

# 基于地下 VLF 人工信号源的定位技术研究

黄河<sup>1</sup>, 乌效鸣<sup>1</sup>, 张峰<sup>1</sup>, 许洁<sup>2</sup>, 杨晖<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 基于甚低频电磁波(VLF)穿透地层能力, 研究地层对信号造成的影响, 评估频率、功率和信号穿透能力的关系; 从信号源、天线、信号处理滤波等方面讨论其实现的原理及关键技术; 筛选适合地下-地表单向通信的合理方式和载波机制; 建立简化的磁偶子定位模型, 完成信号源的定向和定深。总结甚低频定位技术的关键方案, 为煤层气水平井、水平对接孔、定向钻进导向孔、矿井救援等钻探领域中孔内信号传输提供一种新的通讯技术。

**关键词:** 甚低频电磁波; 穿透地层; 磁偶子模型; 定位技术; 孔内信号传输

**中图分类号:** P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)04-0049-04

**Research on Localization Technology Based on Underground Artificial VLF Signal Source/HUANG He<sup>1</sup>, WU Xiaoming<sup>1</sup>, ZHANG Feng<sup>1</sup>, XU Jie<sup>2</sup>, YANG Hui<sup>1</sup>** (1. School of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. The Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

**Abstract:** Based on the ability of VLF electromagnetic waves passing through the stratum, the study is made on the impact of the earth to signals to evaluate the relationship between the frequency, power and signal passing ability, discuss the realization principles of signal localization in signal source, antenna, signal processing and filtering as well as the key technologies, select a reasonable way and carrier mechanism for underground-surface communication, build a simplified magnetic dipole sub-localization model to complete the orientation and depth determination. This paper summarizes the key programs of very low frequency electromagnetic waves localization technology to provide a new communication technology for in-hole signal transmission in drilling field, such as CBM horizontal well, horizontal butted hole, pilot hole of directional drilling and mine rescue.

**Key words:** VLF electromagnetic waves; passing through stratum; magnetic dipole sub-model; localization technology; in-hole signal transmission

## 0 引言

甚低频(VLF)电磁法是利用分布在世界各地的长波电台发射的信号在大地上建立的电磁场(频率为3~30 kHz)作为场源,在地表、空中或地下测量其电磁场的空间分布,从而获得电性局部差异或地下构造信息的一种电磁法。由于甚低频不需自己建立场源,同时该法具有成本低、效率高、仪器轻便、测量参数多等优点,因此具有广阔的应用领域,在探矿领域可用于磁法勘探。在工程地领域可用于寻找岩溶,地下暗河、断层、含水破碎带、岩层界线等,在市政建设领域,可用于探测地下管线。根据甚低频电磁法特点,可将其推广应用到煤层气水平井、水平对接孔、定向钻进导向孔、矿井救援等钻探领域的孔内信号传输,用于定向和定位。

电磁波按照频率分类,从低频率到高频率,包括无线电波、微波、红外线、可见光、紫外光、X射线和伽马射线等<sup>[1-4]</sup>。甚低频(VLF),频率范围为3~

30 kHz,波长范围为100~10000 m,由于较长的波长,在空间传输过程中位移变形较小,海水、建筑、树木、山体对它都不构成干扰,因此非常适合潜艇、地下空间通信,并且大量应用于地质灾害救援等方面。

## 1 甚低频透地能力

电磁波在空间中传播,各种媒质(空气、水、固态介质等)必然要对所传输的电信号产生影响,而造成信号的衰减、失真、畸化,这种影响主要是由于介质对电磁波能量的干扰造成的,尤其是能量损耗。障碍物使电磁波产生绕射和折射,使得其接收场强小于在自由空间传播时的场强。

电磁波在大地中传播,主要受不同地层电磁性质的影响,尤其是相对介电系数和电导率。大地是很好的半导电介质,其电导率必然会对电场敏感,影响电磁波的传输;大地的电导率越大,对电磁波的影响越大。干土的电导率在0.001 s/m左右,湿土相

