

# 基于 SAW-RFID 技术的电力管线快速定位

蔡力军

(国网福建省电力有限公司 信息通信分公司,福建 福州 350000)

**摘要:**目前城市地下电力管线错综复杂,迫切需要一种对电力管线快速标识定位的方法。该文提出了一种基于声表面波射频识别(SAW-RFID)技术的定位方法,利用 SAW-RFID 的强穿透能力,将 SAW 标签间隔埋入地下管线上方构造位置网格,与全球定位系统(GPS)/北斗定位技术融合形成快速定位方案;同时,为了提高地下标签的探测距离,研究设计了单相单向换能器(SPUTD),以及适合埋在地下介质中的标签天线;最后完成了实际地下土壤环境的场景测试,验证了 SAW-RFID 地下电力管线定位方法的性能及优势。

**关键词:**声表面波射频识别(SAW-RFID);地下电力管线定位;全球定位系统(GPS)

**中图分类号:** TN384

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.11977/j.issn.1004-2474.2018.03.022

## Rapid Positioning of Power Pipeline Based on SAW-RFID Technology

CAI Lijun

(Information and Communications Branch Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350000, China)

**Abstract:** At present, the underground electric power pipelines in the city are complex and complicated, and there is an urgent need for a method to quickly identify and locate the power lines. A positioning method based on SAW radio frequency identification (SAW-RFID) is presented in this paper. With the strong penetration of SAW-RFID, SAW tags are buried in the underground pipeline at intervals to form a position grid, and integrated with GPS\Beidou positioning technology to form a fast positioning scheme. Meanwhile, in order to increase the detection range of underground tags, the single-phase unidirectional transducer (SPUDT) and tag antenna suitable for being buried in the underground medium have been designed. Finally, the scene test of actual underground soil environment is completed. The performance and advantages of SAW-RFID for applications to the underground power pipeline positioning have been verified.

**Key words:** SAW-RFID; underground power pipeline positioning; global position system(GPS)

### 0 引言

随着城市的发展,地下电力管线愈发成为保障城市正常运转的“生命线”。地下电力管线由于前期建设缺少合理规划与集中管理,其短板日益突出,如管龄超长,资料缺失等。因此,国家电网公司近几年开展“电缆普查”工程,摸清地下电力管线的“家底”,在管理系统中存储了众多的管线坐标数据。但是,由于目前电力管线位置的采集采用全球定位系统(GPS)/北斗定位技术<sup>[1]</sup>,该技术存在 2~3 m 的定位误差,导致实际再次寻找地下电力管线等关键电力设备时,存在定位速度慢、开挖效率低等问题,因此迫切需要一种地下电力管线的快速定位技术。

现有的地下电力管线定位主要通过常规的超高频 RFID 技术,将 RFID 标签埋设在井盖边的路面,

作为特殊的定位标识。该方案存在标签易被市政施工破坏、丢失,且读取距离近等问题。由于地下电力管线埋深大(约 0.5~1.5 m),地面主要是混凝土、沥青、泥土等复杂介质,而电磁波穿过这些损耗介质后,损耗高达 20~50 dB/m,剩余能量难以驱动常规的超高频 RFID 芯片工作,因此,阅读器难以识别到埋在地下的标签。虽然 125 kHz 的低频电磁波具备很强的介质穿透能力,但 125 kHz RFID 系统易受电力线缆的工频干扰而无法正常工作,且存在天线尺寸大,天线传输效率易受到周围金属管线影响而降低,低损耗介质中读取距离近等问题。

声表面波射频识别(SAW-RFID)技术具有环境适应能力强等特点,主要体现在:

1) 穿透能力强<sup>[2]</sup>。土壤下标签读取深度可达

1.2 m<sup>[3]</sup>,可将 SAW 标签深埋于地下管线附近,免受市政施工的破坏。

2) 电子标识与传感功能一体化,如可以同时测量标签所在位置的温度<sup>[4]</sup>。

3) 抗干扰能力强<sup>[5]</sup>,不受工频干扰,易设计抗金属化天线,标签可紧贴放置于金属电力管线上方。

因此,本文提出了一种基于 SAW-RFID 技术的网格定位技术,与 GPS/北斗定位技术融合以实现地下电力管线的快速定位。其主要内容包括:

1) 介绍 SAW-RFID 技术的工作原理,从理论上分析了 SAW-RFID 提高介质穿透能力的方法。

2) 设计了降低 SAW 标签损耗的单相单向换能器(SPUDT),以及适合介质环境应用的标签天线,并进行了土壤模拟环境的天线测试。

3) 开展了实际土壤环境下的测试实验,验证 SAW-RFID 系统地下探测深度及定位范围。对实验数据进行总结,实现了常规土壤 1 m 以上的探测深度,验证了 SAW-RFID 技术的强穿透能力。

