

电磁波法探测技术—地质雷达

地质雷达法、探地雷达法

GPR (Ground-Penetrating-Radar) ,
Geo-radar, Geo Probing radar

是研究超高频短脉冲电磁波在地下介质中传播规律的一门学科。正弦电磁波的传播特征是探地雷达的理论基础。

是一种对下的或结构物内部不可见的目标体或分界面进行定位或判别的电磁波探测技术

探地雷达具有以下技术特性，使其在许多领域尤其是工程地质领域的得到广泛应用。

1. 它是一种非破坏性探测技术，可以安全地用于城市和正在建设中的工程现场，工作场地条件宽松，适应性强；
2. 抗电磁干扰能力强，可在城市内各种噪声环境下工作，环境干扰影响小；
3. 具有工程上较满意的探测深度和分辨率，现场直接提供实时剖面记录图，图像清晰直观；
4. 便携微机控制数据采集、记录、存储和处理；
5. 由于使用了高频率，电磁波能量在地下的衰减较强烈，若在高导厚覆盖条件下，探测范围将受到限制。

雷达探测技术用于地下，是在高频微电子技术的以及计算机数据处理方法迅速发展的近代，才得以极大提高，应用领域也迅速开拓。与探空或通讯雷达技术类似，探地雷达也是利用高频电磁脉冲波的反射探测目的体及地质现象的，它是从地面向地下发射电磁波来实现探测目的，故亦称之为探地雷达或地质雷达（Grand Penetrating Radar, GPR）。

探地雷达虽然与探空雷达一样利用高频电磁波束的反射来探测目标体，但是探地雷达探测的是在地下有耗介质中的目的体，因此形成了其独特的发射波形与天线设计特点。

据已发表的资料，探地雷达使用的发射波形有调幅脉冲波、调频脉冲波、连续波等；使用的天线有对称振子天线、非对称振子天线、螺旋天线、喇叭天线等。脉冲时域探地雷达输出功率大，能实时监测测量结果，设备可做成便携式等优点，在商用地面探地雷达中，已得到广泛应用。

探地雷达探测所使用的中心工作频率在10~5000MHZ范围时窗在0~20000ns，电磁场以波动形式传播，为辐射场法。根据不同的地质条件，地面系列的雷达探测深度约在30~50m，分辨率可达数厘米，深度符合率小于±5cm。

