

# 基于探地雷达天线方向性的直埋电缆定位方法

李国伟<sup>1</sup>, 王俊波<sup>1</sup>, 唐琪<sup>1</sup>, 张殷<sup>1</sup>, 简淦杨<sup>2</sup>, 廖一帆<sup>2</sup>, 李果<sup>2,3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司佛山供电局, 佛山 528000;

2. 广州南网科研技术有限责任公司, 广州 510663;

3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663)

**摘要:** 使用探地雷达获取直埋电缆位置信息, 需对待测区域进行高密度探测。运用仿真工具, 分析了探地雷达常用的 bowtie 天线方向性特征和探测范围, 并提出了一种使用探地雷达两点旋转测量的单根直埋电缆定位方法。首先对待定区域初步探测, 确定有效测点, 进行旋转测量; 然后记录多个测点数据, 结合测点位置信息, 开展向量运算, 对直埋电缆位置进行定位现场模拟试验表明, 该方法的定位偏差接近 5%, 可用于直埋电缆探测与定位。

**关键词:** 探地雷达; 直埋电缆; 天线方向性; 空间定位

**中图分类号:** P631 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.06.13

## 0 引言

随着城市快速发展, 电缆线路不断增加。但很多直埋电缆位置信息缺失, 给城市建设带来隐患<sup>[1-2]</sup>, 直埋电缆精确定位对市政建设尤为重要。

目前主要采用电磁法进行直埋电缆探测, 可利用电缆自身产生的电磁波信号<sup>[3]</sup>, 或通过外加激励分析电缆反射的电磁波<sup>[4-5]</sup>。由于电缆外包钢制铠装以及金属屏蔽等影响, 其向外发射电磁波信号较弱。要获取较强信号, 一般需在外部设置激励。探地雷达由于其高分辨率、高效性、无损性等优势, 已广泛应用于水管等地下管线探测<sup>[6-8]</sup>。其基本原理是通过天线向地下发射电磁波, 并接收电磁波在地下传播过程中产生的反射和散射信号。根据电磁波传播规律, 处理和解释接收信号, 便可得到地下介质的结构信息<sup>[9]</sup>。该技术逐步应用于电力系统地网检测<sup>[10]</sup>、直埋电缆<sup>[11]</sup>定位。

探地雷达在直埋电缆定位中的应用, 主要集中在电缆回波图像的获取与分析。其定位依旧是通过对待测区域大量点位测量, 获取地下目标的 B-Scan 回波图像, 通过双曲线提取等方法, 结合波速估计来计算目标深度。为提高探地雷达的检测效率与定位精度, 近年来开展了大量图像处理与智能识别等研究, 例如神经网络<sup>[12]</sup>、模糊聚类的模式识别方法<sup>[13]</sup>、图像分割和霍夫变换方法<sup>[14]</sup>、图像分割和模板匹配方法<sup>[15]</sup>、基于形态学的曲线检测<sup>[16]</sup>等。这一类人工智能方法, 可以提高目标检测效率, 但依旧需要大量的数据训练。

同时上述方法的基础是双曲线识别, 实际探测时需进行大范围、高密度测量, 费时费力, 无法满足现场快速探测的需求。为此, 笔者提出一种基于探地雷达天线方向性的直埋电缆定位方法, 实现直埋电缆快速探测。

收稿日期: 2023-08-17

基金项目: 南方电网公司科技项目(GDKJXM20220265)

第一作者: 李国伟(1977—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事电气试验等研究, E-mail: 1957852@qq.com。

# 1 探地雷达天线方向性

## 1.1 探地雷达天线仿真分析

理论分析时,常将探地雷达天线简化为理想点源,电磁波在土壤中呈球面传播<sup>[17]</sup>。实际情况下,探地雷达天线具有一定的方向性,电磁波沿非均匀曲面传播。目前商业探地雷达最常用的是 bowtie 天线<sup>[18]</sup>,是一种典型的地耦合天线,其结构如图 1 所示。笔者采用 HFSS 软件<sup>[19]</sup>,建立该天线仿真模型,具体参数见表 1。底板厚度为 6 mm,相对介电常数为 6。

图 2 为该 bowtie 天线 S11 曲线,天线中心频率为 1.25 GHz,工作频段为 1.1 GHz~1.5 GHz,在此范围内 S11 均小于 -10 dB。同时在实际应用中,需保障天线有良好的方向性,即使探地雷达系统集中更多能量向地下辐射,一般要求天线的辐射特性没有明显的副瓣。笔者分析了 1.1 GHz、1.25 GHz 与 1.5 GHz 下该天线的方向性,图 3 为天线的 E 面和 H 面归一化方向图与三维辐射方向图。采用 bowtie 天线进行探测时,主要沿 E 面向下发射电磁波,实际应用时会在天线后方放置吸波材料与屏蔽背腔,从而抑制后向辐射。在天线工作频段范围内,辐射方向图中主瓣较宽且曲线光滑,对地方向性较好,波瓣宽度约为 60°。由天线的三维辐射方向图