4) 介绍了系统的总体技术方案,包括软件系统、后台数据库和硬件系统的实现方式及通讯方法。

### 1 SAW-RFID 原理及穿透能力分析

SAW-RFID 主要包括 SAW 标签、阅读器及天线 3 部分,如图 1 所示。阅读器发射一段脉冲查询信号经标签天线到达换能器,激发 SAW 后沿着基片传播,传播过程中遇到编码反射栅反射 SAW,回波信号经换能器转化为电磁波后,被阅读器接收并实现解码。

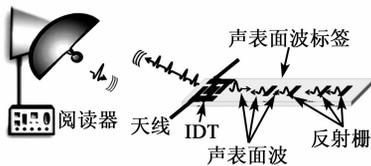


图 1 SAW-RFID 工作原理

在空气介质中,SAW-RFID 阅读器发射的功率为  $P_t$ ,标签收到的功率为  $P_r$ ,类似于移动信道的信号传输<sup>[6]</sup>,有

$$P_r = P_t G_{\text{reader}} G_{\text{tag}} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $G_{\text{reader}}$ 为阅读器天线的增益; $G_{\text{tag}}$ 为标签天线的增益; $\lambda$ 为查询信号的波长; $R$ 为阅读器天线与标签天线的距离。

若标签放置在非空气介质中,电磁波在介质中传播产生介质损耗( $L_{\text{ma}}$ ),标签收到查询信号并反射出回波信号,这一过程存在标签的整体插入损耗( $L_{\text{tag}}$ ),则阅读器收到标签反射回的能量( $P_{R\text{-reader}}$ )为

$$P_{R\text{-reader}} = P_t G_{\text{reader}} G_{\text{tag}} \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 L_{\text{tag}} L_{\text{ma}} G_{\text{tag}} G_{\text{reader}} \cdot \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 = P_t G_{\text{reader}}^2 G_{\text{tag}}^2 \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^4 L_{\text{tag}} L_{\text{ma}} \quad (2)$$

以实际的 SAW-RFID 系统<sup>[7]</sup>为例,其技术参数及损耗分析如表 1 所示,表中介质为常规泥土。在不考虑介质层对电磁波反射和散射的情况下,1 m 深的土壤中埋设的标签,其损耗主要为介质损耗 40 dB 和空衰 63.4 dB,计算可得阅读器收到的标签反射能量为 -107.4 dBm。

表 1 SAW-RFID 系统技术参数

名称	参数	名称	参数
发射功率/dBm	30	介质损耗/(dB · m <sup>-1</sup> )	20
阅读器天线增益/dBi	3	标签插入损耗/dB	-38
标签天线增益/dBi	-1	埋深/m	1
中心频率/MHz	922.5	接收增益/dB	86

由式(2)及上述实例可看出,电磁波的介质损耗和空衰是物理损耗,无法避免。为了提高 SAW-RFID 在地下管线应用中的探测距离,最直接的方法是提高阅读器发射功率,但这会带来如功放散热、电源供电等阅读器硬件电路设计难的问题,因此可从提高阅读器和标签天线增益,降低标签损耗等方面提高探测距离。

### 2 SAW 标签设计

#### 2.1 SAW 标签 SPUDT 换能器设计

为了降低标签的内部损耗,本文设计了 SPUDT 换能器,可以降低标签芯片 6 dB 的传播损耗。通过控制电极宽度实现单向传播的电极宽度控制单相单向换能器结构。图 2 为 SPUDT 换能器拓扑结构。

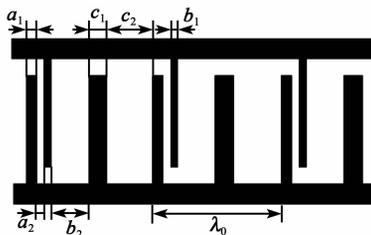


图 2 SPUDT 换能器结构

设计结构参数为经过优化后的 SPUDT 结构,SPUDT 的中心频率为 922 MHz。基片采用 128°YX-LiNbO<sub>3</sub>,该 SPUDT 结构中每个 SPUDT 单元设置了 3 根指条,具体参数为: $a_1 = 0.092 4\lambda_0$ ,  $a_2 = 0.046 85\lambda_0$ ,  $b_1 = 0.037 5\lambda_0$ ,  $b_2 = 0.358 05\lambda_0$ ,  $c_1 = 0.116 8\lambda_0$ ,  $c_2 = 0.348 4\lambda_0$  (其中  $\lambda_0$  为 SPUDT 中

