

GR 地质雷达处理分析系统应用

地质雷达超前预报研究

杨峰 彭苏萍 中国矿业大学（北京校区）

隧道超前预报的主要内容：

- 研究地质雷达干扰信号形成的机制。
- 研究干扰信号的处理。
- 研究溶洞裂隙形成地质雷达图象的解译。

一 地质雷达干扰信号形成的机制

自 80 年代以来，地质雷达在我国已经广泛应用于公路、铁路和煤矿等部门。地质雷达发射宽带窄脉冲电磁波信号和接收目标体反射回来信号，从而达到勘探目的。从地质雷达采集的信号来看，存在普遍的横向水平信号的干扰。这些水平干扰信号对不同深度信号影响能力不同，越深的信号影响能力越大，这主要是由于雷达信号是高频电磁波，高频电磁波在地层传播过程中存在指数形式的衰减，因而，在相对变化较小的水平干扰信号的作用下，浅部信号信噪比明显高于深部信号的信噪比。

掌子面前方地质预报属于深部信号的勘探，地质雷达对其深部信号反射极其微弱，这样的信号极易受到干扰波的影响，如果不进行很好的处理和分析，很容易做出错误的解译。

地质雷达水平噪声信号的形成主要有内部因素和外部因素两种。其中内部因素是雷达采集系统本身引起的，是雷达使用者不可克服的；而外部因素是由于外部环境引起的，是由电磁波传播特性引起的。在一定条件下是可以克服和避免的。

内部因素主要有：

1. 发射天线和接收天线直达波的干扰。尽管高频天线的屏蔽，但是仍然有一定的电磁波从发射天线直接到接收天线上。
2. 发射脉冲信号与天线的阻抗匹配。发射脉冲信号通过 50 欧姆电缆发送到天线上的，蝶形天线的输入阻抗大小一般都在 100 欧姆—300 欧姆之间，这样必须通过合适比例的匹配器进行匹配，否则会产生能量较大的驻波，即减少了信号的发射能量，又产生了干扰信号。
3. 天线发射信号与天线屏蔽罩之间的振荡干扰，也是产成天线水平噪声的原因之一。尽管可以根据天线主频大小来设计天线屏蔽罩，以减少干扰信号的能量，但是由于天线发射是宽频带信号，这种振荡是存在的。
4. 天线尾部馈点反射回来的信号。馈点反射信号采用特殊材料可以进行一定程度的吸收，但是达到完全吸收还是不可能的。
5. 发射脉冲信号的次波峰。雷达脉冲发射最理想的脉冲信号是与天线匹配的单峰主瓣信号，但是，旁瓣信号常常伴随在主瓣信号而出现，从而产生干扰信号。

