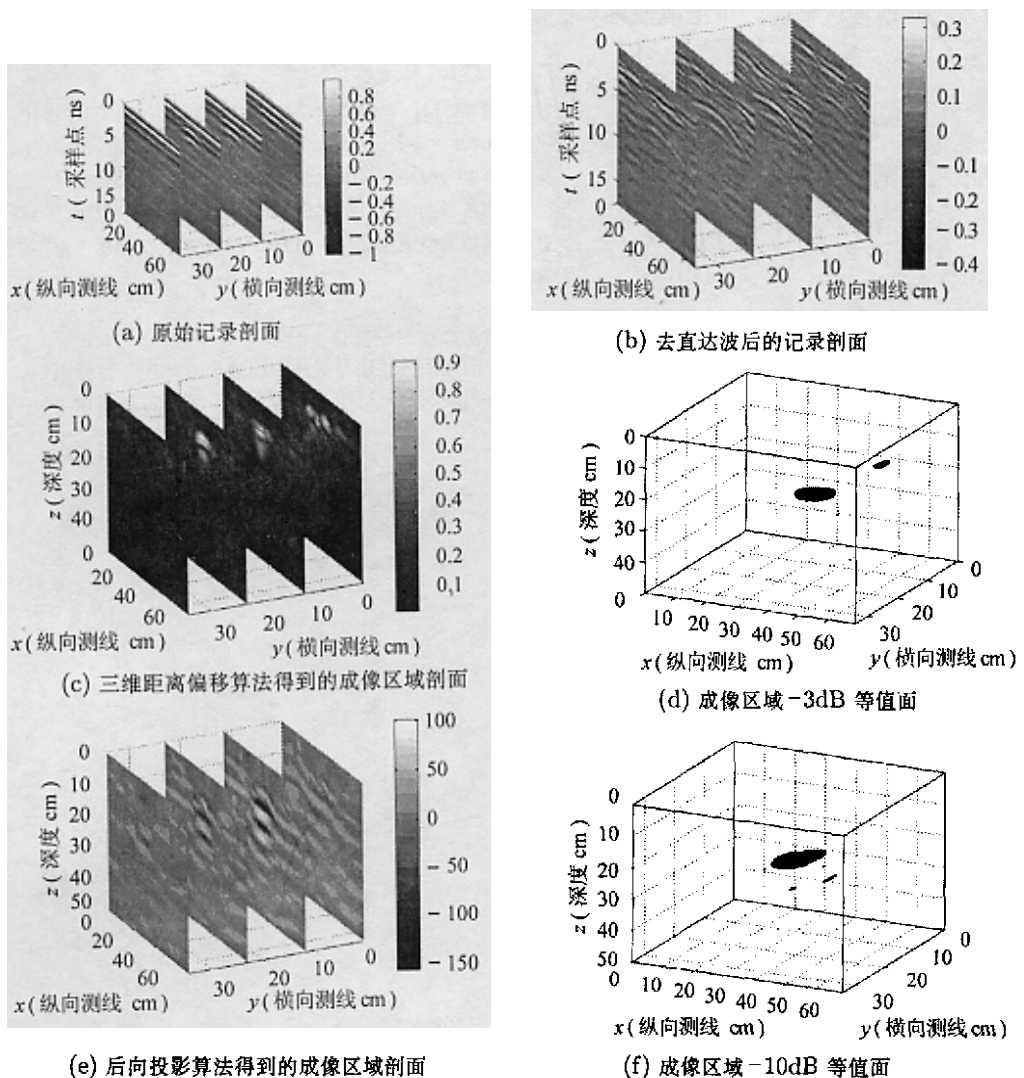


图 3 金属半球的测量数据和处理结果

可以确定目标的位置。从图中可以看出,直达波对成像结果影响很大。运用后向投影算法时,成像区域设定为 $70 \times 35 \times 50 \text{cm}^3$,进行了 1.5×10^9 次乘法和 1.5×10^9 次加法,耗时 50.8min,成像结果示于图 3(e) 和 3(f)。通过比较图 3(c)~3(f),可见两种算法的结果是一致的,均能确定出目标体的位置。距离偏移成像算法中,成像区域中的每一点强度值与全空间的采样数据都有关,而后向投影算法中,成像区域中的某一点强度值只与其对应的一双曲面有关,因此距离偏移成像算法中直达波对成像效果的影响要强于后向投影算法中直达波的影响。

(2) 长 65.5cm, 直径 1cm 的 2 根实心棒, 一端并拢, 另一端间距 14cm, 埋在沙坑 8.5cm 深处, 天线距沙坑表面 2cm, 扫描间隔 $1 \times 0.5 \text{cm}^2$, 扫描点数 70×70 , 采样时窗 20ns, 每道采样点数 512。原始数据和处理结果见图 4。

近场三维距离偏移算法进行了约 5.33×10^7 次复数乘法和 1.07×10^8 次复数加法,耗时 2.8min。由图 4(c) 和 4(d) 可辨认出目标的大致形状和走向,并确定其深度。由于两实心棒之间存在耦合,基于一阶玻恩近似的成像算法不能成出理想的目标像。运用后向投影算法时,成像区域设定为 $70 \times 35 \times 50 \text{cm}^3$,进行了 6.15×10^{10} 次乘法和 6.15×10^{10} 次加法,耗时 65 min,成像结果示于图 4(e) 和 4(f)。由成像结果只能确定目标体的位置。

