

doi: 10.11720/wtyht.2017.6.35

张小博,白大为,高保屯,等.一种低频探地雷达天线屏蔽装置实验研究[J].物探与化探,2017,41(6):1255-1261.http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.35

Zhang X B, Bai D W, Gao B T, et al. Experimental research on a shielding device of low frequency ground penetrating radar antenna[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1255-1261. http://doi.org/10.11720/wtyht.2017.6.35

## 一种低频探地雷达天线屏蔽装置实验研究

张小博<sup>1,2,3</sup>, 白大为<sup>1,2,3</sup>, 高保屯<sup>1,2,3</sup>, 何梅兴<sup>1,2,3</sup>, 仇根根<sup>1,2,3</sup>

(1. 国土资源部地球物理电磁法探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 2. 国家现代地质勘查技术研究中心, 河北 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:** 低频探地雷达系统多配置无屏蔽天线, 抗干扰能力差。针对中心频率 15 MHz 的低频探地雷达天线, 以铁丝网作为屏蔽材料, 设计制作了 3 种尺寸(长×宽×高分别为: 12 m×12 m×5 m、11 m×11 m×5 m、9.6 m×9.6 m×5 m)的屏蔽装置, 对接收天线和发射天线分别进行了屏蔽干扰实验研究。结果表明: 网孔为 1 cm×1 cm, 丝径  $t$  为 0.15 cm 铁丝网是制作屏蔽装置的有效材料; 对接收天线单独进行电磁屏蔽时, 三种尺寸的屏蔽装置均显示出较好的屏蔽效果, 其中最佳尺寸为 11 m×11 m×5 m; 对发射天线单独进行电磁屏蔽时, 只有 11 m×11 m×5 m 尺寸的屏蔽装置最有效, 另外两种尺寸的装置屏蔽效果相对较差; 相对而言, 给接收天线单独增加屏蔽装置要比单独给发射天线增加屏蔽装置好。实验结果为下一步研发实用化的低频探地雷达屏蔽装置打下了良好基础。

**关键词:** 低频探地雷达; 天线; 屏蔽装置

**中图分类号:** P631      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-8918(2017)06-1255-07

### 0 引言

探地雷达(Ground Penetrating Radar, GPR)是用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律的一种探测方法,它结合了电磁波技术和地震技术的长处,频率范围一般分布在 1 MHz~10 GHz 之间,探地雷达由于其高分辨率、高效率、无损探测、结果直观、成本低等优点被广泛应用于工程、环境、水文地质调查、考古、矿产勘查、极地探测等领域<sup>[1-5]</sup>。低频探地雷达的发展满足了人们探测深层地下目标的需求,但同时带来了新的问题。现在商用的低频探地雷达天线多为收发分离,使用无屏蔽或半屏蔽天线,在电磁环境复杂的地区容易受直达波和地面回波强噪声信号的干扰,造成信噪比变低,影响勘探效果。通过增加发射功率并采用先进的数据处理技术可一定程度提高信噪比,但有些情况下数据质量改善并不特别

明显,探测效果依然不理想。给收发天线增加屏蔽装置,从信号源对干扰信号进行屏蔽,可大大提高接收信号的信噪比,但是由于低频探地雷达所需屏蔽装置几何尺寸较大且比较笨重,进行实物研究的人较少。目前,国外已有公司进行相关研究并成功应用于生产实践,国内少有学者做这方面的研究。

近些年,我国在陆域天然气水合物勘探技术研究方面开展了多种地球物理方法实验。其中在青海木里地区进行了大量低频探地雷达(天线中心频率 15 MHz 或 12.5 MHz)实验工作,在探测冻土和水合物储层方面取得一定效果。由于研究区地处煤矿内,地形起伏较大,周边分布有房屋、钻井、机械车辆等,在进行雷达探测时会产生强烈的回波、直达波等地面杂波干扰,造成深部反射信号信噪比低,影响有效探测深度。开发有效的屏蔽装置,提高数据信噪比,有效提高探测深度,对低频探地雷达能否成为探测陆域水合物的有效方法十分重要。

**收稿日期:** 2017-09-08

**基金项目:** 中央公益性科研院所基本科研业务费专项基金项目(AS2014J09, AS2015P02); 国家高技术研究发展计划“863 计划”课题(2012AA061403); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160224)