也可明显看出,天线辐射具有明显的方向性,且非均匀球面传播。

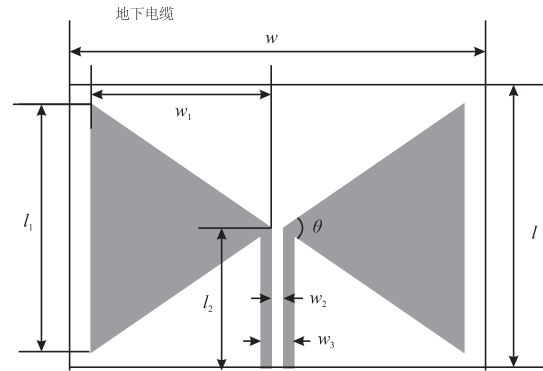


图 1 bowtie 天线示意图  
Fig. 1 Bowtie antenna diagram

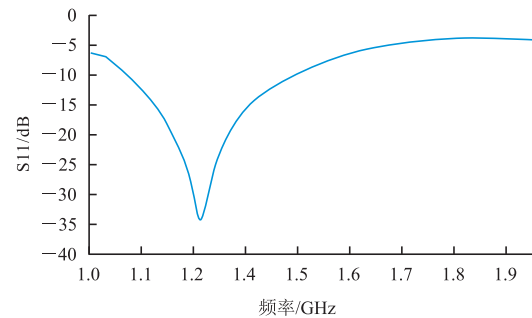


图 2 bowtie 天线 S11 曲线  
Fig. 2 S11 parameter curve of bowtie antenna

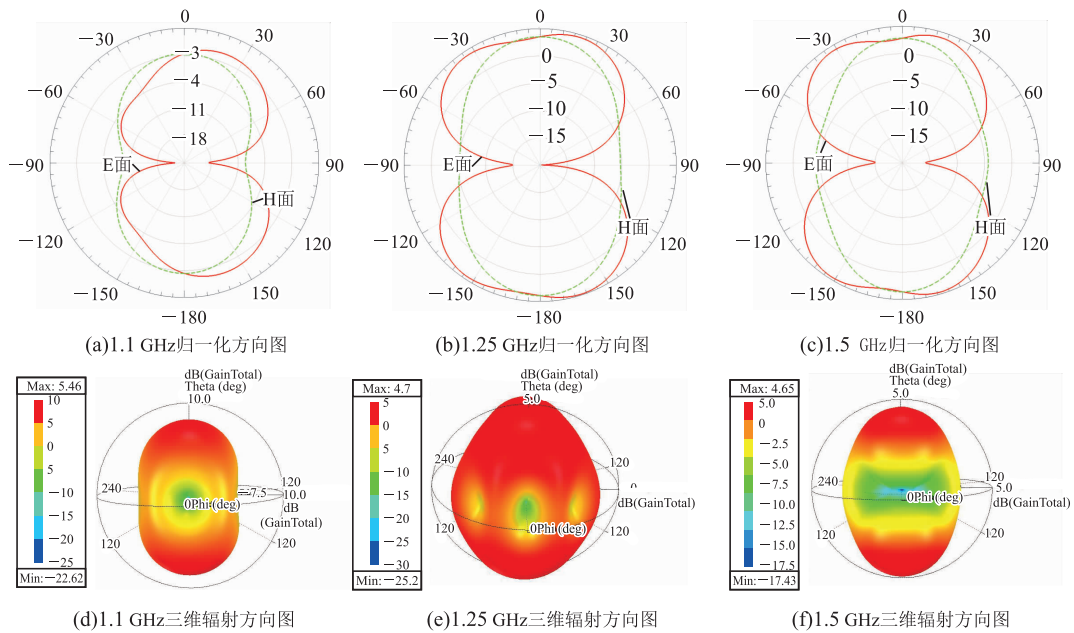


图 3 bowtie 天线的 E 面和 H 面归一化方向图与三维辐射方向图

Fig. 3 Normalized directional pattern (E-plane and H-plane) and 3D radiation pattern of bowtie antenna

表 1 bowtie 天线参数  
Tab. 1 Bowtie antenna parameters

参数	$w$	$w_1$	$w_2$	$w_3$
尺寸	235 mm	75 mm	10 mm	12.5 mm
参数	$l$	$l_1$	$l_2$	$\theta$
尺寸	235 mm	90 mm	150 mm	$60^\circ$

