

圆周探地雷达测量和成像方法的研究

张安学, 蒋延生, 汪文秉

(西安交通大学微波工程与光通信研究所, 陕西西安 710049)

摘 要: 为了减小传统探地雷达三维成像测量方法的工作量, 本文提出了圆周探地雷达测量方法, 并结合该测量方法的特点, 采用角相关和数据融合技术对圆周探地雷达实验测量数据进行了处理, 验证了圆周探地雷达测量方法的可行性和有效性。

关键词: 探地雷达; 角相关函数; 聚焦滤波器; 数据融合

中图分类号: TN959.17 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 06-0853-04

An Imaging Method for Circular Ground-Penetrating Radar

ZHANG An-xue, JIANG Yan-sheng, WANG Wen-bing

(Institute of Microwave Engineering and Optical Communication Techniques of Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

Abstract: This paper presents a ground-penetrating radar (GPR) data acquisition method called circular scanning to reduce the 3-D image measuring amount. Moreover, by using angular correlation function and data fusion technique to process the experimental data, the high-resolution image of an underground object is obtained. It demonstrates that these methods can be used to improve the GPR image resolution and detection probability.

Key words: ground-penetrating radar; angular correlation function; focusing filter; data fusion

1 引言

无载频脉冲探地雷达是一种利用超宽带电磁脉冲进行地下浅层目标探测的设备, 由于具有高分辨率、实施方便和非破坏性等优点, 已广泛应用于城市建设、交通、考古、军事、环境检测等部门^[1~4]。在探地雷达的应用中, 有时需要对目标能及时快速地检测和识别, 于是如何提高探测速度就成为探地雷达应用中的一个重要的研究内容。除了在数据处理上需要研究算法及相应的处理方法外, 如何提高探地雷达数据采集效率是另一个关键。

在传统探地雷达测量方法中, 为了获得地下目标的三维图像, 一般都是在水平面上沿二维网格测线进行测量^[5,6], 天线的扫描工作量大, 又由于天线机械扫描速度相对较慢, 大量的时间被雷达天线扫描占用, 严重地限制了探地雷达探测速度, 增加了野外作业时间。因而, 减小天线的扫描工作量, 进而提高探地雷达的探测速度是重要关键。为此, 作者在前期工作中提出了计算探地雷达有效口径和最大扫描点间距的公式^[7]。但未改变探地雷达的扫描方式。在本文中, 作者提出圆周探地雷达测量方法的概念, 建议在水平面上沿圆周测线进行扫描, 利用角相关函数技术对地下目标进行成像, 这样大大减少了探地雷达天线的机械扫描工作量。同时, 为了提高探地雷达的检测概率, 本文又采用数据融合技术将不同测线得到的水平剖面进行了融合。

2 基本理论

沿圆周测线进行测量的思想最初来源于医学显微镜 (Medical Microscopy) 中的共焦成像技术 (Confocal Imaging Technique)^[8,9], 后来被应用在合成孔径雷达 (SAR) 成像领域^[10~12]。而对于探地雷达来说, 其数据采集方式和合成孔径雷达又相类同。于是, 作者提出了让探地雷达天线沿圆周测线进行测量, 同时引用共焦成像技术、角相关和数据融合理论对地下目标进行三维成像。

圆周探地雷达的工作原理如图 1 所示。探地雷达收发天线共用, 天线在地面上沿半径为 r_0 的圆周测线进行测量, 扫描点的坐标为 $r_{sn} = (x_{sn}, y_{sn}, 0)$, $n = 1, 2, \dots, N$ 。设在 r_{sn} 处, 探地雷达接收到的信号为 $s_n(t)$, $r_0 = (x_0, y_0, z_0)$ 为地下介质中的任意点, 为了使信号聚焦在 r_0 , 让 $s_n(t)$ 通过一聚焦滤波器 $h_n(t, r_0)$, 聚焦滤波器的输出为:

$$f_n(t, r_0) = s_n(t) \odot h_n(t, r_0) \quad (1)$$

其中 \odot 表示卷积。

设 $f_n(t, r_0)$, $s_n(t)$, $h_n(t, r_0)$ 的傅立叶变换分别为 $F_n(\omega, r_0)$, $S_n(\omega)$, $H_n(\omega, r_0)$, 由式(1)可得:

$$F_n(\omega, r_0) = S_n(\omega) H_n(\omega, r_0) \quad (2)$$

取聚焦函数为:

$$H_n(\omega, r_0) = \exp(i \sqrt{\frac{1}{v}} \omega r_{0n}) \quad (3)$$

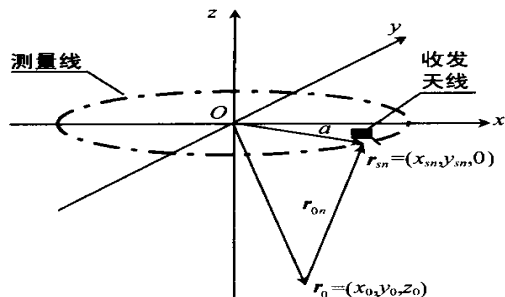


图1 圆周探地雷达工作原理图

其中 v 为电磁波在地下介质中的传播速度, $r_{0n} = |r_{sn} - r_0|$. 聚焦函数的作用即是对各个扫描点的数据进行相位校正, 当 r_0 处有目标时, 从而使各个扫描点的数据通过聚焦后在 $r_0(x_0, y_0, z_0)$ 相位相同.

将式(2)变换到时域, 可得聚焦滤波器的输出为:

$$f_n(t, r_0) = s_n(t - \frac{2r_{0n}}{v}) \quad (4)$$

根据惠更斯原理, 地下界面的每一反射点都可以认为是一个子波源, 这些子波源产生的电磁波到达地表被探地雷达的接收天线所接收, 而探地雷达的成像过程, 其实质是由记录波场 $s_n(t, x, y, z=0)$ 重构目标波场 $f_n(t=0, x, y, z)$ 的过程, 所以成像处理后, 聚焦滤波器的输出为:

$$f_n(r_0) = f_n(t, r_0)|_{t=0} = s_n(t - \frac{2r_{0n}}{v}) \quad (5)$$

其中 v 为电磁波的传播速度, 在文献[13]中给出了估计电磁波速度的方法.

为了提高图像的信噪比, 可以利用共焦技术^[11]和角相关技术^[12]对聚焦滤波器输出的信号进行相关叠加, 共焦函数和角相关函数的定义为:

共焦函数:

$$V(r_0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [f_n(r_0)] \quad (6)$$

角相关函数:

$$R(r_0) = \frac{1}{N} \sum_{\substack{r_{si}, r_{sj} \\ \forall \arg(r_{si}, r_{sj}) = \phi}} [f_i(r_0) \cdot f_j(r_0)] \quad (7)$$

其中 $\arg(r_{si}, r_{sj})$ 表示半径轴 r_{si}, r_{sj} 之间的夹角, ϕ 称为为相关角. 在求角相关函数时, ϕ 可取不同的夹角.

本文中分别称式(6)和(7)为共焦成像和角相关成像方法.

在共焦或角相关成像处理中, 由于受雷达天线波瓣宽度和测量误差的影响, 当沿地表的扫描圆周测线偏离目标中心时, 角相关函数构成的图像变得分散, 虚警概率升高. 为了提高探地雷达的检测概率, 作者在本文中采用了线性数据融合^[14]的办法.

数据融合是指把来自多个传感器的数据和信息, 根据既定的规则, 分析、结合为一个全面的情报, 并在此基础上为用户提供更多的信息. 在本文中, 作者将在不同的圆周测线得到的目标图像进行线性数据融合, 从而提高探地雷达的检测概率. 线性数据融合规则为:

$$\sum_{i=1}^N a_i R_i > H_1 : H_0$$

其中 H_1 代表假设有目标, H_0 代表假设没目标. 在本文中, 作者对该规则作了如下修改.