**作者简介:** 张小博(1987-),男,硕士,工程师,主要从事电磁法方法技术研究与应用工作。

### 1 装置设计

#### 1.1 天线选择及屏蔽材料优选

本次实验选择英国生产的 Groundvue 6 低频探地雷达, 天线频段范围 5 ~ 30 MHz, 中心频率 15 MHz, 属于收发分体无屏蔽天线(图 1), 是目前世界上探测深度最大的低频探地雷达之一<sup>[6]</sup>。



图 1 Groundvue 6 低频探地雷达发射机和接收机

屏蔽材料的选择直接影响屏蔽效果。低频电磁波的屏蔽可分为两类: 电磁波反射衰减和电磁波吸收衰减。电磁波反射衰减类的材料研究程度较高, 一般选择导电性和导磁性好的材料即可; 低频电磁波吸收衰减类材料的研究多集中于军事用途, 成本高, 民用方面研究较少<sup>[7-9]</sup>。本次实验研究只考虑反射衰减类材料。

屏蔽材料通常分为板材和网材<sup>[10-11]</sup>, 利用金属网对工业电子系统进行电磁屏蔽, 是防止电子系统间相互干扰的有效手段之一, 尤其是在既要达到屏蔽效果, 又要通风、采光和维修便利的场合, 金属网一直为电磁兼容工程师们所青睐<sup>[12-15]</sup>, 另外从重量和成本方面考虑, 网材也优于板材。笔者前期以金属网为屏蔽材料针对低频探地雷达天线电磁波段(5 ~ 30 MHz)进行了远区电磁屏蔽研究, 认为影响因子主要为金属网材质(趋肤深度  $\delta$ )、被屏蔽电磁波频率  $f$ 、孔宽  $W$ 、丝网直径  $t$ 。通过对紫铜网、铝丝网、铁丝网、不锈钢丝网的电磁屏蔽效能的理论测算, 优选出屏蔽效果可满足一般民用设备所需<sup>[16-18]</sup>级别的金属网材参数: 铁丝网, 网孔为 1 cm × 1 cm, 丝径  $t$  为 0.15 cm<sup>[19]</sup>。基于以上研究结果, 本次实验选择铁丝网作为电磁屏蔽材料。

#### 1.2 屏蔽装置设计

屏蔽装置尺寸设计参考高频探地雷达屏蔽装置(背腔)的设计思想<sup>[20-22]</sup>, 根据 Groundvue 6 低频探地雷达天线中心频率  $f_c = 15$  MHz, 当屏蔽装置高度  $h$

$= \lambda_c / 4 = 5$  m 时, 天线的辐射总场最大; 屏蔽装置 4 个侧壁不会对天线形成镜像作用, 他们的存在会在一定程度上影响天线的驻波性能和接收信号的波形, 但对天线的辐射性能影响很小, 因此对于屏蔽装置的长、宽尺寸无特定要求, 考虑天线远场区屏蔽<sup>[1, 23-24]</sup>, 长、宽尺寸应大于 3.2 m, 具体尺寸需要根据场地实验结果进一步确定。最终, 低频探地雷达屏蔽装置结构设计如图 2 所示。

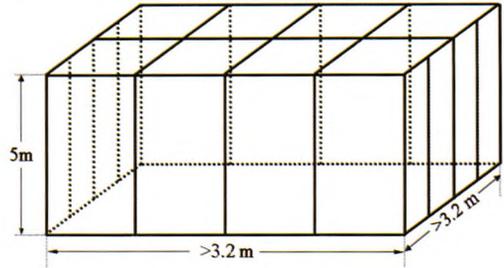


图 2 低频探地雷达屏蔽装置结构设计

### 2 屏蔽效应场地实验

#### 2.1 实验场地

由于经费有限, 只制作出一个屏蔽装置, 针对收发天线单独进行屏蔽效应研究。实验在一篮球场进行(图 3), 周边 50 m 范围有楼房和树林, 数据采集方式为定点静止测量。