### 1.2 探地雷达有效探测范围

天线存在方向性,探地雷达在不同深度下,都存在有效探测范围,并不是标准圆形。简化分析时,某一深度的探测截面可近似为椭圆,如图 4 所示。该探测范围与介质的相对介电常数关系如下,即

$$a = \frac{\lambda}{4} + \frac{d}{\sqrt{(\epsilon-1)}} \quad (1)$$

$$b = \frac{a}{2} \quad (2)$$

式中, $\epsilon$  为介质的相对介电常数, $\lambda$  为电磁波波长, $d$  为探测深度, $a$ 、 $b$  分别为探地雷达有效探测范围椭圆区域长轴与短轴。

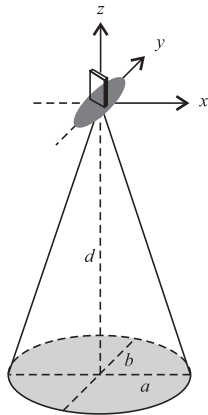


图 4 探地雷达有效探测范围

Fig. 4 Effective detection range of ground penetrating radar

## 2 基于探地雷达旋转测量的直埋电缆定位方法

### 2.1 单点旋转测量

为增强信号探测强度,一般将天线最大增益设计在垂直于地表方向。进行共偏移法探测时,获取的 B-scan 图的双曲线,即为非均匀曲面上回波叠加,双曲线顶点为最短回波情况。由于实际天线存在方向性,获取的双曲线并不规则且与天线性能相关,同时所需的测量点较多。

对于单一直埋电缆,在某点进行测量时,如果能

获取有效的回波信息,旋转探地雷达改变天线角度,在一定条件下可得到另一组回波信息,这两组回波信息来自同一电缆的不同位置。如图 5 所示,直埋电缆埋深为  $d$ ,且水平布置。探地雷达沿  $x$  轴水平布置,埋深  $d$  上存在有效探测范围 1,电缆在范围 1 内的回波被探地雷达接收,输出深度信息  $r_1$ 。假设电缆在范围 1 的中点为 A,在误差允许的情况下,可认为深度信息  $r_1$  为探地雷达到 A 点的距离。水平旋转雷达  $\theta$  角,埋深  $d$  上存在有效探测范围 2。如果电缆依旧处于有效探测范围 2 内,同理可得深度信息  $r_2$  为探地雷达到中心 B 点的距离。雷达在埋深  $d$  的投影为  $O'$ ,则电缆与探地雷达的水平距离就是三角形  $ABO'$  的高  $O'M$ 。

结合地理坐标信息,即可得到两个探测区连线的向量,该向量与电缆埋深  $d$  以及高  $O'M$  相关。

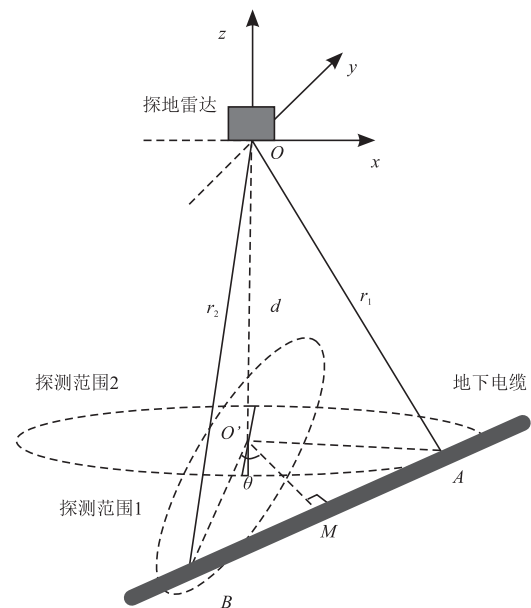


图 5 探地雷达旋转测量示意图

Fig. 5 Rotation measurement of ground penetrating radar

### 2.2 两点旋转测量

在单点测量的基础上,沿某方向移动测点,并旋转测量两组回波信号,可以得到另外一个向量。由于电缆的唯一性,两组向量方向相同,可建立方程式

求解得到电缆埋深,及与测点的距离。即为探地雷达两点旋转测量方法,该方法需满足一定的适用条件:①直埋电缆水平埋置,深度保持不变,抽象为一条直线;②探地雷达在测点处能探测到直埋电缆信号,且旋转一定角度后,依旧能探测到直埋电缆信号;③仅针对单一电缆目标。

探地雷达两点旋转式测量时,会存在如下三种情况:

1)探地雷达测点保持不变,旋转一周,探测的深度信息  $r$  不变,则直埋电缆位于探地雷达正下方,此时埋深即为  $r$ 。

2)探地雷达测点保持不变,旋转时只在特定角度  $\theta$  有深度信息  $r$ ,则推断目标在有效探测区边缘。此时探测信号一般不强,需沿该角度移动探地雷达,使得电缆处于有效探测范围内。