心频率下的 SAW 波长),此时,反射中心与发射中心差为  $\lambda_0/8$ 。利用 FEM-BEM 方法仿真结果如图 3 所示,其前向传输和后向传输表现为明显的单向性,达到 14 dB。

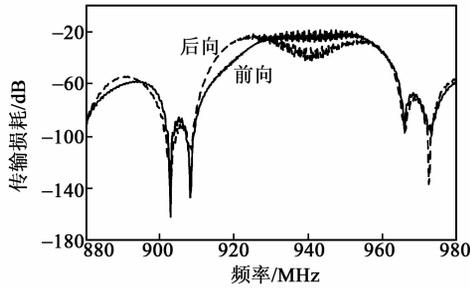


图3 SPUDT 换能器前向和后向传输特性

### 2.2 SAW 标签天线设计

SAW 标签的天线设计为微带 PCB 天线,天线外壳为陶瓷材料,周围被介质环境填充,标签天线外壳的尺寸为 87 mm×30 mm×1.6mm,如图 4 所示。

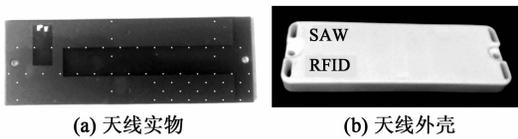
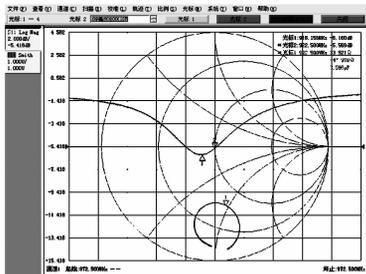


图4 SAW 标签天线及外壳

由于 SAW 标签在地下电力管线的实际应用是放置于土壤介质中,所以,测试该天线的性能参数时天线周围需要覆盖土壤,模拟真实环境。图 5(a)的测试方法是将标签天线通过馈线连接矢量网络分析仪,标签埋入泥土中,测试结果如图 5(b)所示,中心频率约为 918.4 MHz,3 dB 带宽覆盖设计频率为



(a) 天线测试环境



(b) 天线测试结果

图5 天线测试

922.5 MHz。

### 3 探地深度实验测试

为验证 SAW-RFID 在地下电缆定位应用中土壤的穿透能力,开展室外实地测试,测试环境如图 6 所示。测试环境为常规土壤夹杂碎石,标签下埋深度为 1.1 m,地表面覆土,进行不同深度的标签探测实验。



(a) 土壤环境 (b) SAW-RFID 阅读器硬件

图6 实验测试环境

测试所用的阅读器是中心频率为 922 MHz 的线性调频脉冲压缩阅读器,发射功率为 27 dBm,接收增益为 80 dB,阅读器天线增益为 9 dBi。

SAW 标签放置于坑底,标签天线朝向坑口,覆土后,用阅读器在地面探测(见图 6),能够探测到标签的 ID 号。对各个标签重复实验,测试标签稳定读取距离,结果如表 2 所示。以读取 1 500 次中错码的概率作为误码率指标,结果表明深埋于地下至少 1 m 的各 SAW 标签均能被阅读器稳定读取。

表2 标签探测深度实验结果

序号	标签编码	最大探测深度/m	误码率/%
1	262 811	1.10	0.33
2	533 610	1.15	0.46
3	353 812	1.20	1.33
4	954 712	1.10	0
5	733 710	1.10	0.13
6	181 711	1.20	1.13
7	682 609	1.15	0.13
8	322 512	1.10	0.73
9	411 612	1.20	1.20
10	871 410	1.15	0.60

为了确定定位范围,测试阅读器对埋地标签的读取角度。以标签 262 811 为样本开展测试,将标签埋入土中 40 cm、60 cm、80 cm、100 cm,检测最大的读取半径,并计算读取视角,测试结果如表 3 所示。由于标签天线和阅读器天线均为定向天线,因

此,测试结果中视角较窄,有利于标签快速定位。

表 3 标签读取视角测试结果

深度/cm	最大读取半径/cm	视角/(°)
100	15	81
80	28	70
60	36	59
40	39	45

#### 4 定位系统架构

##### 4.1 系统总体方案

SAW-RFID 实现地下电力管线定位的系统总体方案如图 7 所示,主要包括硬件、通讯、后台软件 3 部分。其中硬件为 SAW 阅读器和 SAW 标签,SAW 标签按照一定距离均匀分布在管线的上方,形成定位网格。先调用数据库的地理位置坐标,以该坐标为圆心,定位误差为半径,确定标签可能的区域范围。在该区域内用 SAW 阅读器进行地面探测,当探测到 SAW 标签时,即为所要定位管线的准确位置。