图 3 电磁屏蔽实验场地

为了更好地进行对比, 分析屏蔽的抗干扰能力, 在进行测量的同时加入干扰源。干扰源为一大铁板, 长 2.6 m, 宽 1.6 m, 厚 0.5 mm, 如图 4。在实验场地设计 8 个固定干扰点, 放置点如图 5 所示, 蓝色矩形短轴方向代表铁板面的朝向, 不同大小的虚线矩形框代表不同尺寸的屏蔽装置, 屏蔽装置高度已确定, 进行场地实验主要是为了优选屏蔽装置长、宽尺寸。本次实验设计制作了 3 个尺寸的屏蔽装置, 长、宽、高分别为: 12 m × 12 m × 5 m、11 m × 11 m × 5 m 和 9.6 m × 9.6 m × 5 m。



图 4 人工干扰源(大铁板)

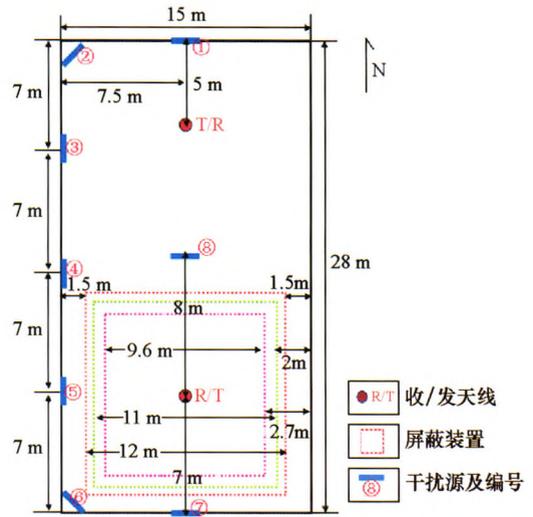


图 5 场地实验布局

### 2.2 实验过程

#### 2.2.1 天线无屏蔽实验

1) 发射天线在南,接收天线在北,无铁板干扰源情况下,进行数据采集。

2) 存在 1~8 号位铁板干扰源情况下,分别进行数据采集。

3) 调换收发天线的位置,使得接收天线在南,发射天线在北,重复步骤 1) 和 2)。

#### 2.2.2 天线加屏蔽装置实验

1) 如图 5 所示,在虚线框位置搭建 12 m×12 m×5 m 屏蔽装置,将发射天线置于屏蔽装置中心处,使得发射天线有屏蔽而接收天线无屏蔽,无铁板干扰源情况下,进行数据采集。

2) 存在 1~8 号位铁板干扰源情况下,分别进行数据采集。

3) 调换收发天线的位置,使得接收天线有屏蔽而发射天线无屏蔽,重复步骤 1)、2) 采集数据。

4) 搭建 11 m×11 m×5 m 屏蔽装置,重复步骤 1)~3) 进行数据采集。

5) 搭建 9.6 m×9.6 m×5 m 屏蔽装置,重复步骤 1)~3) 进行数据采集。

### 2.3 实验数据处理

对实验的数据进行室内处理分析,流程见图 6。

静校正 (Static Correction/muting): 主要是为了移除开始时间,祛除和地面没耦合好的影响,需将实验采集的时间记录减去 200 ns(厂家的经验数据)。

频谱分析 (Spectral analysis): 对于探地雷达而言,采集的信号全是有限的离散数字序列,进行实际信号的频谱分析时,需要对信号进行二维傅里叶变换,将数据从时间域转变为频率域。

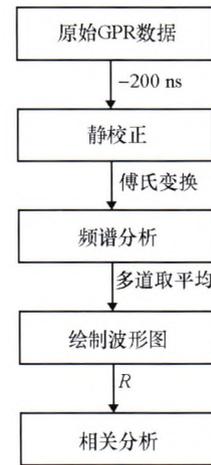


图 6 数据处理流程

绘制波形图: 由于 Groundvue 6 低频探地雷达只能进行线测,采集的数据是多道的时间记录,为了降低误差,对多道数据取平均使之成为单道数据,并绘制出相应波形图。

波形相关分析: 探地雷达信号是有源发射的确定性电磁波信号,不同尺寸屏蔽装置对接收电磁波波形的影响程度可通过波形相关程度进行分析。波形相关程度采用 Pearson 相关系数<sup>[25-27]</sup> 判别,它描述了 2 个定距变量间联系的紧密程度,一般用  $R$  进行表示:

$$R = \frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=0}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}; i = 0, 25, 50, \dots, 6175.$$