外部因素主要有：

- 1、电缆线，金属管线等固定干扰源。
- 2、在探测过程中，汽车等机械装置的发动机的干扰。
- 3、掌子面左右侧壁的干扰。
- 4、掌子面上金属支架的干扰。

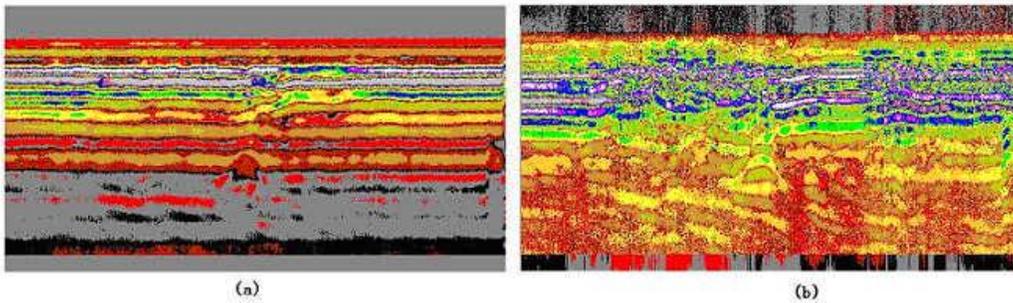
二 研究干扰信号的处理

在多年研究地质雷达软硬件过程中，开发了 GR 雷达处理分析系统，该系统采用多种方法对干扰信号进行压制，获得很好的效果。

水平干扰信号的处理

(1) 背景去噪

主要利用水平干扰信号具有相对稳定性特点,将选定道的所有信号进行叠加求均值,作为背景干扰信号。所有有效道和背景干扰道进行相减操作,从而达到压制干扰信号的目的。背景去噪是一种常用的处理方法,该模块具有对不同时间深度的水平信号进行不同的处理。本模块尤其对数据量大的剖面运算,速度快,操作简单。但是在进行背景去噪之前,一定要将剖面上没有的数据(如:天线停滞采集的数据,隧道的蔽塞洞等)删除掉,避免这些信号对综合背景信号的干扰。



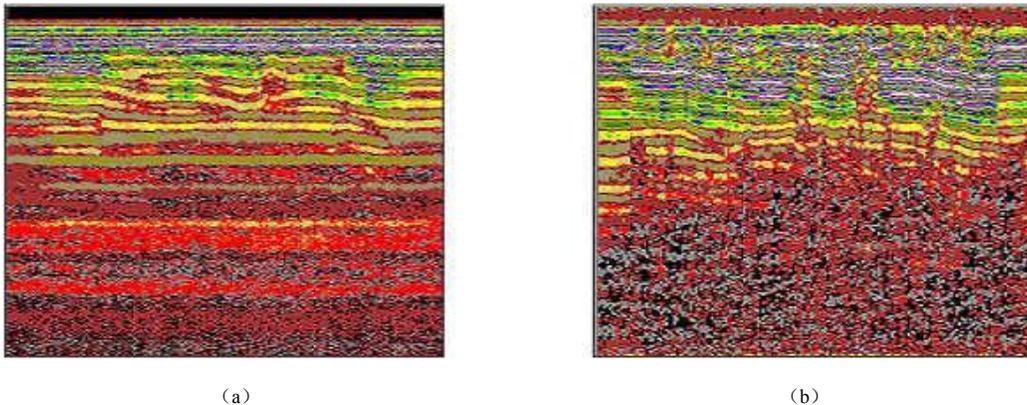
原始数据与处理结果对比

(a) 原始数据剖面; (b) 背景去噪后数据剖面

从处理的效果看,水管信号得到明显提高。原始数据的水平干扰信号得到较好的压制。

(2) 二维谱的逆变换去噪

地质雷达采集的数据在二维谱分析中可以分解为频率和波数,波数与频率的商即为视速度。从地质雷达剖面上分析,显然水平信号的视速度是非常大的。因此我们可以将视速度大的数据在二维谱(频率域和波数域)中去除,通过二维谱逆变换,形成新的地质雷达剖面数据,这个新的剖面数据就是去除水平干扰后的数据。



原始剖面 and 二维谱逆变换处理剖面结果对比

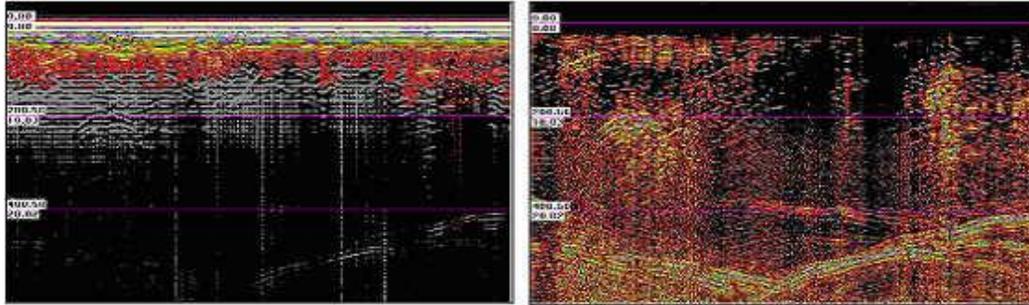
(a) 原始数据剖面; (b) 二维逆变换后的数据剖面

从处理的效果看,回填后原土界面反射信号得到了进一步的加强。原始数据的水平干扰信号得到较好的压制。

(3) 水平预测滤波

水平预测滤波利用维纳滤波器实现对信号的预测,并压制水平信号功能。该方法具有较好的抗干扰能力。尤其对管线、溶洞的处理具有很好的效果。GR 雷达处理系统将维纳滤波器和雷达