3)一般情况如图 6 所示,水平敷设的直埋电缆埋深为  $d$ 。在测点 1 时,探地雷达沿  $x$  轴水平布置,电缆在探测区域的中心点为 A,探地雷达深度信息  $r_1$ 。水平旋转探地雷达  $\theta$  角,此时中心点为 B,对应的深度信息  $r_2$ 。则有

$$A = (\sqrt{r_1^2 - d^2}, 0, -d) \quad (4)$$

$$B = (\sqrt{r_2^2 - d^2} \cdot \cos\theta, \sqrt{r_2^2 - d^2} \cdot \sin\theta, -d) \quad (5)$$

$$\vec{BA} = (\sqrt{r_1^2 - d^2} - \sqrt{r_2^2 - d^2} \cdot \cos\theta, -\sqrt{r_2^2 - d^2} \cdot \sin\theta, 0) \quad (6)$$

式中,  $\theta$  为探地雷达在测点 1 的转向角。  $r_1, r_2$  分别为探地雷达在测点 1 转动前后的深度信息。

将探地雷达沿  $x$  轴正方向平移一定距离  $s$  至测点 2,探地雷达沿  $x$  轴水平布置,天线探测区域的中心点为 C,探地雷达水平旋转  $\theta'$  后,中心点为 D,则有

$$\vec{DC} = (\sqrt{r_1'^2 - d^2} - \sqrt{r_2'^2 - d^2} \cdot \cos\theta' - s - \sqrt{r_2'^2 - d^2} \cdot \sin\theta', 0) \quad (7)$$

式中,  $\theta'$  为探地雷达在测点 2 的转向角,  $r_1', r_2'$  分别为探地雷达在测点 2 转动前后的深度信息。

由直埋电缆存在唯一解,则有

$$\vec{DC} / \vec{BA} \quad (8)$$

$$\frac{\sqrt{r_1^2 - d^2} - \sqrt{r_2^2 - d^2} \cdot \cos\theta}{\sqrt{r_1'^2 - d^2} - \sqrt{r_2'^2 - d^2} \cdot \cos\theta' - s} = \frac{\sqrt{r_2^2 - d^2} \cdot \sin\theta}{\sqrt{r_2'^2 - d^2} \cdot \sin\theta'} \quad (9)$$

实际测量时,  $s, r_1, r_2, r_1', r_2', \theta, \theta'$  均为已知量,代入式(9)可解出直埋电缆埋深  $d$ ,再代入式(4)~式(6),解出向量。

在  $\triangle AO'B$  中,根据三角函数公式,计算出  $\vec{O'M}$  向量,则可获得直埋电缆在测点 1 位置的水平方向角度(即图 6 中  $\angle O'AB$ )以及离测点 1 的水平距离。理论上可解出两组距离参数,即直埋电缆在  $O'P'$  连线的镜像,通过定位方法的设计可有效排除镜像的影响。

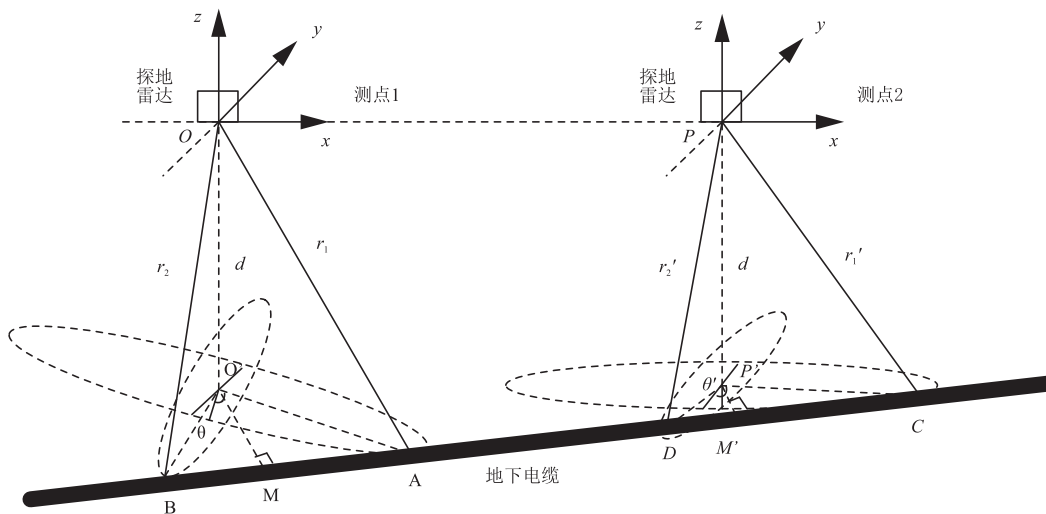


图 6 探地雷达两点旋转测量方法示意图

Fig. 6 Rotation measurement of ground penetrating radar at two point

### 2.3 直埋电缆定位方法

根据上述原理,基于探地雷达旋转测量的直埋

电缆定位方法具体为:

1)确定有效测点

在直埋电缆可能存在的区域放置探地雷达,固定探地雷达位置,旋转多个角度,观察探地雷达成像图是否具备电缆特征。若无相关信息,标记为无效测点,移动探地雷达,继续旋转测量;若有信号且数据变化较小,则说明电缆位于探地雷达正下方;若仅有一个方向有信号,则认定电缆处于有效探测区域边缘,标记为无效测点,沿该方向移动探地雷达,继续旋转测量;若有信号且数据变化明显,则有效探测区域内存在直埋电缆,标记为有效测点。

### 2) 测量位置数据

①任取一个有效测点为测点 1,用集成九轴高精度陀螺仪及 GPS 定位模块的探地雷达探测,实时读取探地雷达航向角及经纬度信息;

②在测点 1,固定探地雷达位置及水平方向,确定测点 1 与下一测点 2 之间的连线为  $x$  轴向。记录探地雷达航向角,读取探地雷达深度信息  $r_1$ ;将探地雷达旋转  $\theta$ ,读取深度信息  $r_2$ , $\theta$  为第一次测量旋转角度,可依据实际需求选取不同的值;

③沿着  $x$  轴正方向到测点 2,依照步骤②,记录测点 2 处两次测量的深度信息  $r_1'$ 、 $r_2'$  以及测量旋转角度  $\theta'$ ;

④比较探地雷达未旋转时,深度信息  $r_1$ 、 $r_1'$ 。如移动后深度信息变小,则认为雷达朝电缆方向移动,测点 2 的数据有效;如数据变大,则认为雷达朝电缆镜像方向移动,需改变移动方向,重新进行上一步测量。

### 3) 定位直埋电缆

根据探地雷达旋转测量的定位算法,计算得到直埋电缆埋深  $d$ 、在测点 1 的水平方向角度以及离测点 1 的水平距离。



(a) 实际场地测点划分

## 3 试验验证

### 3.1 模拟条件与测量设备

搭建模拟试验环境,为室外无水泥管、燃气管等干扰的空地,在地下直埋一段电缆,具体参数见表 2。选用的探地雷达为中国电波传播所的 LTD-2600,集成了九轴高精度陀螺仪及 GPS 定位模块,具体参数见表 3。

表 2 电缆尺寸

Tab. 2 Cable size

电缆参数	尺寸/cm
埋深	30
外径	6
长度	85

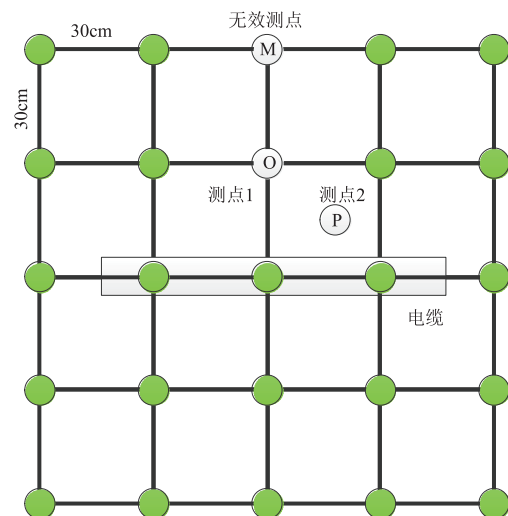
表 3 探地雷达参数

Tab. 3 Ground penetrating radar parameters

指标	参数
天线频率	1.2 GHz
采集方式	时间模式
采样点数	512
采样时窗	25 ns
道间距离	0.6 cm

### 3.2 试验方法

将探测地面进行网格划分,以电缆所埋处为中轴线,最小单元格尺寸是 30 cm × 30 cm,如图 7 所示。根据 2.3(1)所述,首先沿网格初探(图 7(a)中虚线为测点移动路径)。根据测点布置,从左往右,从上至下,依次把探地雷达放置在方格交叉点,观察