收稿日期:2016-06-24; 修回日期:2017-01-11

作者简介:黄河,男,汉族,1992年生,硕士研究生在读,地质工程专业,主要从事钻探与钻井工程、非开挖工程方面的研究,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,cug\_hh@hotmail.com。

对较大。由于地层复杂,其衰减的准确规律无法总结,只能以理想构成进行分析。

图1是信号频率和传输距离的关系<sup>[2]</sup>。从图1可以知道,频率越高,波长越短,受地层能量吸收越多,产生的衰减越严重。因此频率越低,越适合在地层中穿透,尤其是甚低频、极低频波段的电磁波,有较大的研究价值。

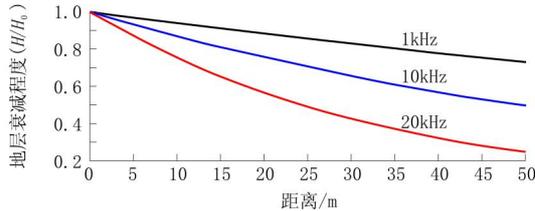


图1 地层衰减程度和距离的关系

图2是信号频率和衰减程度之间的关系。从图2可以看出,信号频率越高,地层衰减程度越大。

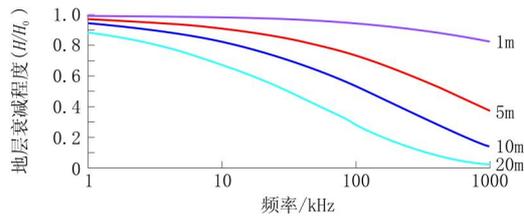


图2 地层衰减程度和频率的关系

## 2 人工信号源

### 2.1 基振

地下信号源以地下管线为渠道,考虑其穿透距离,深度在50 m之内,衰减程度在50%左右最优,以保证地表可以捕捉到信号源。选择10 kHz作为中心频率,采用高精度晶振电路分频获得。震荡源应稳定,带宽要窄,防止不同频率的电磁波因为色散效应产生失真,影响后期检波频率的确定。正弦振荡信号经过功率放大之后,提高振荡幅值和负载能力,再经过电容耦合,组成LC振荡器。

### 2.2 发射天线

天线实现了能量的转换,决定了信号源发射的效率,保证磁场线充分延伸到较远的距离。与高频信号不同,甚低频信号发射天线属于电小天线,天线系统Q值较高,系统是一个窄带系统<sup>[3]</sup>,适合调制的模式为ASK,FSK,考虑到地下空间限制,不方便采用伞型天线和T型天线。铁氧体磁性线圈作为发射天线已经在中频波段大量使用,结构简单,便于调整,适合地下甚低频信号源。低频铁氧磁棒,采用合适的绝缘子,漆包线缠绕,制作成通用天线,就能

够连接经过功率放大的信号源。

磁棒成分,长短,漆包线的直径、匝数和和在磁棒上的位置,均会影响发射强度和电能消耗量。通过计算可以获得线圈的电感值,匹配合适的电容后自激,能够高效率的发射信号。

### 2.3 功率放大

功率和发射距离是正相关的,最大程度的提高发射功率能够有效地提高仪器性能。功率放大可以采用达林顿管推挽,也可以采用功放芯片。功率放大的目标为信号不失真,提高发射电流。但当电路停振时,过高的电流可能会造成破坏,同时影响线圈和电容的充放电时间。信号发射功率<30 W即可,较大的功率必然会造成散热问题,影响仪器和地层稳定。

### 2.4 编码调制

在甚低频发射系统中使用MSK调制方式的系统匹配效率较高,在发射机允许一定的反射能量情况下,MSK调制方式的天线系统辐射效率较高<sup>[4]</sup>。但是在地下信号源测量过程中,MSK调制方式的色散效应会较为严重,而且对频率带宽要求较高,不利于地表信号的处理。OOK调制模式简单,但是数据量有限,抗干扰能力有限。采用ASK编码方式,较为适合地下信号源的调制,但键控周期不能太长,否则就会产生拖尾粘连现象。