信号进行有机结合,实现了对水平信号压制,经过多次实际处理,均获得很好的效果。下图是原始数据和预测长度为200时的处理结果的雷达剖面对比图象。



(a)

(b)

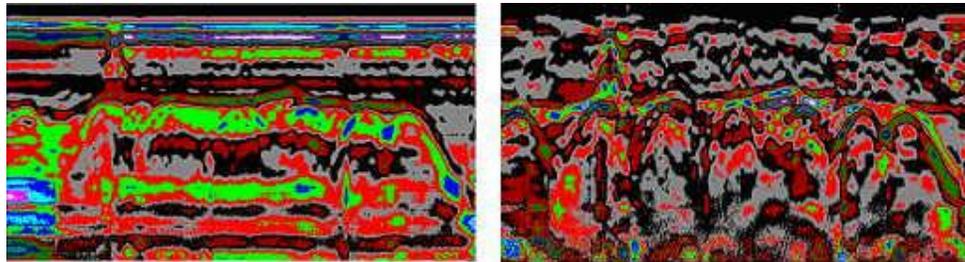
原始剖面 and 水平预测滤波处理剖面结果对比

(a) 原始数据剖面; (b) 水平滤波处理后数据剖面

(4) 滑动平均

滑动平均可以分为两种:高通和低通。

高通滑动平均就是当前样点数据的背景数据是随当前样点值的位置不同而变动。背景数值的计算是根据用户需求设定的平均样点数计算出来的。该处理对水平干扰信号具有很强的去除功能。下图是采用180点处理前后的对比图象。



(a)

(b)

原始剖面 and 水平预测滤波处理剖面结果对比

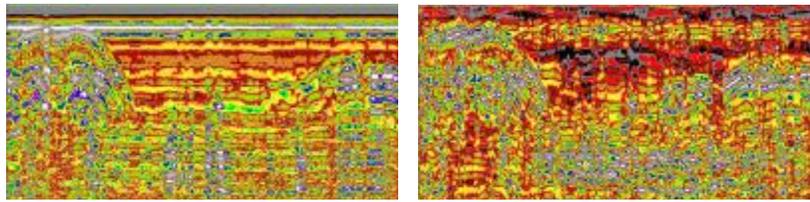
(a) 原始数据剖面; (b) 水平滤波处理后数据剖面

其它干扰信号的处理

(1) 一维滤波; (2) 二维滤波; (3) 频率补偿; (4) 小波变换; (5) 反褶积; (6) 道间平衡加强; (7) 模拟滤波; (8) 子波相干加强; (9) 数学运算; (10) 希尔伯特变换; (11) 增益控制等纵多的处理模块。

不同处理模块对不同地质条件、不同溶洞、断层的形状、规模等都具有不同的效果。处理模块的增加极大地丰富了地质雷达地内容,为超前预报获得真实可靠地资料打下了良好地基础。

从处理的组合方法上,GR雷达处理分析系统还可以进行不同文件的叠加和相消等处理。大大增强了处理模块的功能效果。如下图所示,图(b)是原始数据经过预测滤波和小波变换的结果。



