

## 地下目标测技术-探地雷达原理及其应用

与探空雷达技术相似，探地雷达是向地下发射高频电磁脉冲波来探测目标体及地质现象。由于巨大的应用价值而受到经济和军事大国的重视，探地雷达技术得到了长期广泛深入的研究。将雷达原理用于探地，早在 1910 年由德国的 G. Leimback 和 Löwy 以专利的形式予以阐明。J. C. Cook 在 19960 年用脉冲雷达在矿井中作了试验。但是，由于地下介质对电磁波强烈衰减特性以及密度湿度等多样性，电磁波在地下介质中传播特性要比在空气中传播复杂得多。因此，滩地雷达的初期应用仅限于冰层、岩盐矿等相对均匀和对波衰减较小的探测对象中。如 1970 年 Harrison 在南极冰面上取得了穿透 800~2200m 的探测资料；1974 年 L. T. Prcello 用于研究月球的表面结构。随着设备信噪比的提高和数据处理技术的应用，提高了探地雷达对地下目标探测能力，从上个世纪 70 年代以后，探地雷达的实际应用范围迅速扩大，在地质构造、地基和道路下空洞裂缝、水坝隧道堤岸隐患、古墓管道等人工埋设物等探测定位查找方面发挥了巨大的作用。



图 1 美国 SIR-3000 探地雷达系统

随着微电子技术的迅速发展，现在的探地雷达早已由庞大、笨重的设备变成小巧轻便的工具。从上个世纪 70 年代初期，美国地球物理探测设备公司 (GSSI) 推出第一代 SIR 雷达系统以来，目前已经有加拿大的探头及软件公司 (SSI)、瑞典的地质公司 (SGAB) 的 RAMAC 雷达俄罗斯 NIIP 仪器研究所的 OKO-M2、意大利 IDS 等均有民用探地雷达系列，且在国内



图 2 瑞典道路型探地雷达系统

市场销售。我国中电二十二所 LTD 系列探地雷达也在国内经济建设的中国领域应用了十多年。那么探地雷达是如何工作的？又有哪些特点呢？



图 3 国产 LTD-2100 型探地雷达主机及 900M 天线

### 探地雷达信号形式

为了满足高距离分辨的要求，探地雷达的相对带宽接近 100%，属于超宽带雷达。为此，雷达采用调频连续波、步进扫频、冲激脉冲等信号体制，实现宽频谱的能量收发。采用无载频冲激脉冲信号的探地雷达独领风骚，上述国内外探地雷达产品均采用该信号体制。步进扫频体制的探地雷达由于设备较为复杂，成本较高，效果又无优势可言，因此在市场竞争中处于下风。但近年来，由于频率直接合成器件性能日臻完善，这种体制的雷达系统技术难度和成本大幅度降低，而且可以直接得到探测对象的频谱特征，有利于目标的识别，因此，在浅表层高分辨探测领域的研究和应用

逐渐多了起来。

### 冲激脉冲探地雷达

图 4 为常用的三种脉冲信号波形及其频谱，天线的频率要与脉冲的宽度对应，中心频率越高，采用的脉冲信号宽度越小。探地雷达采用的脉冲宽度一般在数百皮秒到几十纳秒之间。

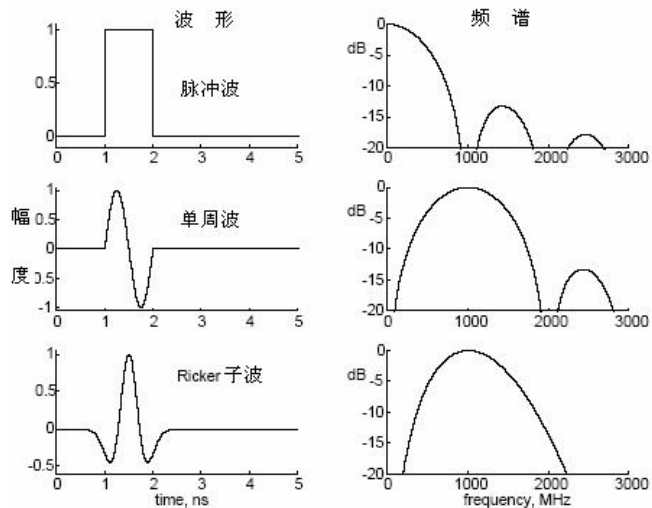


图 4 冲激脉冲雷达的三种发射信号形式

如图 5 是冲击脉冲探地雷达的功能框图，工作过程如下：发射机经宽带天线向地下周期性发射脉冲信号，接收天线将地下目标回波信号送给采样变换电路，经过时域取样变换，回波信号在保持原有形状的基础上，在时间轴上展宽了上千倍变为低频信号。对此信号进行适当处理后送入图像显示系统形成探测区域的地下剖面图。