$R$  值的变化区间为  $[-1, 1]$ ,  $R = 0$ , 表示两列波波形完全不相关;  $R = 1$ , 表示两列波波波形变化完全一致;

$R = -1$  时, 两列波波形变化完全相反。

从前面屏蔽装置结构设计原理中可知, 屏蔽装置侧壁上存在的感应电流对天线的互耦作用可在一定程度上影响接收信号的波形, 屏蔽装置高度已定, 不同间距的侧壁对波形的改变不同, 因此可通过接收信号波形相关性反过来分析屏蔽装置侧壁间距的合理性, 当波形相关系数越接近 1 时, 说明屏蔽装置侧壁自身对天线信号的影响越小, 屏蔽装置侧壁间距(长宽尺寸)也越合理。

### 3 实验结果分析

#### 3.1 接收天线有屏蔽, 发射天线无屏蔽

根据图 5 所示, 只有实验场地南侧会存在电磁

屏蔽装置。当接收天线在南, 发射天线在北时, 即接收天线可以有屏蔽, 发射天线无屏蔽时, 分别计算无屏蔽装置和存在不同尺寸屏蔽装置情况下接收信号的波形相关系数。无屏蔽、无干扰源存在时, 接收信号波形相关系数为 1, 计算结果见表 1~ 表 4。

从表 1 可以看出, 在收发天线均无屏蔽装置情况下, 当存在近源干扰时, 接收信号波形相关系数降低, 不同位置的近源干扰造成接收信号波形相关系数数值不同, 其中 4 号位对应的波形相关系数数值最小, 为 0.6589, 8 号位对应的波形相关系数数值最大, 为 0.8829, 也即是在收发天线侧方靠近中间位置时, 干扰源对接收信号影响最大; 在收发天线中间位置时, 干扰源(大铁板)反而对地面杂波起到一定的屏蔽作用, 接收信号波形相关系数有较大提升。

表 1 无屏蔽情况下接收信号波形相关系数

干扰源位置编号 (无屏蔽)	无干扰 0	1	2	3	4	5	6	7	8
波形相关系数 $R$	1	0.7598	0.7414	0.7116	0.6589	0.7502	0.7567	0.7573	0.8829

表 2 12 m×12 m×5 m 屏蔽装置下接收信号波形相关系数(接收天线有屏蔽)

干扰源位置编号	有屏蔽 无干扰 0	有屏蔽 1	有屏蔽 2	有屏蔽 3	有屏蔽 4	有屏蔽 5	有屏蔽 6	有屏蔽 7	有屏蔽 8
波形相关系数 $R$	0.896	0.8918	0.8839	0.8875	0.8887	0.8857	0.8838	0.8955	0.8238

表 3 11 m×11 m×5 m 屏蔽装置下接收信号波形相关系数(接收天线有屏蔽)

干扰源位置编号	有屏蔽 无干扰 0	有屏蔽 1	有屏蔽 2	有屏蔽 3	有屏蔽 4	有屏蔽 5	有屏蔽 6	有屏蔽 7	有屏蔽 8
波形相关系数 $R$	0.9552	0.9345	0.9023	0.9064	0.9001	0.9005	0.9011	0.9025	0.8876

表 4 9.6 m×9.6 m×5 m 屏蔽装置下接收信号波形相关系数(接收天线有屏蔽)

干扰源位置编号	有屏蔽 无干扰 0	有屏蔽 1	有屏蔽 2	有屏蔽 3	有屏蔽 4	有屏蔽 5	有屏蔽 6	有屏蔽 7	有屏蔽 8
波形相关系数 $R$	0.9297	0.8909	0.8878	0.885	0.8762	0.8887	0.889	0.8872	0.8782

注: 0 代表无干扰源, 1~8 代表存在 1~8 号位人工干扰源, 下同。

从表 2~ 表 4 可以看出, 接收天线有屏蔽, 发射天线无屏蔽情况下, 接收信号波形相关系数整体都有了较大提高, 尤其是存在 4 号位干扰源情况下, 因为屏蔽装置的存在, 接收信号波形相关系数与其他位置的波形相关系数数值相差微小。但在 12 m×12 m×5 m 屏蔽装置下, 存在 8 号位干扰源时, 接收信号波形相关系数降低幅度较大, 目前尚不清楚原因。