(a) (b)
原始剖面 and 综合处理剖面结果对比

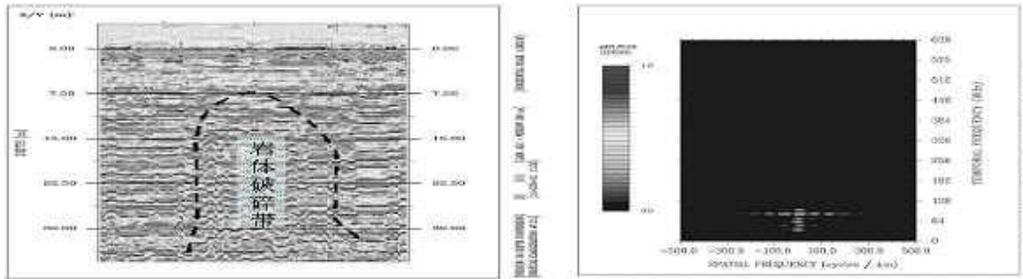
(a) 原始数据剖面 (b) 预测和小波变换处理后剖面

三 研究溶洞形成地质雷达图象的解译

在研究溶洞处理的基础上，采用剖面信号与二维谱信号的结合来分析溶洞的特点属性，和在座的专家进行讨论。

1、岩石不完整，破碎严重，但岩体内部含泥质物较少

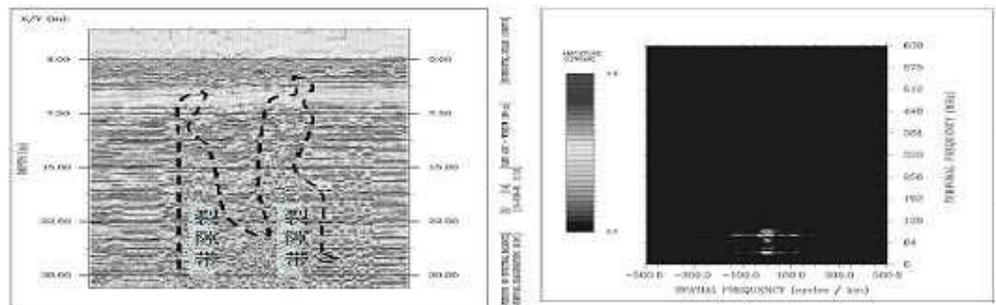
表现如下特征：波阻抗的连续性断断续续，这是由于破碎岩石间的相互干涉造成的散射现象，但是波的频率成份没有出现奇变，较单一，这类型的破碎带对电磁波高频能量吸收少，散射严重。从这种类型数据的二维谱图像来分析，主频集中在 80MHz 附近，而波数域范围较广，说明该部位的信号受到岩体吸收影响较小，散射较大，极大拓宽了波数域的范围，由于低频成份也表现出一定的能量，这初步能反映出该处岩体较为破碎，岩体内部含有一定数量的泥介质，但含水量不大。下图是雷达剖面 and 相应的二维谱分析图象。



(a) 数据剖面; (b) 数据二维谱分析图象

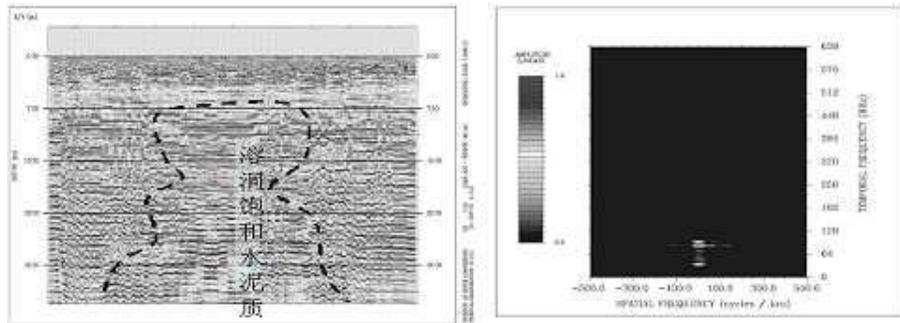
2、岩石不完整，在岩体内部出现狭窄的裂隙带

表现如下特征：波阻抗的连续性很差，这是由于破碎带内岩石的破损严重，破坏了波阻抗的连续性，但是波的频率成份没有出现奇变，较单一，这类型的破碎带对电磁波高频能量吸收少，由于裂隙带范围较小，因此散射现象不明显严重（可以从相应的二维谱图像中得出）。从这种类型数据的二维谱图像（见图 18）来分析，主频集中在 80MHz 附近，而波数域范围较窄（相对破碎带而言），说明该部位的信号受到岩体吸收影响较小，散射不明显，由于低频成份也表现出一定的能量，这初步能反映出该处岩体较为破碎。 下图为雷达剖面 and 相应的二维谱剖面：