(b) 测点示意

图 7 探测地面网格划分示意图

Fig. 7 Schematic diagram of ground grid division for detection

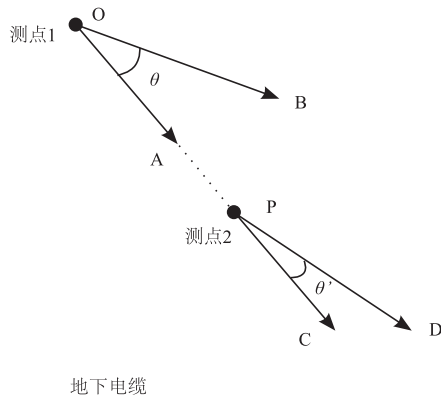


图8 测点试验方案示意图

Fig. 8 Schematic diagram of measurement point

探地雷达图像,确定有效测点。根据 2.3 描述的定位方法,试验方案如图 8 所示。

3.3 试验结果

无效测点与有效测点的图像如图 9(a)、9(b)所示,确定 O 点为有效测点 1,P 点为有效测点 2。在 O 点,雷达箭头朝向与电缆方向呈 45°夹角,获取电缆信号点 A 数据;位置不变,旋转探地雷达方向  $\theta$ ,

获取电缆信号点 B 数据。再沿探地雷达信号增强方向移动距离  $s$  至 P 点,保持雷达箭头朝向与电缆方向呈 45°夹角,获取电缆信号点 C 数据;位置不变,旋转探地雷达方向  $\theta'$ ,获取电缆信号点 D 数据。根据探地雷达两点旋转测量原理,对电缆信号点 A、B、C、D 数据进行计算,获得电缆相对于测点 1 的定位信息。具体试验参数为:①测点 1 与测点 2 间的平移距离  $s=21.2$  cm;②测点 1 处探地雷达旋转角度  $\theta$  为  $5^\circ$ ,测点 2 处探地雷达旋转角度  $\theta'$  为  $3^\circ$ ;③测点 1 与电缆的水平直线距离为 30 cm,测点 2 与电缆的水平直线距离为 15 cm;④电缆埋深为 30 cm。

测点 1、2 的雷达图像如图 9(c)、9(d)、9(e)、9(f)所示,旋转前后得到的明暗条纹出现变化,明暗条纹处即为电缆回波传播时长。通过深时转换,得到 A、B、C、D 四点的深度信息见表 4,将该数据以及  $s=21.2$  cm、 $\theta=5^\circ$ 、 $\theta'=3^\circ$  代入式(9)中,解得埋深  $d=28.4$  cm,与实际电缆埋深偏差为 5.33%;将埋深  $d$  代入式(4)~式(6),通过三角函数公式,计算出电缆相对于当前测点 1 位置,水平方向角度为  $39.8^\circ$  加上测点 1 水平航向角,电缆距离当前测点 1 的水平距离 28.6 cm,与实际水平距离 30 cm 接近,