为了更好地进行对比, 将 3 种尺寸的屏蔽装置下接收信号的波形相关系数和无屏蔽装置下接收信号的波形相关系数绘制成图(图 7)。图中可以清晰地看出: 无屏蔽装置情况下接收信号波形相关系数较低, 且变化幅度较大; 给接收天线增加屏蔽装置,

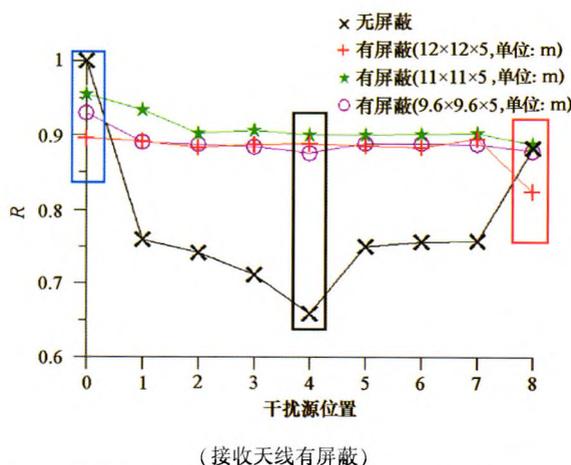


图 7 不同尺寸屏蔽装置下接收信号波形相关系数对比

接收信号波形相关系数整体明显提高,且变换平缓,其中11 m×11 m×5 m屏蔽装置下接收信号波形相关系数曲线表现最优。

图7中蓝色矩形框中显示的是无外部近源干扰时,有屏蔽装置和无屏蔽装置下的波形相关系数,从图中可以得知不同屏蔽装置自身也会给接收信号带来一定干扰,不过这种干扰相对很小,波形相关系数基本都在0.9以上,波形极度相似,其中11 m×11 m×5 m屏蔽装置下波形相关系数最大,波形相关系数大于0.95。黑色矩形框中显示的是存在4号位干扰源情况下的波形相关系数,无屏蔽装置时,4号位干扰源对应的接收信号波形相关系数最小;当给接收天线增加屏蔽装置时,4号位干扰源对接收信号的干扰被有效屏蔽,其中11 m×11 m×5 m屏蔽装置下,4号位干扰源对应的接收信号波形相关系数最大。红色矩形框中显示的是存在8号位干扰源情况下的波形相关系数,无屏蔽装置时,8号位干扰源(大铁板)可能对地面杂波有一定屏蔽作用,波形相关系数大幅度增大,有屏蔽装置时,8号位干扰源对接收信号带来的干扰相对较大,波形相关系数减小,其中11 m×11 m×5 m和9.6 m×9.6 m×5 m屏蔽装置下的波形相关系数是略微减小,12 m×12 m×5 m屏蔽装置下波形相关系数减小幅度相对较大,其中11 m×

11 m×5 m屏蔽装置下,8号位干扰源对应的接收信号波形相关系数最大。

总之,在收发天线均无屏蔽情况下,接收信号易受外部干扰源影响,不同位置的近源干扰造成接收信号波形相关系数降低,且变化幅度较大。其中,4号位对应的接收天线波形相关系数最小,推测认为收发天线与干扰源连线形成近等腰三角形,发射电磁波经干扰源表面直接反射向接收天线,对接收信号造成强干扰;8号位干扰源反而对直达波起到一定的屏蔽作用,接收信号波形相关系数有较大提升。给接收天线增加屏蔽装置,3种尺寸的屏蔽装置都能有效屏蔽外部近源干扰,尤其是针对4号位的干扰源,其对接收信号带来的干扰被有效屏蔽。对比3种尺寸的屏蔽装置,11 m×11 m×5 m屏蔽装置下,接收信号波形相关系数整体最大,且变化平缓,另外其自身对接收信号的干扰也最小,因此11 m×11 m×5 m的屏蔽装置尺寸相比最合理。

### 3.2 发射天线有屏蔽,接收天线无屏蔽

当雷达发射天线在南,接收天线在北时,即发射天线可以有屏蔽,接收天线无屏蔽情况下,分别计算无屏蔽装置和有不同尺寸屏蔽装置下接收信号的波形相关系数。无屏蔽、无人工干扰源时,接收信号波形相关系数为1,计算结果见表5~表8。