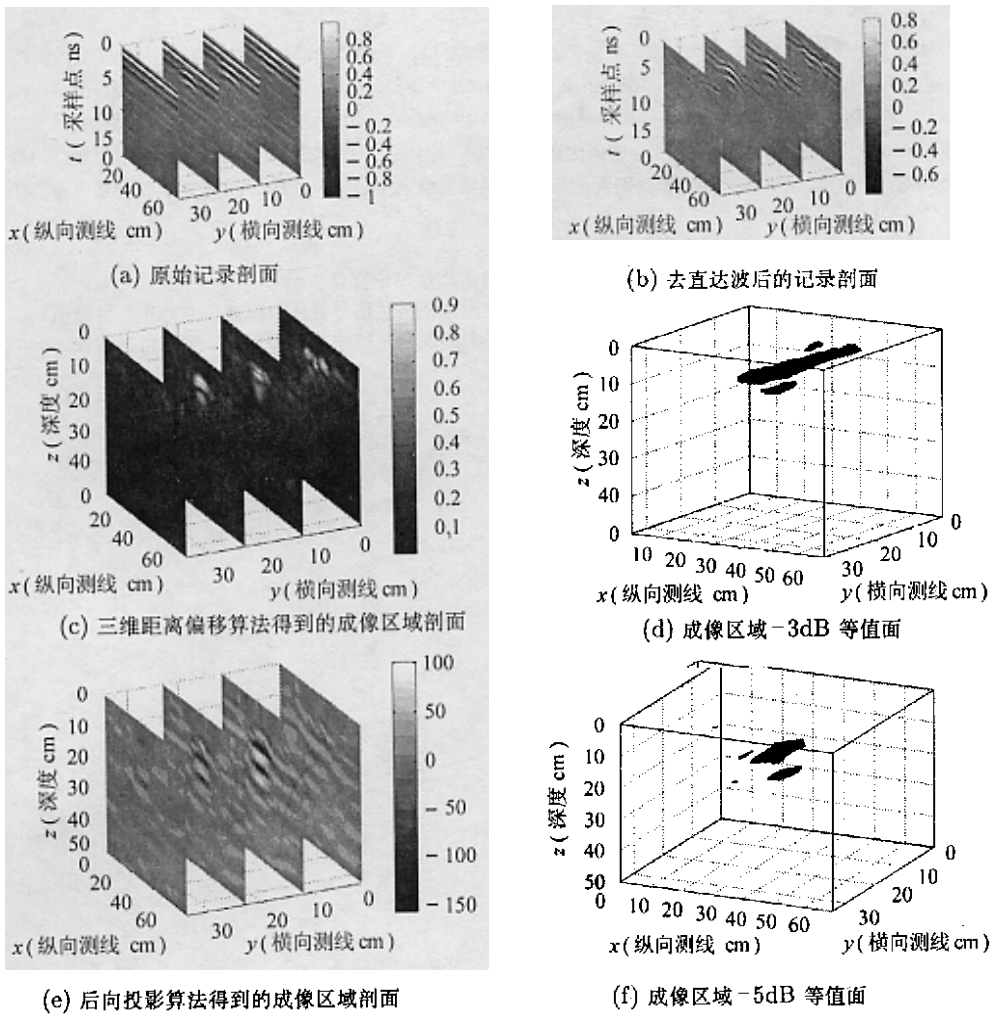


图 4 V 形实心棒的测量数据和处理结果

5 结束语

本文将三维距离偏移算法引入探地雷达近场三维成像中, 推导了成像算法, 给出了实测数据的处理结果。结果表明: (1) 近场三维距离偏移算法应用于探地雷达信号处理中, 可以给出地下未知区域的三维图象, 有助于进行目标判别。(2) 本算法与 BP 算法相比, 很大程度上减少了运算量, 可以满足数据在线处理的要求, 进行目标的实时成像和识别。(3) 今后的工作要考虑以下几个方面: 采用子波分析技术去除背景干扰^[7]; 考虑天线距地面的距离和收发天线之间的偏移并进行合理的建模以及非均匀色散媒质中波速估计的方法。

参 考 文 献

- [1] ASTM, Standard Guide for Using the Surface Ground Penetrating Radar Method for Subsurface Investigation, Designation, D, 6432-99.
- [2] Leone G, Pierri R. Nonlinear models in inversion algorithms for tomographic reconstructions, 8th Intl. Conference on Ground Penetrating Radar, Queensland, Australia: SPIE, 2000, Vol. 4084: 525-529.
- [3] 张安学, 蒋延生, 汪文秉. 探地雷达频率波数域速度估计和成像方法的实验研究 [J]. 电子学报, 2001, 29(3): 315-317.
- [4] 张安学, 蒋延生, 汪文秉, 王成. 探地雷达扫频三维成像方法 [J]. 电波科学学报, 2000, 15(3): 313-316.
- [5] Juan M. Lopez-Sanchez, Joaquim Fortuny-Guasch. 3-D radar imaging using range migration techniques[J]. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 2000, AP-48(5): 728-737.
- [6] Weng Cho Chew 著, 聂在平, 柳清伙译. 非均匀介质中的场与波 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1992: 65-67.
- [7] 詹毅, 梁昌洪, 方广有. 探地雷达回波信号处理中小波变换域滤波方法的研究 [J]. 西安电子科技大学学报, 1999, 26(3): 305-309.

雷文太: 男, 1979 年生, 博士生, 主要研究方向为宽带雷达成像理论及算法。

粟毅: 男, 1961 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向包括雷达信号处理、遥感信息处理、目标识别。

黄仕家: 男, 1948 年生, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为复杂系统中的电磁理论、宽带雷达成像。