探地雷达的实际应用范围很广，如：

灰岩地区岩溶的探测；

冰川和冰山的厚度等探测；

工程地质探测；

管线探测；

煤矿井探测，泥炭调查；

放射性废弃物处理调查；

水文地质调查；

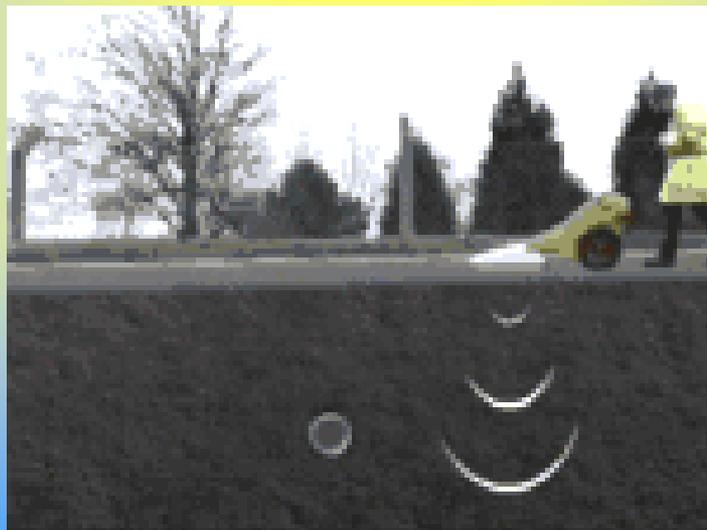
地基和道路下空洞及裂缝等建筑质量探测；

地下埋设物，古墓遗迹等探查；

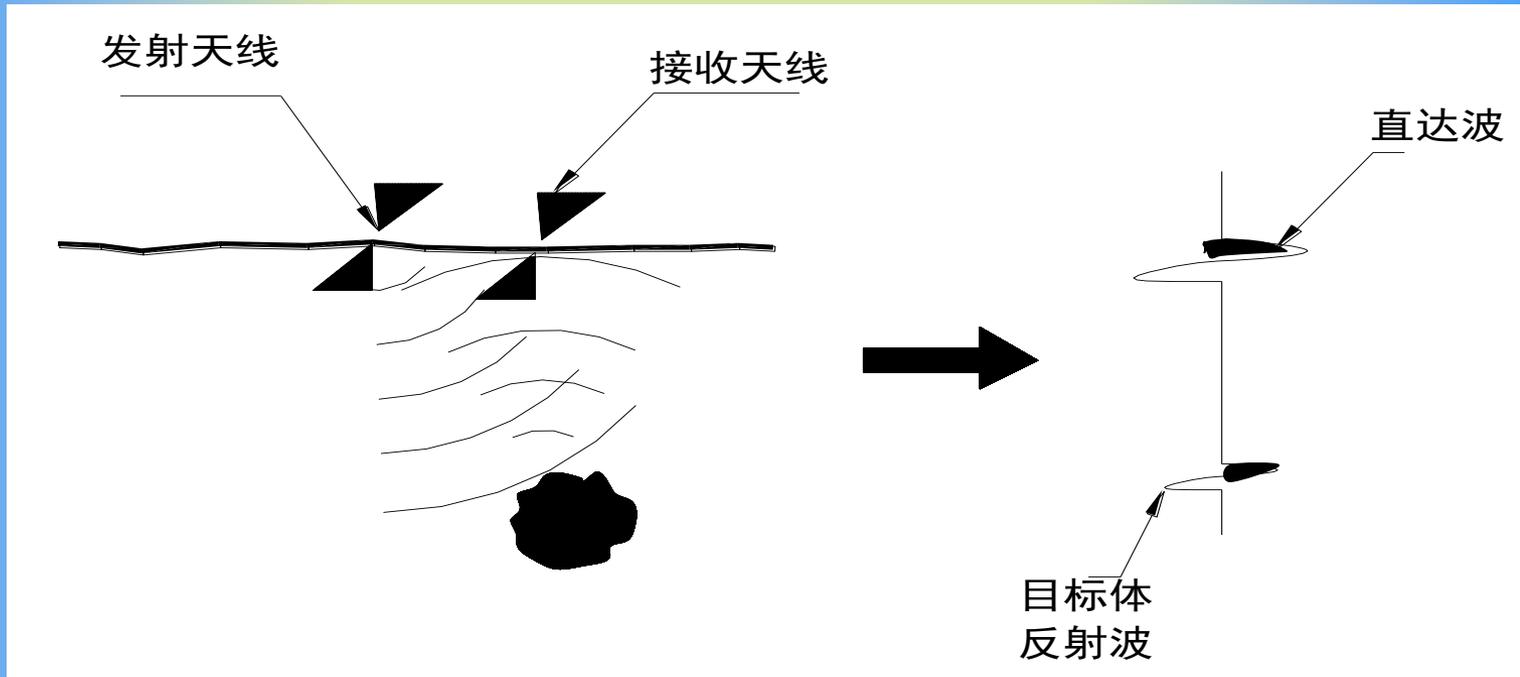
隧道、堤岸、水坝等探测。

一、基本原理

高频电磁波以宽频带短脉冲形式，通过发射天线被定向送入地下，经存在电性差异的地下地层或目标体反射后返回地面，由接收天线所接收。高频电磁波在介质中传播时，其传播路径、电磁场强度与波形将随通过介质的电性特征与几何形态而变化。因此，通过对时域波形的采集、处理和分析，可确定地下分界面或地质体的空间位置及结构。



探地雷达工作原理示意图



- 超高频电磁波 (10MHz—5000MHz)
- 由于地下介质往往具有不同的物理特性，如介质的介电性、导电性及导磁性差异，因而对电磁波具有不同的波阻抗，进入地下的电磁波在穿过地下各地层或管线等目标体时，由于界面两侧的波阻抗不同，电磁波在介质的界面上会发生反射和折射，反射回地面的电磁波脉冲其传播路径、电磁波场强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化，因此，从接收到的雷达反射回波走时、幅度及波形资料，可以推断地下介质或管线的埋深与类型。