首先, 在远大于目标深度的地方选一水平面(认为此水平面不含有目标信息, 只有噪声信号), 计算这一水平面上的角相关函数, 于是可估计出此水平面上角相关函数的噪声方差; 给定虚警概率, 利用文献[15]介绍的方法, 可计算出一门限值. 对于每条圆周测线 i , 给出如下判别准则:

$$R_i(r_0) = \begin{cases} R_i(r_0), & R_i^2(r_0) \geq 2 \\ 0, & R_i^2(r_0) < 2 \end{cases}$$

其中 $R_i(r_0)$ 为某一水平面上的角相关函数. 将同一水平面上的 $R_i(r_0)$ 叠加起来, 可得:

$$R(r_0) = \sum_{i=1}^M R_i(r_0), \quad i = 1, \dots, M$$

其中, M 为圆周测线的条数.

3 数值模拟结果与讨论

为了验证圆周探地雷达测量方法和上述成像方法的有效性, 如图2所示情况, 在相对介电常数 $\epsilon_r = 1.9$ 的媒质中埋有一半径为 5.0cm 的金属球, 埋深为 50.0cm. 本文用 FDTD(时域有限差分)计算目标金属球的散射场, 投射波为高斯脉冲形式的平面波, 脉宽为 1.5ns; 计算空间为 $100 \times 100 \times 100$ cm; 采用矩形网格, 空间网格数为 $128 \times 128 \times 128$; 时间步长为 0.015ns, 每道有 512 个采样点. 建立直角坐标系如图2所示. 分别在圆心为 $(0, -25, 0)$ 、 $(0, 0, 0)$ 、 $(0, 25, 0)$, 半径为 20cm 的三个圆周测线上纪录数据, 每条测线上纪录点间隔为 1° .

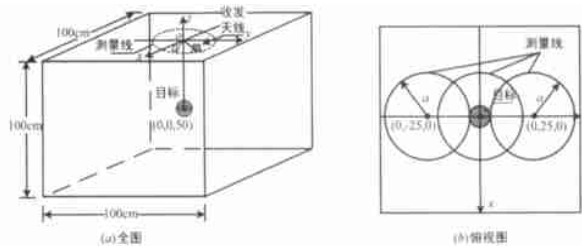


图2 模拟实验测量图

图3(a) - (c)分别是在三条圆周测线记录的原始信号. 在目标所在的深度位置取一水平剖面, 然后分别用共焦函数和角相关函数对原始信号进行处理, 得到图3(d) - (i)所示图像. 在求角相关函数 ϕ 时分别取 $1^\circ, 6^\circ, 11^\circ$ 和 16° . 从图3(e)和3(h)中可以看出, 当圆周测线在目标正上方时, 利用共焦函数和角相关函数可以正确地确定目标在水平面上的分布情况. 当圆周测线偏离目标时(如图3(d)、(f)、(g)、(i)), 由于天线只记录到目标的侧面散射场, 使得成像处理后的目标和实际目标分布产生偏差. 为了解决上述问题, 在下面对实验数据的处理中, 对于同一水平剖面, 利用线性数据融合方法将在不同测线获得的处理图像融合在一起, 构成一幅图像.

另外, 比较共焦函数和角相关函数成像, 从图3中可以看出, 利用角相关函数获得的图像的信噪比高于共焦函数. 在下

面对实验数据的处理中,本文只采用角相关函数对数据进行 处理.