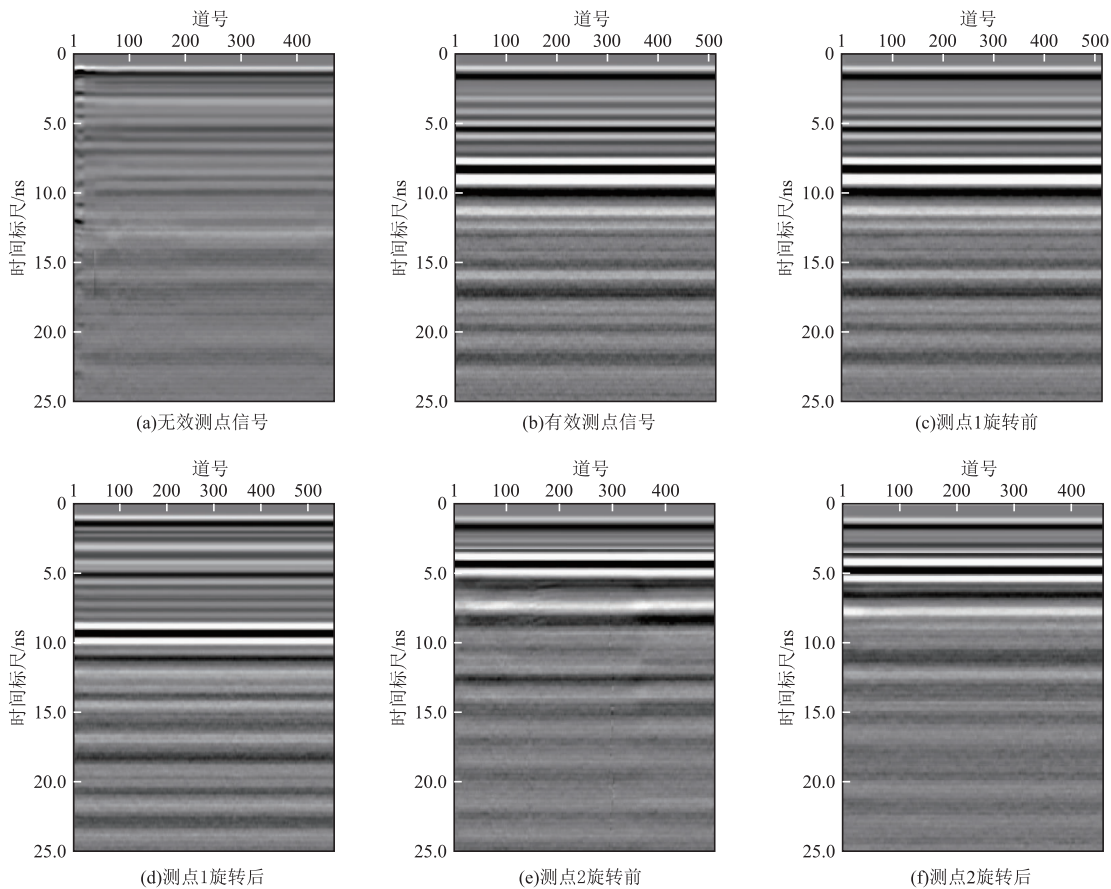


图9 探地雷达图像对比

Fig. 9 Comparison of ground penetrating radar images

表 4 电缆信号点数据

Tab. 4 Data at cable signal point

序号	电缆信号点	深度信息/cm
1	A 点	37.8
2	B 点	42.6
3	C 点	17.5
4	D 点	18.2

偏差为 4.67%。试验结果表明基于探地雷达旋转测量的直埋电缆定位方法,可有效快捷获取电缆埋深及方位。

## 4 结论

1) 由于探地雷达天线各方向辐射的不均匀性,采用探地雷达旋转测量方法,可为直埋电缆定位提供有效且无冗余的探测数据。

2) 提出了一种基于探地雷达旋转测量的直埋电缆定位方法,通过两测点旋转测量,可计算得到直埋电缆埋深及方位。

3) 现场试验表明该定位方法偏差较小,可实现直埋电缆的准确快速定位。

### 参考文献:

- [1] 孙伟,郭海涛,徐青,等. 基于广义 Hough 变换的探地雷达图像地下管线提取方法[J]. 测绘科学技术学报, 2013, 30(3): 251-254.  
SUN W, GUO H T, XU Q, et al. Underground pipeline extraction method in ground-penetrating radar images based on the generalized Hough transform[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2013, 30(3): 251-254. (In Chinese)
- [2] 栗宝鹏,刘栋臣,王志豪,等. 基于电磁原理的浅地表地质病害探测方法及应用[J]. 工程地球物理学报, 2022, 19(6): 753-761.  
LI B J, LIU D C, WANG Z H, et al. Electromagnetic method and application for geological defects detection in shallow surface[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2022, 19(6): 753-761. (In Chinese)
- [3] 祝美灵,刘舒雨,韦依,等. 基于六线圈的地下电力电缆定位技术研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(3): 176-180.  
ZHU M L, LIU S Y, WEI Y, et al. A novel underground cable positioning system based on six induction coils[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(3): 176-180. (In Chinese)
- [4] 杨林. 探地雷达铁路轨枕干扰特性分析[J]. 物探化探

计算技术, 2024, 46(4): 453-461.

YANG L. Analysis of interference characteristics of ground penetrating radar railway sleepers[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(4): 453-461. (In Chinese)

- [5] 蔡文龙,周凯,王罡. 基于探地雷达的沥青路面结构内部隐性病害量化识别方法研究[J]. 物探化探计算技术, 2022, 44(5): 597-604.  
CAI W L, ZHOU K, WANG C. Quantitative identification method of hidden disease in asphalt pavement structure based on ground penetrating radar[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 44(5): 597-604. (In Chinese)
- [6] 陈少博,朱盛延,石宗源,等. 探地雷达对非金属管线有效探测深度的研究[J]. 物探化探计算技术, 2023, 45(6): 796-802.  
CHEN S B, ZHU S Y, SHI Z Y, et al. Research on effective detection depth of non-metallic pipelines by ground-penetrating radar[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 45(6): 796-802. (In Chinese)
- [7] 韩佳明,仲鑫,景帅,等. 探地雷达在黄土地区城市地质管线探测中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1476-1481.  
HAN J M, ZHONG X, JING S, et al. The application of geological radar to urban geological pipeline detection in the loess area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1476-1481. (In Chinese)
- [8] 胡群芳,郑泽昊,刘海,等. 三维探地雷达在城市市政管线渗漏探测中的应用[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2020, 48(7): 972-981.  
HU Q F, ZHENG Z H, LIU H, et al. Application of 3D ground penetrating radar to leakage detection of urban underground pipes[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2020, 48(7): 972-981. (In Chinese)
- [9] 李炎清,张关发,崔志猛,等. 基于 YOLOX-MobileNetV3 模型的路面病害智能识别研究[J]. 交通节能与环保, 2023, 19(3): 11-17.  
LI Y Q, ZHANG G F, CUI Z M, et al. Automatic pavement disease identification research based on YOLOX-MobileNetV3 model[J]. Transport Energy Conservation & Environmental Protection, 2023, 19(3): 11-17. (In Chinese)
- [10] 陈文涛,周利兵,李山,等. 基于探地雷达对变电站接地网的成像检测技术[J]. 电瓷避雷器, 2018(3): 54-59.