1. 电磁波在介质中的传播速度

探地雷达测量的是地下界面的反射波的**走时**，为了获取地下**界面的深度**，必须要有介质的**电磁波传播速度** v ，其值为

$$v = \frac{\omega}{\alpha} = \left[\frac{\mu\varepsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \right)^2} + 1 \right) \right]^{-1/2}$$

α 为相位系数， σ 为导电率（ $1/\rho$ ）， ε 为介电系数， μ 为磁导率

绝大多数岩石介质属非磁性、非导电介质，常常满

足 $\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \ll 1$ ，于是可得

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

式中 c 为真空中电磁波传播速度， $c = 0.3\text{m/ns}$ ； ϵ_r 为相对介电常数。上式表明对大多数非导电、非磁性介质来说，其电磁波传播速度 v 主要取决于介质的相对介电常数。

2. 电磁波在介质中的吸收特性

吸收系数 β 决定了场强在传播过程中的衰减速率，探地雷达工作频率高，在地下介质中以位移电流为主，即 $\sigma / \omega\epsilon \ll 1$ ，这时 β 的近似值为：

$$\beta \approx \frac{\sigma}{2} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$$

即 β 与导电率成正比，与介电常数的平方根成反比。在空气中， $\sigma = 0$ ，则 $\beta = 0$

当 $\sigma / \omega\epsilon \gg 1$ 时(导电介质，传导电流为主)，

$$\beta \approx \sqrt{\sigma\mu\omega/2}$$

β 与 σ 、 f 有关，但与 ϵ 无关。可见在高导介质或使用高频时， β 将增大

3. 电磁波的反射系数

电磁波在传播过程中，遇到不同的阻抗界面时将产生反射波和透射波，其反射与透射遵循反射与透射定律。反射波能量大小取决于反射系数R，反射系数的数学表达式：

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

常见介质的相对介电常数、导电率、传播速度与吸收系数

地下介质	相对介电常数 ϵ_r	导电率 σ (mS/m)	雷达波速 v (m/ns)	衰减系数 β (dB/m)
空气	1	0	0.3	0
淡水	80	0.5	0.033	0.1
海水	80	30000	0.01	1000
干砂	3-5	0.01	0.15	0.01
饱和砂	20-30	0.1-10	0.06	0.03-0.3
石灰岩	4-8	0.5-2	0.12	0.4-1
泥岩	5-15	1-100	0.09	1-100
粉砂	5-30	1-100	0.07	1-100
粘土	5-40	2-1000	0.06	1-300
花岗岩	4-6	0.01-1	0.13	0.01-1
岩盐	5-6	0.01-1	0.13	0.01-1
冰	3-4	0.01	0.16	0.01
金属	300	10^{10}	0.017	10^8
PVC材料	3.3	1.34	0.16	0.14

二、雷达技术的研究及探测仪器的发展

利用雷达对空间目标的探测已发展成为一项成熟的技术，并被广泛应用在各种军事及民用领域中。随着人类对自然界认识的逐步深化，人们对地下世界的探知要求变得越来越迫切与深入。早在1904年德国人就采用了电磁波探测地下的金属物体，到1956年，J. c. Cook 又提出了应用无载频脉冲雷达探测地下目标。随着科学技术理论与应用实践，瞬态无载频脉冲雷达技术得到了较快的发展，并在70年代中进入了实际应用阶段。

我国从80年代中期开始进行探地雷达技术的研究和试验，最初用于军事地雷的探测。经过十几年的研制攻关，在雷达硬件设备、信号处理、目标成像等方面取得重大进展和突破，特别是成功地实现了对地下目标的三维层析成像，大大提高了分辨率和清晰度，使探地雷达在信号处理和成像技术方面进入了世界领先行列

- 美国GSSI, **SIR**系列
- 瑞典Mala Geoscience Inc., **RAMAC**系列
- 拉脱维亚, **ZOND**系列
- 加拿大Sensor & Software Inc., **EKKO** (Noggin)系列
- 意大利IDS, **RIS**系列