## 3 地面检波

### 3.1 接收天线

接收天线必须与该频率匹配,采用低频磁棒,缠绕直径在0.2 mm左右的漆包线缠绕,线圈匝数不宜过多,以免产生较大自激。采用次级线圈缠绕在主线圈一侧,匝数在20圈左右,用来感应主线圈产生的磁场,有效地减少主线圈自激的影响。线圈在缠绕过程中应尽量做成可滑动式,以便于调整匹配频率。接收天线实物见图3。

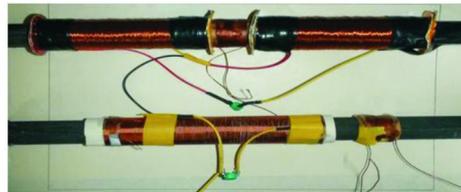


图3 接收天线实物

### 3.2 信号放大和滤波

天线捕捉到的信号往往是很微弱的,必须经过放大才能进行有效的处理。信号采用差分输入,放大倍数在1000倍左右,适合大部分管道埋藏深度。

信号放大电路应采用稳定的基准和电源。放大后的信号采用带通滤波器进行滤波,中心频率为10 kHz,带宽控制在1 kHz,滤掉干扰信号在线圈中产生的抖动。带宽、相位和频率的关系如图4所示。

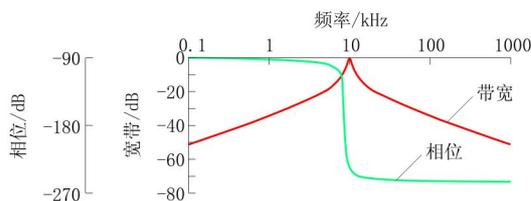


图4 带宽、相位和频率的关系

### 3.3 超外差混频

这种接收方式的性能优于直接放大式接收,广泛应用于中频波段通信,对于甚低频通信,我们可以借鉴。选择性能稳定的乘法器,混入合适的等幅值正弦信号,这样信号的中心频率便转化成了差分频率。差分后的信号频谱结构和原信号完全相同,但波形更清澈,高频增益显著。除了混频器之前的天线回路和高频放大器的调谐回路需要与本地振荡器的谐振回路统一调谐之外,中频放大器的负载回路或滤波器是固定的,在接收不同频率的输入信号时不需再调整,这样就让仪器更可靠简便<sup>[5-9]</sup>。差分低频信号再重新进行放大等处理,进行解调,误码率降低,效率提高。

### 3.4 解调

经过层层筛选的信号,已经满足了后期运算处理的要求。选择合适的解调电路或芯片,就能将载波信号所携带的数据提取出来,从而直接得到地下信号源所携带的测量数据,如温度、管道变形或损伤。如地下管线探伤,无需时刻保持通信,这样就极大地简化了调制解调的连续性,仅仅需要在关键位置进行透地通信即可。在钻井领域通信效率比MWD等技术要高,这种方法可以有效地在浅层地表实现数据采集<sup>[6]</sup>。

### 3.5 信号强度

信号强度是我们定位的基础,就像水柱压力一样,作为深度的标定基准。接收机自激产生的振荡电流要通过检波电路整合成直流信号<sup>[10]</sup>,这样就能直接采集输入运算。对于放大信号的整流,须先剔除半边对称电压,获取连续的有效值。有效值可以是电压信号,也可能是电流信号,应反应信号峰峰值与距离的线性关系。

## 4 磁偶子模型定位

电磁场理论中唯一性定理<sup>[11-15]</sup>可以为我们进

行信号定位提供基础,该定理给出的前提是只要电磁场满足波动方程,又能确定其各个方向切向分量的边界条件,所解得的结果是唯一的。只要建立合适的定位模型,采集到确定的磁场分量,就能解算出磁场分布的规律,从而确定信号源。

为了简化模型,我们可以将信号源瞬间看作是正负两个电荷产生的磁场,虽然在载体中产生的并不是直流电,都是基于谐变磁偶极子作为发射源,但是我们定位所采用的信号强度是稳定的,这是我们定位的关键。在接收电路中必须对信号规整,整合成稳定的直流源来判别磁场强度。图5是等效的静态磁偶子模型。

