

# 基于软件无线电的甚低频法探矿接收机

牛有田<sup>a,b</sup>, 毕永兴<sup>a</sup>

(河南师范大学 a. 物理与电子工程学院; b. 河南省电磁波特征信息探测重点学科开放重点实验室, 河南 新乡 453007)

**摘要:**对隐伏矿体的定位预测,已成为当今社会找矿实践与勘察分析的当务之急.基于软件无线电的甚低频法探矿接收机的研制设计,为我国探矿事业的顺利发展提供了良好的催化剂.此接收机可以接收3个台、每个台3个不同的频率共9路甚低频(VLF)信号.这些信号导入地下后是一些强大的电磁波信号,经过抗混叠滤波器,A/D转换器,最后有信号分析仪分析计算出感应电磁场的垂直分量和水平分量并判断出零交点的准确位置,最后做出相应的仿真,验证了该方法的可行性.

**关键词:**隐伏矿体;甚低频;感应电磁场;零交点;软件无线电

**中图分类号:**TN98

**文献标志码:**A

近年来,随着中国探矿的热潮升温,河南中原地区也加快了探矿的步伐.科研院及高校从不同程度为祖国的探矿事业做出贡献.当然由于找矿、勘察与开采研发实践的逐步加深,已知矿、露头矿与浅层矿的量藏呈现下坡趋势,因此加大了探矿找矿的难度.针对性的优化勘察技术,提升矿山开采的预测理论,提高地质—地球物理模型的精度,是实现国家对矿产的持续开发与不断应用的关键环节.为了解决矿山资源短缺问题,提高矿山经济效益,延长矿山服务年限,这就迫使我们对于地下隐伏矿体做出更加准确的定位探测.固然,探矿的新理论、新方法、新技术的综合应用与联合攻关迫在眉睫,这也是当代地学研究的一重要发展方向<sup>[1]</sup>.

基于软件无线电的甚低频法是一种甚低频电磁法与软件无线电技术进行组合应用的一种新的物探方法.这种方法是利用俄罗斯甚低频 Alpha 导航系统发射的大功率高精度的甚低频(VLF)信号作为场源,共有3个发射站,分别是位居在新西伯利亚的主台、位居在格拉斯那达尔的西副台和位居在哈巴罗夫斯克的东副台,3个发射台的发射信号都是甚低频波段的信号,频率为11.9 kHz,12.6 kHz和14.9 kHz,共9条路径的信号可供接收.如图1,A西副发射台 B主发射台 C东副发射台 D中原地区.可以根据地质的情况及探矿需求合理的对发射台做出选择,当然也可以同时利用3个不同发射台的频率,最后由天线分波段的合理接受.合理选择电台且把电台发射的电磁波作为场源,在地表、空中或地下探测场的参数变化,从而得到电性局部差异或地下构造的信息<sup>[2]</sup>.但是由于矿藏的深度不同,当前的探矿接收机不能完全确定金矿的地下位置.于是本研究对二者进行组合应用,研究了基于软件无线电的甚低频法接收机,此接收机的天线可以看作是垂直电偶极子,多方位更加有效的定位地下多深度的矿藏,提高了探矿的准确性和可靠性.

## 1 隐伏矿体概况

矿床中所有或部分矿体出露现代地表,称出露矿床.与此相应,在现代地表没有矿体直接露头的矿床称隐伏矿床.在现代地表没有直接露头的矿体称盲矿体.隐伏矿床中,全部矿体都是盲矿体,出露矿床中,可有部分盲矿体.隐伏矿体一般包括半隐伏矿体和全隐伏矿体.其中半隐伏矿体,有几米自积累物体掩盖,矿产成因类型多为内生矿产,如夕卡岩型、热液型矿床;全隐伏矿体的隐伏深度甚深,有较厚的运积物掩盖,地表无

收稿日期:2014-12-30;修回日期:2015-03-04.

基金项目:国家自然科学基金(49070217;61302187)

第1作者简介:牛有田(1966—),男,河南新野人,河南师范大学教授,主要从事电磁波传播理论及其工程应用等方面的研究,E-mail:niuyt22@163.com.

通信作者:毕永兴,男,E-mail:502680852@qq.com.