(a) 数据剖面; (b) 数据二维谱分析图象

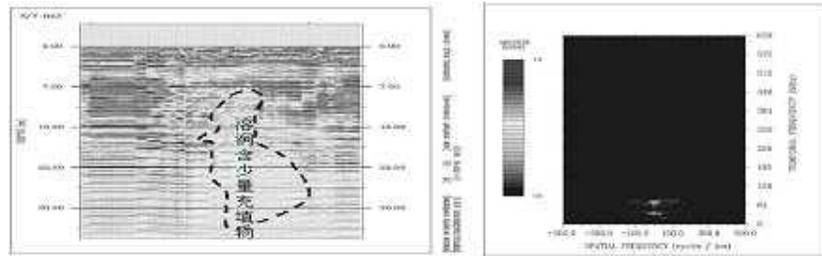
3、岩石不完整，在岩体内部溶洞充填大量饱和水的泥质 表现如下特征：介质电磁波高频反射信号在溶洞体内很微弱，这是由于饱和水泥质对高频信号强烈吸收造成的。在溶洞内部介质反射信号和周围介质的反射信号发生了突变，溶洞内部以低频反射为主，周围介质从图像可以看出完整性很差，但频率成份明显高于溶洞内介质的频率。从这种类型数据的二维谱图像来分析，主频集中在中低频附近，而波数域范围较窄，说明溶洞内部充填大量的饱和水泥质，在饱和水泥质内部，雷达波是不可能产生散射间的干涉。



(a) 数据剖面;

(b) 数据二维谱分析图象

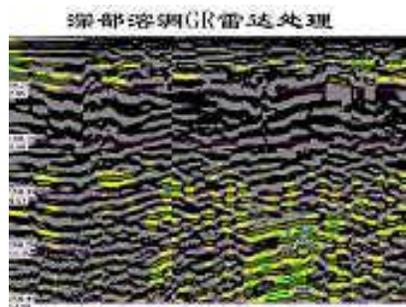
4、岩石不完整，在岩体内部溶洞无充填物或充填少量的松散介质 表现如下特征：电磁波反射信号在溶洞体内很微弱，与溶洞周围介质反射信号存在明显的差异。从这种类型的二维谱图像（见下图）来分析，主频集中在高频区域附近，而波数域范围较窄，在主频-波数集中带附近存在微弱的影像，这是由于溶洞对电磁波的绕射造成的。



(a) 数据剖面

(b) 数据二维谱分析图象

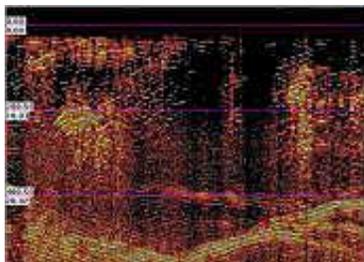
5、溶洞围岩完整，在岩体内部溶洞无充填物或充填少量的水 由于溶洞围岩完整，因此在雷达图象上，溶洞表现为相对孤立的异常体，参见右图所示。



6、溶洞

围岩完整，

在岩体内部溶洞充填较多的水，切裂隙发育 由于溶洞围岩完整，切内部含有水，因此雷达图象突出了溶洞外形的反射图象，明显可以看出裂隙纵横，裂隙经过处理，由于水的反射，裂隙的轮廓也清晰可见。参见左图所示。



注意：由于雷达 500MHz 天线和 100MHz 天线主频率和带宽存在较大的差异，因此对

溶洞的反映也存在较大的差异，所以不能仅仅将 500MHz 天线解释出的空洞图象简单地应用于 100MHz 天线探测结果溶洞上，必须结合实际情况，进行有效的分析处理，才能正确地应用雷达来解决掌子面超前预报地问题。只有互相学习和讨论，才能提高我们的处理和解释能力。

四 结束语

实践证明地质雷达技术是一种有效探测手段和检测手段。中国矿业大学（北京校区）以高等学府高技术人才为基础，艰苦创业，先后开发 GR 地质雷达采集系统和 GR 地质雷达处理分析系统。这些系统的研究与开发将进一步丰富了地质雷达探测技术的内容。