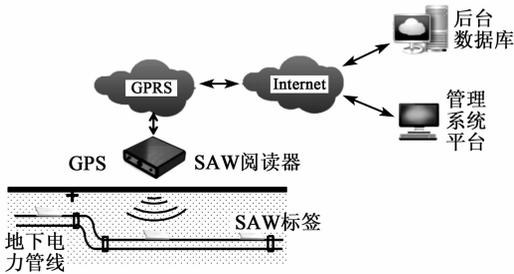


图 7 系统总体方案

SAW 阅读器与后台经过通用分组无线服务(GPRS)等移动通信方式与互联网连接,调用后台的管线数据如坐标、管线走向、类型、安装年月等信息,并在 SAW 阅读器功能界面显示。

系统后台软件主要包括数据库、信息分享服务、管理系统平台,信息分享服务用于实时快速响应数据调用接口,管理系统平台为管理人员提供基于地理信息系统(GIS)的管线综合管理平台。

##### 4.2 阅读器软件架构

阅读器的软件流程如图 8 所示。开机后开始运行程序,连接底层读取模块,系统发送通信自检命令,若通信自检通过,则连接阅读器成功,点击“Start”按钮,则阅读器开始持续查询标签。每一次标签查询,都会返回读取结果,若编码校验通过,则到码库查询是否存在此编码,若核验通过,则输出在显示界面。

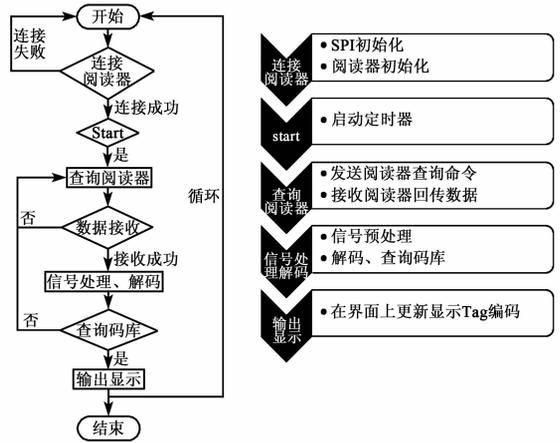


图 8 阅读器的软件流程图

#### 5 结束语

本文提出了基于 SAW-RFID 技术的地下电缆快速定位技术,通过 SAW 标签的定位网格与 GPS/北斗定位融合,实现快速定位的技术。本文从理论上分析了 SAW-RFID 技术应用于地下电缆定位中的信号强穿透能力,并设计了 SPUDT 换能器和适合地下应用环境的微带标签天线。通过实验得出该系统可实现地下 1 m 深的电力管线定位,对于更深的管线,实际使用时标签可距离管线一定高度放置。另外,该系统的探测深度还有很大的优化空间,根据第 2 节的理论分析,还可以设计高增益的阅读器天线,以及提高阅读器的发射功率和处理增益,进一步提高系统的地下标签的定位深度。

#### 参考文献:

- [1] 吕磊,单宝麟,闫松.基于三维 GIS 的地下电力管线管理系统的设计与实现[J].测绘与空间地理信息,2016,39(3):95-98.
- [2] HARTMANN C S,CLAIBORNE L T. Fundamental limitations on reading range of passive IC-based RFID and SAW-based RFID[C]//New York: IEEE International Conference on Rfid,2007:41-48.
- [3] ZHAO X,SHI R,YANG Y,et al. SAW RFID with enhanced penetration depth[C]//Washington, D. C: IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS),2017.
- [4] 张晨睿,孙伟锋,高怀,等.用于声表面波射频识别的耐高温 PCB 贴片天线[C]//敦煌:2013 中国西部声学学术交流论文集(上),2013.
- [5] REINDL L,OSTERTAG T,RUPPEL C C W. Hybrid SAW-device for a European train control system[C]//Cannes,France: IEEE International Ultrasonics Symposium(IUS),1994: 175-179.
- [6] 石明卫,莎柯雪,刘原华.无线通信原理与应用[M].北京:人民邮电出版社,2014.
- [7] 郑泽华.面向地下热力管道探测的 SAW-RFID 系统研究[D].上海:上海交通大学,2016.