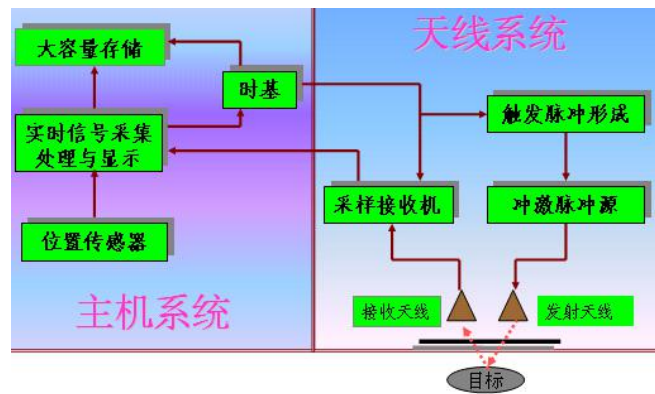


图 5 冲激脉冲探地雷达原理框图

### 步进扫频探地雷达

如图 6 所示，步进扫频雷达采用间隔  $\Delta f$  改变发射正弦信号的频率，完成  $f_0 \sim Nf_0$  频域范围内的扫

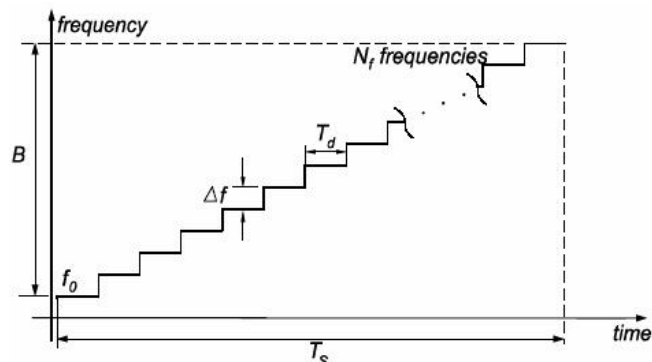


图 6 步进扫频雷达发射信号频率变化图

描。根据探测目标的特点，选择扫频范围。

### 探地雷达的组成

探地雷达主要由主机、天线和后处理软件三部分构成。主机实现雷达系统的控制、数据采集、处理和显示。主机可以是单通道，即连接一副天线；也可以是多通道，同时连接多副天线作业。天线是探地雷达最为核心的部件，一般收发天线、发射机和接收机封装在一个箱体中，统称为天线。通常一台主机可以分别挂接中心频率不同的天线，以满足不同探测深度和分辨率要求。天线有分为地面耦合天线和空气耦合天线，前者紧贴地面移动，后者离开地面 30~50cm 移动，利于车载探测。由于地下介质情况复杂，探测到的数据资料往往要用后处理软件进行运算，以增强异常区域，利于得出准确的结论。

### 目标雷达图像的特点

图 7 中上方三种典型目标：空洞类似于球状或柱状目标、偏平目标和不同介质界面的层状面，如河流的冰-水-河床界面。对于球状目标，当天线从其正上方移动过去时，由于其雷达回波的走时从大变小再变大的过程，因此在雷达图像上呈现出“双曲线”特征，其顶点对应的深度才是目标埋深。对于层状的面界面，雷达回波随着界面的起伏而起伏。对于偏平目标，则在其边沿与柱状目标回波相近，在正上方与层状目标相近。图 8 是一个得到验证的工程探测实例雷达图像，有 5 处管线回波，斜坡是回填和基岩的界面。

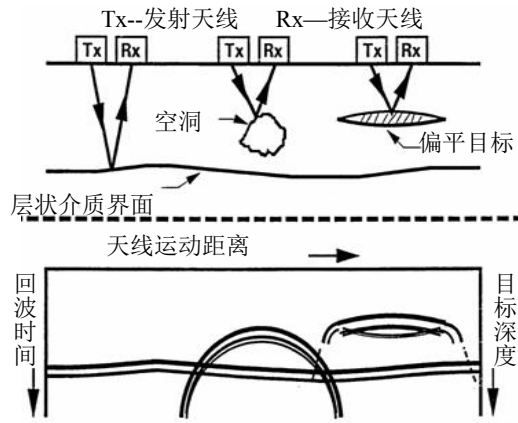


图 7 典型目标的雷达回波图象

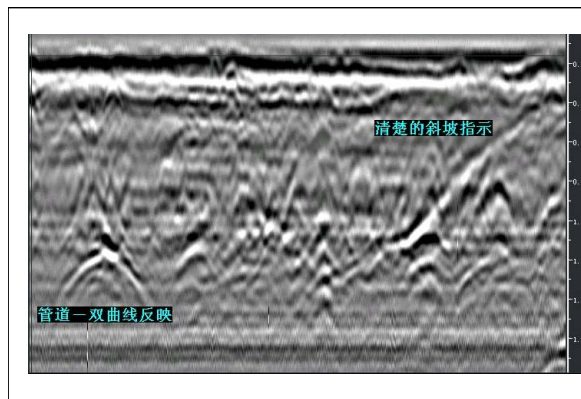


图 8 实际探测工程实例

### 探地雷达技术的用途

探地雷达在军事尤其是民用的众多领域得到了广泛的应用。

### 民用领域

市政管线测绘、无损检测包括公路、铁路路基、水坝、隧道等质量检测、隐患探测。另外，探地雷达正在由通用型向专用型发展，如钢筋、楼板厚度检测仪、地震搜救仪等。

## 军事领域

除与民用目的有交叉外，在机载、车载、手持探雷以及区域警戒等方面得到了应用。