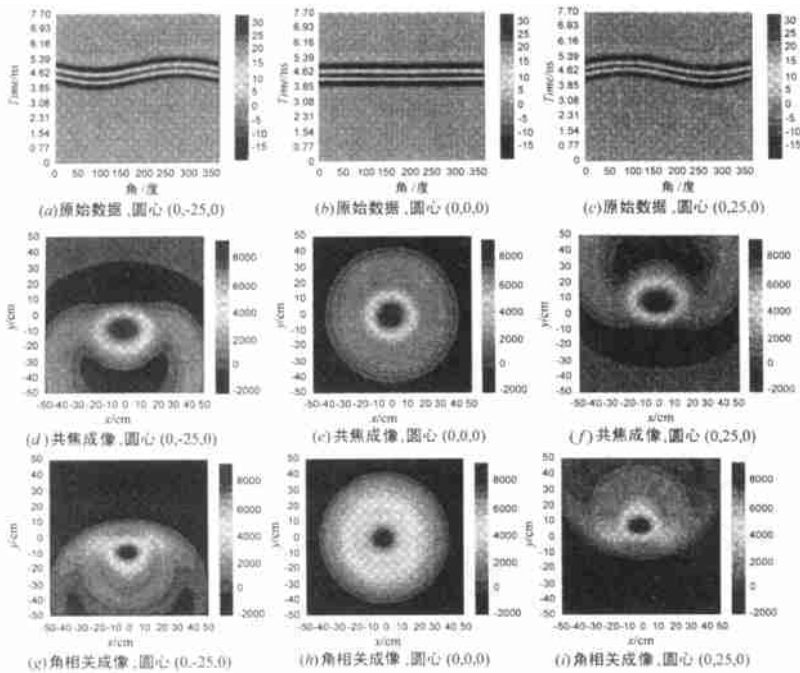


图 3 模拟数据的共焦成像和角相关成像

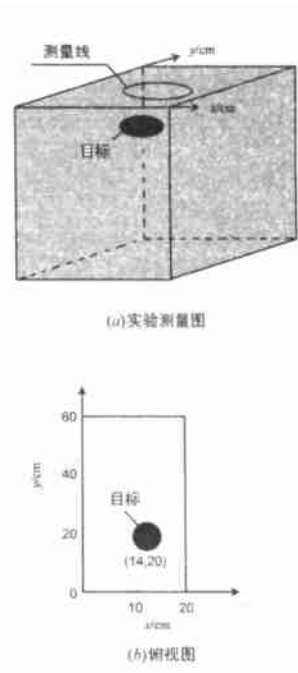


图 4 实验测量图

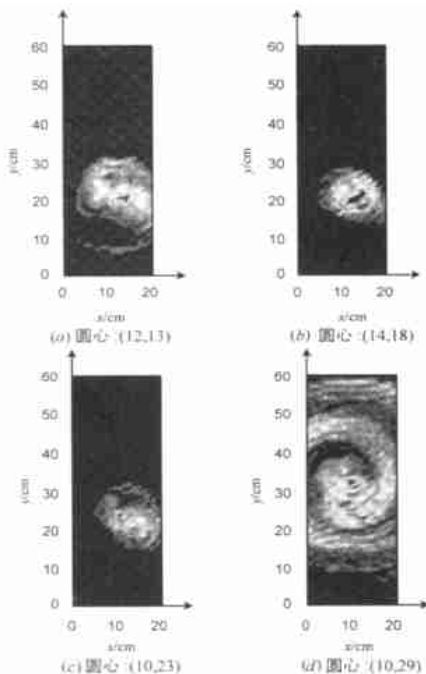


图 5 角相关成像

4 实验数据处理与讨论

如图 4 所示,沙坑中埋有一直径为 5.0cm 的圆形金属薄片,埋深为 6.0cm,目标在水平剖面的相对位置如图 4 (b) 所示.探地雷达沿不同圆周测线扫描,各个圆周测线的半径相同(为 5.0cm),但圆心位置不同.在每条圆周测线上均匀分布 120 个扫描点.然后,在目标所在的水平面上,计算在各个圆周测线扫描所得的角相关函数(如图 5 (a) - (d) 所示).计算

角相关函数时, ϕ 分别取 3° 、 6° 、 9° 和 12° .

如图 5 (a) - (d) 所示,由于雷达天线波瓣宽度和测量误差的影响,当沿地表的扫描圆周测线偏离目标中心时,角相关函数构成的图像变得分散,虚警概率升高.为了提高探地雷达的检测概率,对图 5 (a) - (d) 采用线性数据融合的办法进行数据融合.如图 6 所示,该图是由数据融合后的图像,处理过程中,选取 15cm 深度的水平面计算噪声方差,虚警概率为 0.001.由图可以看出,经过数据融合后,目标的位置和轮廓明显地突出出来,大大地提高了雷达的检测概率.