任何矿化标志的地球化学异常,矿产成因类型多为各类原生矿产,发现的难度很大.当前,隐伏矿体的的定义方案和分类方法在国内外尚未统一.池三川将隐伏矿体定义为:“埋藏于基岩中受到或未受到现代切割作用,受到或未受到沉积物覆盖的所有矿床(体)”<sup>[3]</sup>.当今世界的隐伏矿体的构造成分错综复杂,内含有大量的金属硫化物,还有黄铜矿、黄铁矿、蓝铜矿、辉铜矿等在地表的形成与运动中形成孔雀石、铜蓝、褐铁矿等.然而隐伏矿体的预测中直接的找矿标志并不明显,可利用的矿化信息少,预测的结果又具有尺度小,精度高的要求,因此其具有探索性强,风险性大的特点<sup>[4]</sup>.据国外统计发现,一个隐伏矿体的投资,比发现一个出露、浅表的贵矿床高出十倍多.矿体形态各异,颜色炯异.这些隐伏矿体的存在,在地下就像一个大磁石依附在地表,对围岩而言,这些矿藏可视为良导体,当电磁波遇到这种矿体的时候将会产生较大的电流,因此可以采取物探的方式来挖掘低阻矿体从而进一步实现探求隐伏矿床的目的.正是这些隐伏矿体带与围岩之间存在着明显的物性差异,为本次接收机的甚低频测量提供了良好的地电条件,从而为隐伏矿体的空间定位预测提供了依据<sup>[5]</sup>.

## 2 基于软件无线电甚低频法接收机的设计

### 2.1 系统方案

图 2 中数字 4 所指为所要预测金属矿的横向界面带.图 3 为软件无线电甚低频法接收机的原理框图.基于软件无线电甚低频接收机凭借软件无线电的设计思想,用硬件简单可靠的设备作为探矿信息接收装置的平台,通过配置不同的软件模块来接收不同类型的甚低频波段的探矿信号.随着数字信号处理技术的发展以及高速高精度 A/D 器件、高速高性能 DSP 器件的出现,使得运用软件加载来实现甚低频探矿成为可能.天线用于接收 VLF 信号的电场强度在垂直方向上的分量.由天线接收的射频信号包含很多频段的甚低频信号.经放大器对信号放大再接收,然后进入 A/D 转换器.由数字信号分析仪计算校对出该接收机所接收到的电磁波信号水平分量  $H_y$  及相应的垂直分量  $H_z$  和椭圆极化倾角  $D$ .由于真正接收 VLF 信号会产生干扰,必须对射频信号进行抗混叠滤波.放大器采用增益可调的放大电路,主要是为了满足在不同地点接收时信号强弱不同的需要.

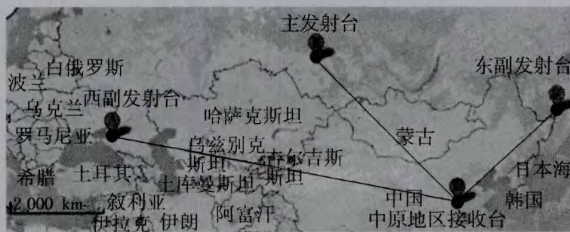


图1 俄罗斯Alpha导航系统3个发射台的甚低频电磁波信号的发射与接收

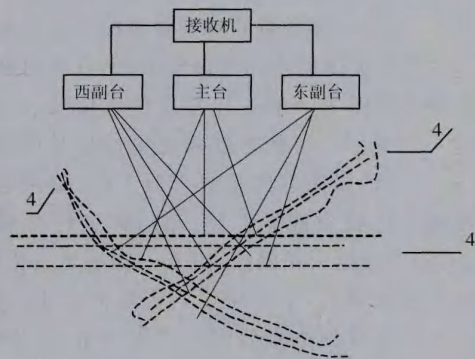


图2 隐伏矿体的接收机的3个电台信号简图

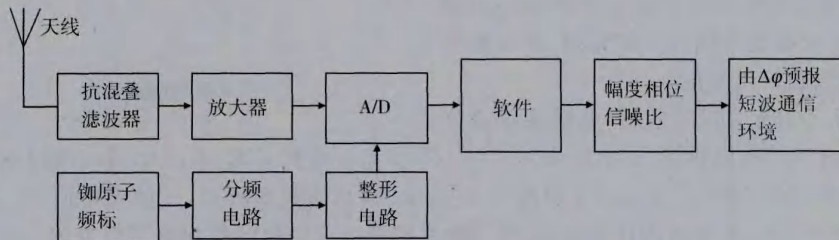


图3 基于软件无线电的甚低频法接收机的原理框图

该系统的技术指标要求如下. 动态范围: 50 dB; 灵敏度:  $1 \mu\text{V}$ ; 幅度失真度:  $<15\%$ ; 相位测量精度:  $\pm 1 \text{ cec}$ .

## 2.2 硬件组成部分

硬件主要由鞭状天线、铷原子频率标准、抗混叠滤波器、放大器、AD采集卡和通用计算机等部分组成.