- CHEN W T, ZHOU L B, LI S, et al. Imaging detection technology of substation grounding network based on ground penetrating radar[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2018(3): 54—59. (In Chinese)
- [11] 程江洲, 陈秋航, 卞九洲, 等. 探地雷达技术在变电站地层隐蔽管线探测中的应用[J]. *现代雷达*, 2021, 43(2): 82—88.
- CHENG J Z, CHEN Q H, BIAN J Z, et al. Application of ground penetrating radar to substation concealed pipeline detection[J]. *Modern Radar*, 2021, 43(2): 82—88. (In Chinese)
- [12] 方宏远, 马铎, 王念念, 等. 基于融合卷积神经网络的多种类管道病害检测方法[J]. *北京工业大学学报*, 2022, 48(6): 561—571.
- FANG H Y, MA D, WANG N N, et al. Detection algorithm for multiple underground pipeline diseases based on a fusion convolutional neural network[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2022, 48(6): 561—571. (In Chinese)
- [13] DELBO S, GAMBA P, ROCCATO D. A fuzzy shell clustering approach to recognize hyperbolic signatures in subsurface radar images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2000, 38(3): 1447—1451.
- [14] HANNA T, HASKETT J, THOMAS BROACH. Automatic mine detection algorithm using ground penetrating radar signatures[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 39(5): 942—952.
- [15] 胡进峰, 周正欧. 浅地层探地雷达目标探测和定位新方法[J]. *仪器仪表学报*, 2006, 27(4): 371—375.
- HU J F, ZHOU Z O. Target detection and orientation in sub-surface penetrating radar data[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(4): 371—375. (In Chinese)
- [16] 郝彤, 赵杰. 面向双曲线形态的探地雷达图像识别技术综述[J]. *电子学报*, 2019, 47(6): 1366—1372.
- HAO T, ZHAO J. A brief review of the hyperbola signature recognition techniques for ground penetrating radar[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2019, 47(6): 1366—1372. (In Chinese)
- [17] GIANNAKIS I, GIANNOPOULOS A. A novel piecewise linear recursive convolution approach for dispersive media using the finite-difference time-domain method[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2014, 62(5): 2669—2678.
- [18] 郭晨, 刘策, 张安学. 探地雷达超宽带背腔蝶形天线设计与实现[J]. *电波科学学报*, 2010, 25(2): 221—226.
- GUO C, LIU C, ZHANG A X. Design and implement of an UWB bow-Tie antenna with back-cavity for ground penetrating radar[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2010, 25(2): 221—226. (In Chinese)
- [19] 彭宇, 王蕾, 郭福强, 等. 一种超宽带小型化探地雷达天线的设计[J]. *物探与化探*, 2014, 38(4): 750—753.
- PENG Y, WANG L, GUO F Q, et al. The design of an ultra-wideband miniaturized GPR antenna[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(4): 750—753. (In Chinese)

## Underground cable target detection method based on antenna directionality of ground penetrating radar

LI Guowei<sup>1</sup>, WANG Junbo<sup>1</sup>, TANG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Yin<sup>1</sup>, JIAN Ganyang<sup>2</sup>, LIAO Yifan<sup>2</sup>, LI Guo<sup>2,3</sup>

(1. Foshan Power Supply Bureau, Foshan 528000, China;

2. China Southern Power Grid Research Technology Co., Ltd, Guangzhou 510663, China;

3. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Ground penetrating radar is always used for underground cable detection, which requires high specialization and data richness. Thus, this paper analyze a bowtie antenna, which is often used in ground penetrating radar, including antenna frequency band characteristics and directionality. According to the antenna directionality, this paper proposed a rotation measurement method of ground penetrating radar to obtain effective and concise detection data. Firstly practical measurement point is determined through a preliminary exploration of the undetermined area. Rotation measurement is conducted at the effective measurement points. The underground cable position is obtained by conducting vector operation and combining measurement point information. A test was conducted to verify the method's effectiveness. The test result s s that this method's localization error is about 5%. It can be used for underground cable detection.

**Keywords:** ground penetrating radar; underground cable; antenna directionality; spatial positioning