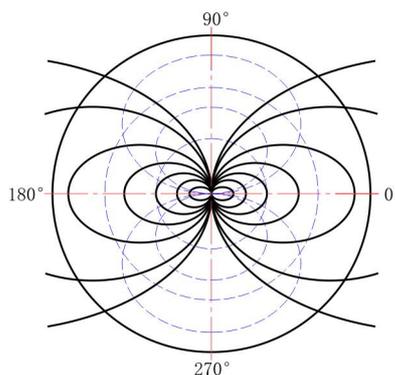


图5 静态磁偶极子等矢量线分布

采用定向和定深结合的方法进行定位,由于发射天线是通用天线,磁力线分布和磁棒水平,只要选择固定的参考方向,测量其分量就能得到该点的磁场强度。首先沿纵向利用线圈进行定向,获得沿竖直方向磁场分量,随着 $\delta$ 的增大,其 $Z$ 方向的分量减小,而且出现零点,零点介于两个峰值之间。实际中零点分布在一条直线上,该直线与磁力线垂直,磁棒中心轴向平面上。图6为竖直方向磁场分量分布。

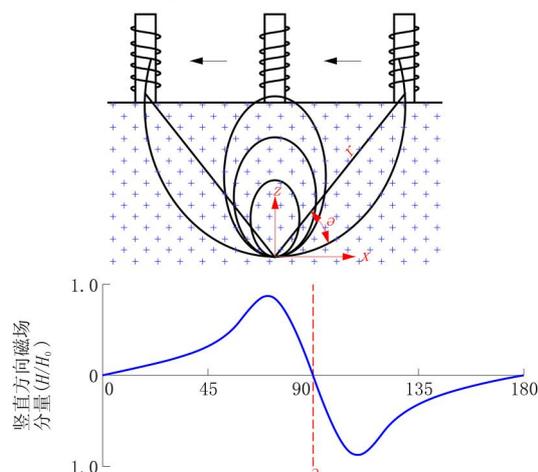


图6 竖直方向磁场分量及其分布

获得的纵向分量值  $B_z$  为:

$$B_z = B_0 \sin^4 \delta \cos \delta \quad (1)$$

式中:  $B_z$ ——纵向分量值,  $H/H_0$ ;  $B_0$ —— $xy$  平面内测点的磁场强度,  $H/H_0$ ;  $\delta$ ——磁感应线到原点连线与  $x$  轴正方向夹角, ( $^\circ$ )。

采用水平线圈可以检测  $X$  方向的磁场分量, 理论上正上方的磁力线与轴线平行, 而且是最内层, 故所测得的强度最大, 在  $B_z$  为零的前提下, 测的该处的水平最大场强, 就能和标定的数据进行对比, 获得该处竖直下方的信号源的深度。图 7 为水平方向磁场分量分布。