表5 无屏蔽情况下接收信号波形相关系数

干扰源位置编号 (无屏蔽)	无干扰0	1	2	3	4	5	6	7	8
波形相关系数 $R$	1	0.7931	0.7811	0.7648	0.7169	0.7656	0.7561	0.7566	0.8465

表6 12 m×12 m×5 m屏蔽装置下接收信号波形相关系数(发射天线有屏蔽)

干扰源位置编号	有屏蔽 无干扰0	有屏蔽1	有屏蔽2	有屏蔽3	有屏蔽4	有屏蔽5	有屏蔽6	有屏蔽7	有屏蔽8
波形相关系数 $R$	0.7538	0.758	0.772	0.7676	0.7656	0.7675	0.7706	0.7706	0.7759

表7 11 m×11 m×5 m屏蔽装置下接收信号波形相关系数(发射天线有屏蔽)

干扰源位置编号	有屏蔽 无干扰0	有屏蔽1	有屏蔽2	有屏蔽3	有屏蔽4	有屏蔽5	有屏蔽6	有屏蔽7	有屏蔽8
波形相关系数 $R$	0.9176	0.9216	0.923	0.9176	0.9168	0.9201	0.9162	0.9167	0.903

表8 9.6 m×9.6 m×5 m屏蔽装置下接收信号波形相关系数(发射天线有屏蔽)

干扰源位置编号	有屏蔽 无干扰0	有屏蔽1	有屏蔽2	有屏蔽3	有屏蔽4	有屏蔽5	有屏蔽6	有屏蔽7	有屏蔽8
波形相关系数 $R$	0.7928	0.8188	0.8234	0.8256	0.829	0.8279	0.8251	0.828	0.7735

从表5可以看出,收发天线均无屏蔽装置情况下,当存在近源干扰时,接收信号波形相关系数降低,不同位置的近源干扰造成接收信号波形相关系数数值不同,其中4号位对应的波形相关系数数值最小,

为0.7169,8号位对应的波形相关系数数值最大,为0.8465。表5的数值和表1的数值不同,可能是因为周边环境存在偶然的瞬时干扰以及收发天线位置的改变。

表6~表8显示的是发射天线有屏蔽,接收天线无屏蔽下,3种尺寸屏蔽装置对应的接收信号波形相关系数,可以看出,11m×11m×5m屏蔽装置下接收信号的波形相关系数整体最高,外部存在不同位置干扰源时接收信号波形相关系数均在0.9以上,而12m×12m×5m屏蔽装置下接收信号的波形相关系数整体在0.76左右,9.6m×9.6m×5m屏蔽装置下接收信号的波形相关系数整体在0.81左右。

将表5~表8的相关系数绘制成图8,从中可以清晰地看出:在发射天线无屏蔽装置情况下,接收信号波形相关系数较低,且变化幅度较大;给发射天线增加屏蔽装置,接收信号波形相关系数变化平缓。整体而言,11m×11m×5m屏蔽装置下接收信号波形相关系数最大,变化最平稳,9.6m×9.6m×5m屏蔽装置的次之,12m×12m×5m屏蔽装置的最差,其对应的接收信号波形相关系数和无屏蔽装置时的相近,说明12m×12m×5m屏蔽装置自身成为了主要干扰源。