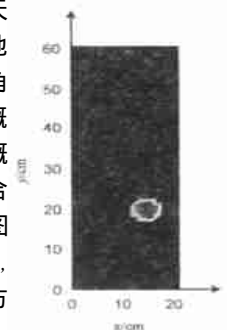


图 6 数据融合后的图像

5 结论

通过以上工作,得出以下结论:

- (1) 圆周探地雷达不仅可以减少天线扫描的工作量,同时,由于处理时采用角相关函数技术,可以得到高信噪比的目标图像.
- (2) 采用数据融合技术可以降低虚警概率,提高探地雷达的检测概率.
- (3) 利用角相关函数对地下目标成三维图像,需要对地下的各个水平切面分别作角相关处理,这样计算的工作量较大,还需要进行进一步探索三维成像的快速算法.
- (4) 圆周扫描对于给定目标来说,不同的入射角度有不同的(相对目标的)极化方向.在探地雷达实际探测中,一般只考虑天线的极化方向,对于目标的极化特性,可用多极化探地雷

收发阵列天线来解决.

致谢 本文实验所用设备和场地由中国电波传播研究所青岛分部提供,在实验过程中,该部方广有高级工程师、曾奕等同志还给予了大力支持和协助,作者在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Gian Guido Centili ,Umberto Spagnolini. Electromagnetic inversion in monostatic ground penetrating radar :TEM horn calibration and application [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,2000 , 38(4) :1936 - 1946.
- [2] Thokild B Hansen ,Peter M.Johansen. Inversion scheme for ground penetrating radar that takes into account the planar air-soil interface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,2000 ,38(1) : 496 - 506.
- [3] Chi-Chih Chen ,Soumya Nag. A standoff focused-beam land mine radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,2000 ,38(1) .
- [4] Claudio Bruschini ,Bertrand Gos. Ground penetrating radar and imaging metal detector for antipersonnel mine detection [J]. Journal of Applied Geophysics ,1998 ,40 :59 - 71.
- [5] 张安学 ,蒋延生 ,汪文秉. 探地雷达扫频三维成像方法 [J]. 电波科学学报 ,2000 ,15(3) :313 - 316.
- [6] Mark Gasmueck. 3-D ground-penetrating radar applied to fracture imaging in gneiss [J]. Geophysics ,1996 ,61(4) :1050 - 1064.
- [7] 张安学 ,蒋延生 ,汪文秉. 有关探地雷达有效口径和扫描点间距选择的实验研究 [J]. 电波科学学报 ,2001 ,16(2) :256 - 260.
- [8] M Minsky. Memoir on inventing the confocal scanning microscope [J]. Scanning ,1996 ,10 :128 - 138.
- [9] J W Lichtman. Confocal Microscopy [M]. USA :Sci Amer ,1994.
- [10] Akira Ishimaru ,Tsz King Chan. An imaging technique using confocal circular synthetic aperture radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,1998 ,36(5) :1524 - 1530.
- [11] Tsz King Chan , Yasuo Kuga. Experimental studies on circular SAR imaging in clutter using angular correlation function technique [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing ,1999 ,37(5) : 2192 - 2197.
- [12] Mehrdad Soumekh. Reconnaissance with slant plane circular SAR imaging [J]. IEEE Transactions on Imaging Processing ,1996 ,5(8) .
- [13] 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.
- [14] 康耀红. 数据融合理论与应用 [M]. 西安 :西安电子科技大学出版社 ,1997.
- [15] Håkan Bunzell. Detection of shallowly buried objects using impulse radar [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing , 1999 ,37(2) :875 - 886.

作者简介:

张安学 男,1972年出生于河南省,在读博士,1999年3月在西安交通大学获硕士学位,现在西安交通大学攻读博士学位,主要从事脉冲雷达信号处理和成像方法的研究.

蒋延生 男,1957出生于陕西省,教授,1982年毕业于西安交通大学无线电专业,毕业后留校任教,1989年获电磁场与微波技术专业硕士学位,主要从事天线和瞬态电磁场理论及其应用方面的研究.