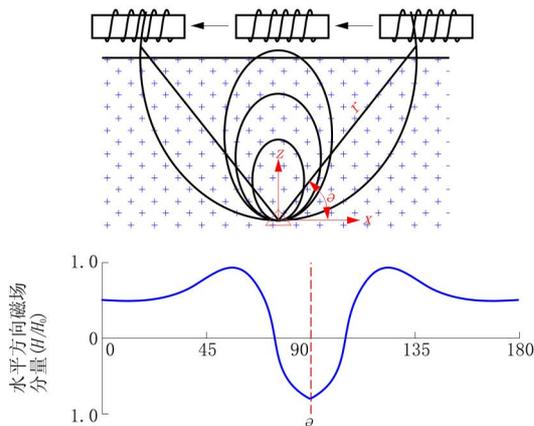


图 7 水平方向磁场分量及其分布

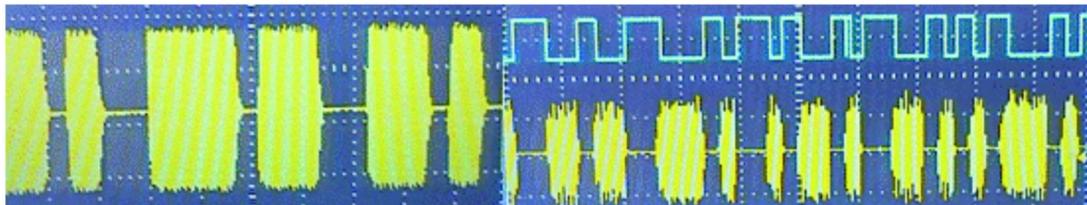


图 8 探头发射码和地表跟踪器解调出的对应码信号

水平井、水平对接孔、定向钻进导向孔、矿井救援等孔内信号传输方面开始应用, 还有很大的研究空间和价值。

### 参考文献:

- [1] 吴太权, 焦志伟. 《电动力学》课程中引入普通物理知识的探索[J]. 教育教学论坛, 2012, (1): 58-60.
- [2] 徐涛. 水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究[D]. 湖南长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [3] 张敬伦. 基于 MSK 无线通信的深井随钻数据传输技术研究[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2012.
- [4] 黄金辉. 不同调制方式下甚低频发射天线系统效率研究[J]. 舰船电子工程, 2011, (1): 80-82.
- [5] 谭琦耀. 高频小信号放大器的设计[J]. 煤炭技术, 2012, (7): 49-51.
- [6] 刘国卫. MWD 无线随钻测斜仪在钻井中的应用[J]. 西部探矿工程, 2011, (3): 49-50.

获得的水平方向分量值  $B_x$  为:

$$B_x = B_0 (2 \cos^2 \delta - \sin^2 \delta) \quad (2)$$

式中:  $B_x$ ——水平方向分量值,  $H/H_0$ ;  $B_0$ —— $XY$  平面内测点的磁场强度,  $H/H_0$ ;  $\delta$ ——磁感应线到原点连线与  $X$  轴正方向夹角, ( $^\circ$ )。

通过 2 个方向的分量, 我们就能以平面为基础获得一点点的信号强度, 但是现实中还需要考虑  $Y$  方向的分量, 以及电磁波在地表传播的距离, 以及穿透地层进入空气时所产生的折射。

在室内进行实验, 探头与接收天线距离 10 m, 对探头发射码和地表跟踪器进行解调, 得出的图像如图 8 所示。

### 5 结论

甚低频信号的地面处理较为简单, 但是其穿越土层的能力和其测深能力的关系还没有进行相关研究, 无法确定最终的技术参数。同时还要考虑水池效应等对甚低频信号的影响, 推导相应的校准方法。针对强电磁环境下的屏蔽问题, 通过提高功率可以缓解, 但是无法进行根本上的解决。在受钢板等屏蔽材料影响时, 最优的方法就是调整频率, 以实现最大程度的透地能力。甚低频定位技术已经在煤层气

- [7] 梁培艳. 微弱直流电压信号检测[D]. 四川成都: 电子科技大学, 2013.
- [8] 雷银照, 徐纪安. 时变电磁场唯一性定理的完整表述[J]. 电工技术学报, 2000, (1): 16-20.
- [9] 苟杨, 郑龙根, 许畅. 海水中 VLF 传播特性分析[J]. 微计算机信息, 2012, (2): 131-132, 85.
- [10] 陆洪, 潘威炎. 海浪对水下甚低频最小频移键控信号解调的影响[J]. 电波科学学报, 2011, (4): 731-734.
- [11] 金国庆, 董颖辉. 甚低频发射系统同步调谐研究[J]. 现代电子技术, 2011, 34(10): 82-84.
- [12] 缪飞飞, 朱俊杰, 周大方, 等. 用磁场极值信号定位磁源的方法与实验[J]. 微型电脑应用, 2014, (5): 21-24.
- [13] 凌青, 芮国胜, 张洋, 等. 甚低频信道小波调制方式研究[J]. 无线电通信技术, 2012, 38(4): 38-41.
- [14] 吴华宁, 柳超. 基于 Labview 的甚低频场强远程监测系统的设计[J]. 微计算机信息, 2012(2): 28-29, 44.
- [15] 齐海铭, 叶金蕊, 张晓华, 等. 管内移动机器人定位技术与定位系统优化研究[J]. 高技术通讯, 2010, 20(11): 1167-1172.