### 2.2.1 天线

垂直于地面放置的鞭状天线用于接收 VLF 信号的电场强度在垂直方向上的分量. 由天线输出的射频信号包含很多频段的各种电磁波信号, 如果直接对信号进行采样将会把一些无用的信号引入到所接收的甚低频波段上来, 这样就会对后续的 VLF 信号处理造成干扰, 因此, 必须对射频信号进行抗混叠滤波.

### 2.2.2 铷原子频率标准

铷原子频标内含有分频电路与整形电路. 由铷原子频标输出高稳定度的正弦波信号, 经分频与整形电路后变为稳定的脉冲信号, 为 A/D 采集卡提供 50 kHz 的采样脉冲信号. 其频率稳定度高达  $\pm 1 \times 10^{-11}/\text{d}$ .

### 2.2.3 抗混叠滤波器

抗混叠滤波器采用了高通和低通联合组成带通的设计方法. 更加有效的加大多频带信号的接收.

### 2.2.4 放大器

放大电路采用增益可调的由 AD7520 组成的放大电路, 放大倍数可以从 8 到 128 可调. 这是因为信号强度不同的信号接收会收到接收地点的影响. 信号强时用较小的放大量, 信号弱时则使用较大的放大量, 这样可以充分利用 A/D 卡的量程<sup>[5-6]</sup>.

软件的加载是对 VLF 信号的采集、3 个发射台 3 个频率共 9 路 VLF 信号的水平分量, 垂直分量, 极化椭圆倾角等数据的提取、分析、显示和存储. 通过倾角  $D$  处理分析校对零交点的有效位置可以进行金属探矿等部分功能.

## 3 探测方法与预测

基于软件无线电的甚低频法既可以使用甚低频信号的磁场分量, 也可使用其电场分量. 使用磁场分量的甚低频探测方法是基于电磁感应的应用, 对地下局部电性异常做出分析研究, 从而勘探出地下良导体或者矿体的存在; 使用电场分量的甚低频探测方法是基于研究大地电性, 进行电阻率填图<sup>[7]</sup>. 此接收机研制方法的目的是对隐伏矿体的空间定位预测, 所以利用磁场分量的测量就可以解决问题.

利用俄罗斯的 Alpha 导航系统发放的大功率高精度的 VLF 信号, 这些甚低频电磁信号被地表接收后, 可以认为其传播方向是竖直向下的. 如果遇到地下埋藏的导体物质或磁性感应体时, 会产生感应电流, 此时的电流是一种涡流. 由于一次场是变化的, 所以涡流也是变化的, 于是将使其极化而产生二次场, 二次场又可以分为垂直分量与水平分量. 很显然, 磁场垂直分量的出现是地下局部电性差异的标致. 在多半情况下, 由于振幅、传播方向和相位会有所不同致使一次场与二次场在传导过程中的叠加而成的总场与电磁波的传播方向必定会成为一定夹角, 即为椭圆极化倾角. 图 4 为椭圆极化倾角.

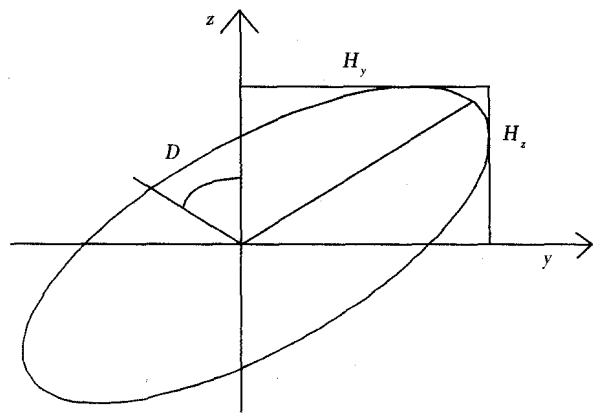


图 4 椭圆极化倾角

假设电磁波水平分量用  $H_y$  表示, 电磁波垂直分量  $H_z$  表示,  $H_0$  为正常值. 极化倾角用  $D$  表示. 用百分比表示相对异常,  $H_y/H_0$  表示磁场水平分量曲线,  $H_z/H_y$  表示磁场垂直分量曲线, 极化倾角曲线用  $D$  表示. 有几何关系可知,  $D$  的正切值与二次场的垂直分量成正比, 即  $\tan D = kH_z$ . 其中  $k$  为比例系数. 所以测量椭圆极化倾角的变化既可以反映二次场垂直分量的变化. 从而可以确定地下导电物质的电性差异. 用水平分量的极大值, 垂直分量的极小值, 零交点来预测矿藏