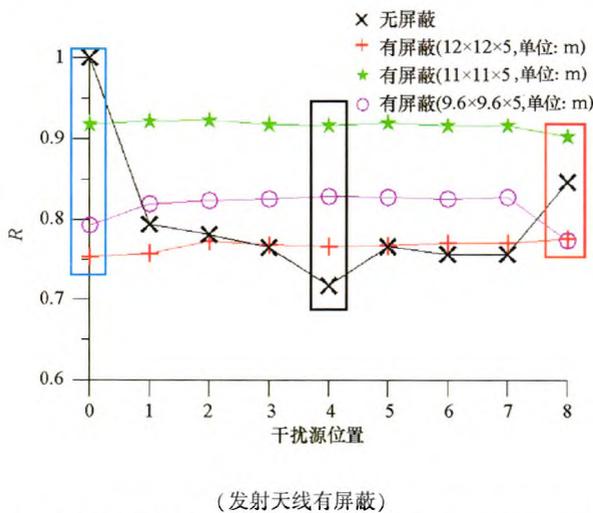


图8 不同尺寸屏蔽装置下接收信号波形相关系数对比

蓝色矩形框中显示的是无外部近源干扰时,有屏蔽装置和无屏蔽装置下的波形相关系数,可见不同屏蔽装置自身也会给接收信号带来一定干扰,11m×11m×5m屏蔽装置下波形相关系数最大,为0.9176,信号波形和无屏蔽时极度相似,12m×12m×5m和9.6m×9.6m×5m屏蔽装置下波形相关系数较小,低于0.8,说明这两种尺寸屏蔽装置自身对接收信号带来的干扰较大。黑色矩形框中显示的是存在4号位干扰源情况下的波形相关系数,无屏蔽装置时,4号位干扰源对应接收信号波形相关系数最小,有屏蔽装置时,4号位干扰源对接收信号的干扰被有效屏蔽。红色矩形框中显示的是存在8号位干扰源情况下的波形相关系数,无屏蔽装置时,8号位干

扰源可能对地面杂波有了一定屏蔽作用,波形相关系数大幅提高,有屏蔽装置时,8号位干扰源对接收信号带来一定影响,原因尚不清楚,3种尺寸的屏蔽装置,只有11m×11m射天线有屏蔽,接收天线无屏蔽下,3种尺寸屏蔽装置的屏蔽效果相差较大,合理尺寸的屏蔽装置对发射天线而言很重要,11m×11m×5m屏蔽装置下接收信号波形相关系数最大,均在0.9以上,且变化最平稳,其尺寸最合理;12m×12m×5m和9.6m×9.6m×5m装置屏蔽效果不够理想,其中12m×12m×5m屏蔽装置下接收信号的波形相关系数相对最小,和无屏蔽时的相近,屏蔽效果最差。

### 4 结论

1) 低频探地雷达天线无屏蔽装置时,外部近源干扰对接收信号有强干扰,接收信号波形相关系数值很低。采用网孔为1cm×1cm,丝径t为0.15cm铁丝网制作屏蔽装置能有效屏蔽外来干扰,是未来制作实用化屏蔽装置的可选材料。

2) 对于天线中心频率为15MHz的低频探地雷达,当接收天线单独进行电磁屏蔽时,实验的3种尺寸屏蔽装置均显示出较好的屏蔽效果,其中最佳尺寸为11m×11m×5m,其对应的波形相关系数最大,基本都在0.9以上。

3) 对发射天线单独进行电磁屏蔽时,只有11m×11m×5m尺寸的屏蔽装置最有效,另外两种尺寸的装置屏蔽效果相对较差。尤其是12m×12m×5m尺寸的屏蔽装置,其自身带来的干扰与无屏蔽情况下的干扰水平近似。相对而言,给接收天线单独增加屏蔽装置要比单独给发射天线增加屏蔽装置好。

### 参考文献:

- [1] 曾昭发,刘四新,冯暄,等. 探地雷达原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2010.
- [2] 杨可,赵新生,赵钦. 探地雷达方法的原理及工作方法技术简介[J]. 西部探矿工程,2011(6):151-152.
- [3] 孙洪星,李凤明. 探地雷达高频电磁波传播衰减机理与应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(2):413-417.
- [4] 刘传孝. 探地雷达空洞探测机理研究及应用实例[J]. 岩石力学与工程学报,2000,19(2):238-241.
- [5] 郭铁栓,刘兰波,张晓东. 地质雷达技术指标的标定研究[J]. 地球物理学进展,2005,20(2):454-459.
- [6] 张劲松,赵育刚,王梦茹. 低频地质雷达深层探测分析[J]. 地球物理学进展,2010,25(5):1848-1855.
- [7] 赵灵智,胡社军,何琴玉,等. 电磁屏蔽材料的屏蔽原理与研究现状[J]. 包装工程,2006,27(2):1-4.
- [8] 赵福辰. 电磁屏蔽材料的发展现状[J]. 材料开发与应用,