SIR 系列

匹配天线



SIR3000型（最新）

RAMAC系列



X3M型

Laptop computer
and data cable to
RAMAC X3M

RAMAC/GPR
Cart with built-in
triggering wheel

External 12 V
power supply

RAMAC X3M
built-in electronic
mounted on the
500 MHz antenna



匹配天线

ZOND12-E型 地质雷达及天线



EKKO 系列



EKKO 100增强型



E
K
K
O
1
0
0
0
型



Noggin 250型

RIS系列



RIS-2K/0型
(单道)

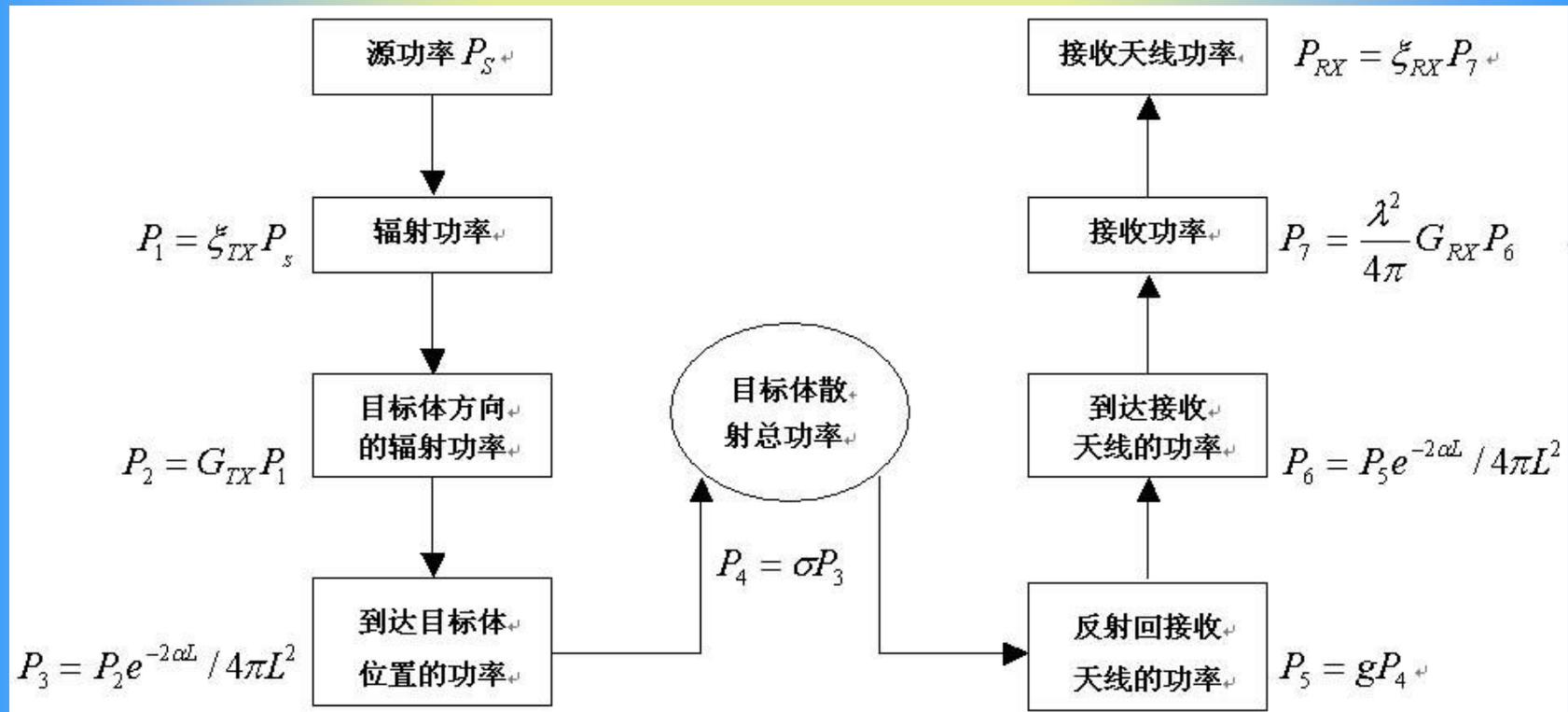


RIS-2K/ME型
(多道)