的位置<sup>[6]</sup>. 基于软件无线电的甚低频法接收机可以观测这种感应信号并将其记录下来,有计算机软件进行分析计算出磁场水平分量极大值与垂直分量的极小值和零交点的正确位置. 最后对比可以知道矿藏的有效位置. 理论情况下,极化椭圆倾角曲线的零交点呈现在含水断裂带或其他低阻地质体的上方<sup>[8~10]</sup>,若将各剖面正峰值连接便可确定出矿化带的延长倾向. 布线原则是测线方向尽量垂直矿化带方向. 由于地质噪声和区域背景的干扰,在隐伏矿藏的上方会出现假零交点. 因此,为了消减这些干扰带来的影响采取 Fraser 数字滤波. 这样,原曲线的零点变成峰值,峰值对应地下低阻异常体,既是含矿带的合理位置,其 Fraser 滤波数学表达式:  $F_{n+1,n+2} = (D_{n+3} + D_{n+2}) - (D_{n+1} + D_n)$  式中:  $n$  为测量点序列,  $n=1, 2, 3, \dots$ ;  $D$  为极化椭圆倾角在测量点上读数值;  $F$  为倾角滤波读数. 此公式表明,在数字滤波操作时,按照测点次序估量两个读数值之差,便为数字滤波结果. 通过数字滤波结果的分析可以对真假零交点做出判断,结合地下低阻异常体的电性差异,判断出电流密度大的预测区域,推测出隐伏矿体的存在. 至于该矿带的走向如何,厚度多少,还需要其他资料考证.

## 4 结束语

本文研究了基于软件无线电的甚低频法探矿接收机的设计原理,利用矿化带与围岩在电性方面的差异性及含矿物质的电磁性,使甚低频电磁法与软件无线电思想有效进行组合应用,加上准确的地质综合分析,为隐伏矿藏良导体的寻找提供了合理方案. 在数据处理上,采用了高端的计算机软件对感应电磁场的水平及垂直分量做了相应的处理,并且完成了椭圆极化倾角的合理计算并且采用了数字滤波,最后综合分析推断出隐伏矿体的存在. 从理论意义上讲,该基于软件无线电的甚低频法接收机的原理方法是可行的. 利用所测的电磁波物理量高精度的反演地下地质体的电性情况可以提高水品的探测矿产,是一种快速准确有效的物探方法,可以提高我国探矿事业的发展速度,为人类今后的探矿事业提供了依据.

## 参 考 文 献

- [1] 张寿庭,徐旗章,郑明华. 甚低频电磁法在矿体空间定位预测中的应用[J]. 地质科技情报,1999,18(4):85-88.
- [2] 武汉地质学院金属物探教研室. 电法勘探教程[M]. 北京:地质出版社,1980.
- [3] 池三川. 隐伏矿床(体)的寻找[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1988:6-9.
- [4] 杨言辰,李绪俊,马志红. 生产矿山隐伏矿体定位预测[J]. 大地构造与成矿学,2003,27(1):83-90.
- [5] 徐旗章,张寿庭,杨耕东,等. 四川汉源团宝山铅锌矿资源调查与评价[M]. 成都:成都科技大学出版社,1993.
- [6] 杨小牛,楼才义,徐建良. 软件无线电技术与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2010.
- [7] JEFFREY H R. 软件无线电——无线电工程的现代方法[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.
- [8] 史保连. 甚低频电磁法[M]. 北京:地质出版社,1986.
- [9] ZHAO Xiezhong, WANG Xiaojing. The Study of correlation between VLF Phase Anomalies and Solar X-Ray Fluxes During Solar Flares [J]. CHINESE JOURNAL OF RADIO SCIENCE,1990,5(2):35-43.
- [10] 熊 皓. 电磁波传播与空间环境[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

## VLF Method Prospecting Receiver Based on Software Radio

NIU Youtian<sup>a,b</sup>, BI Yongxing<sup>a</sup>

(a. College of Physics and Electrical Engineering; b. Laboratory for Electromagnetic Wave Detection of Henan Province, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** It is a top priority for the current society to find ore prospecting practice and investigation to predict the location of concealed ore body. The design of the low frequency method based on the software radio is a good catalyst for the development of China's exploration. This receiver can receive signals from three units. Each unit is contained of three different frequency of a total of 9 channels of very low frequency (VLF) signals. These signals are imported into the ground after a number of powerful electromagnetic wave signal, after the anti aliasing filter, A/D converter, etc. Finally, the vertical component and the horizontal component of the induced electromagnetic field are calculated by the signal analyzer. And to determine the exact location of zero crossing point. Finally, the simulation is made to verify the feasibility of the method.

**Keywords:** concealed orebody; VLF; induction electromagnetic field; zero crossing; software radio