- 2001,16(5):29-33.
- [9] 刘顺华,刘军民,董星龙,等.电磁波屏蔽及吸波材料(第二版)[M].北京:化学工业出版社,2014.
- [10] 刘鹏程,邱扬.电磁兼容原理及技术[M].北京:高等教育出版社,1993.
- [11] 赵家升,杨显清,杨德强.电磁兼容原理与技术(第二版)[M].北京:电子工业出版社,2012.
- [12] 万鹏.金属网电磁屏蔽问题初探[J].安全与电磁兼容,1999(3):27-29.
- [13] Pomposo J A, Rodriguez J, Grande H. Polypyrrole-based conducting hot melt adhesives for EMI shielding applications [J]. Synthetic Metals, 1999, PII (104):107-111.
- [14] Das N C, Khastgir D, Chaki T K, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites [J]. composites, 2000, part A (31):1069-1081.
- [15] 段玉平,刘顺华,管洪涛,等.缝隙对金属网屏蔽效能的影响[J].安全与电磁兼容,2004(4):46-48.
- [16] 崔生,沈晓冬,袁林生,等.电磁屏蔽和吸波材料的研究进展[J].电子元件与材料,2005,24(1):57-61.
- [17] 徐福平,冯晨,王以伦,等.应用科技[J].电子测量技术,2005,32(11):28-33.
- [18] 赵灵智,胡社军,何琴玉,等.电磁屏蔽材料的屏蔽原理与研究现状[J].包装工程,2006,27(2):1-4.
- [19] 张小博,白大为,方慧,等.单层金属网对低频探地雷达波屏蔽效能研究[J].中国西部科技,2015,14(10):37-43.
- [20] 彭宇,王蕾,郭福强,等.一种超宽带小型化地质雷达天线的设计[J].物探与化探,2014,38(4):750-753.
- [21] 周游,潘锦,聂在平.时域背腔式领结天线的工程化设计[J].电子科技大学学报,2005,34(1):1-3.
- [22] John D K, Ronald J M.天线(上册)[M].章文勋,译.北京:电子工业出版社,2004.
- [23] 袁岩兴.低频磁屏蔽材料的制备与研究[D].北京:北京工业大学,2005.
- [24] 高攸纲.屏蔽与接地[M].北京:北京邮电大学出版社,2004.
- [25] 王凯,冯暄,刘财. Pearson 相关系数法快慢横波波场分离[J].世界地质,2012,31(2):371-376.
- [26] 张宇镭,党琰,贺平安.利用 Pearson 相关系数定量分析生物亲缘关系[J].计算机工程与应用,2005,33:79-82.
- [27] 杜秀英.基于 Pearson 相关分析的期刊引用关系研究[J].科技文献信息管理,2012(2):18-23.

## Experimental research on a shielding device of low frequency ground penetrating radar antenna

ZHANG Xiao-Bo<sup>1,2,3</sup>, BAI Da-Wei<sup>1,2,3</sup>, GAO Bao-Tun<sup>1,2,3</sup>, He Mei-Xing<sup>1,2,3</sup>, QIU Gen-Gen<sup>1,2,3</sup>

(1. Electromagnetic Detection Technology Key Laboratory of Ministry of Land and Resources, Langfang 065000, China; 2. National Modern Geological Exploration Technology Research Center, Langfang 065000, China; 3. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, CAGS, Langfang 065000, China)

**Abstract:** The low frequency ground penetrating radar system is equipped with unshielded antenna and poor anti-jamming capability. For the low frequency ground penetrating radar with a center frequency of 15MHz, the authors designed and manufactured three different sizes of shielding devices (length×width×height: 12 m×12 m×5 m, 11 m×11 m×5 m, 9.6 m×9.6 m×5 m) with the iron wire mesh as the shielding material. The experimental research on shielding interference of the receiving antenna and the transmitting antenna of low-frequency ground penetrating radar was carried out respectively. When electromagnetic shielding experiment was carried out separately for the receiving antenna, the shielding devices of the three sizes showed better shielding effect, and the optimal size was 11 m×11 m×5 m. When the electromagnetic shielding experiment was carried out separately for the transmitting antenna, only the shielding device of 11m×11m×5m was the most effective, and the shielding effect of the other two devices was relatively poor. In contrast, it was better to add a separate shielding device to the receiving antenna than to add a separate shielding device to the transmitting antenna. The experimental results have laid a solid foundation for future research and development of the practical shielding device of low frequency ground penetrating radar.

**Key words:** low frequency ground penetrating radar (GPR); antenna; shielding device

(本文编辑:沈效群)