三、野外数据采集

1. 主要技术参数

1.1 雷达方程



探测距离与探距方程

系统增益:

$$Q_s = 10 \log \left[\frac{P_{Min}}{P_s} \right]$$

最小可探测的信号功率

输入到发射天线的功率

雷达系统从发射到接收过程中的功率损耗 Q 可由雷达探距方程来描述。

$$Q = 10 \log \left(\frac{\xi_{TX} \cdot \xi_{EX} \cdot G_{TX} \cdot G_{RX} \cdot \lambda^2 \cdot g \sigma \cdot e^{-4\beta r}}{64 \pi^3 f^2 r^4} \right)$$

满足 $Q_s + Q > 0$ 的距离，称为探地雷达的探测距离，亦即处在距离 r 范围内的目的体的反射信号可以为雷达系统所探测。

1.2 探测距离

与选用的天线频率、地下介质的相对介电常数、电导率相关

对于铜、铁等良导电媒介质，其电导率 σ 很大，衰减常数 β 也很大，因此，电磁波在良导电媒质中传播时，场矢量的衰减很快，电磁波只能透入良导体表面的薄层内（电磁波只能在导体以外的空间或电介质中传播），这种现象称为趋肤效应。电磁波透入导体内的深度称为穿透深度，或趋肤深度：

$$\delta = \frac{\lambda}{2\pi}$$

这表明电磁波进入良导体的深度是其波长的 $1/2\pi$ 倍，高频电磁波透入良导体的深度很小。当频率是100MHz时， $\delta = 0.67 \times 10^{-3} \text{ cm}$ 。可见，高频电磁波的电磁场，集中在良导体表面的薄层内，相应的高频电流也集中在该薄层内流动。

ZOND12-E100MHZ天线实例统计的探测深度

岩性	电阻率 ($\Omega \cdot m$)	探测深度 (M)
花岗岩	7000-15000	20-50
基性岩	7000-15000	20-50
辉长岩	10000-14000	20-50
石英	5000-10000	25-50
土壤粗砂 (干)	20000-80000	20-30
卵石 (湿)	1000-5000	10-15
砂 (干)	5000-20000	15-25
砂 (湿)	200-1000	5-10
粉砂 (干)	400-2000	5-10
粉砂 (湿)	30-200	3-8
粘土 (湿)	15-30	2-6
耕作土 (干)	1000-15000	10-20
耕作土 (湿)	200-1000	5-10
泥炭	100-300	8-10
淡水	10000	20

1.3 分辨率（分辨最小异常体的能力）

垂向分辨率：区分一个以上反射界面的能力

$$\text{四分之一波长： } B = \lambda/4 = v/4f$$

水平分辨率：在水平方向上所能分辨的最小异常体的尺寸
波的干涉原理，与第一菲涅尔带有关

$$D = \sqrt{\lambda h / 2}$$

2. 探地雷达探测的设计

每接受一个探地雷达测量任务都需要对目的体特性与所处环境进行分析，以确定探地雷达测量能否取得预测效果。

(1) **目的体深度**是一个非常重要的问题。如果目的体深度超出雷达系统探测距离的50%，那么探地雷达方法就要被排除。雷达系统探测距离可根据雷达探距方程进行计算。

(2) **目的体几何形态**(尺寸与取向)必须尽可能了解清楚。目的体尺寸包括高度、长度与宽度。目的体的尺寸决定了雷达系统可能具有的分辨率。关系到天线中心频率的选用。如果目的体为非等轴状，则要搞清目的体走向、倾向与倾角，这些将关系到测网的布置。

(3)目的体的电性(介电常数与导电率)必须搞清。雷达方法成功与否取决于是否有足够的反射或散射能量为系统所识别。当围岩与目的体相对介电常数分别为 ϵ_{r1} 与 ϵ_{r2} 时,目的体功率反射系数的估算式为:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{r1}} - \sqrt{\epsilon_{r2}}}{\sqrt{\epsilon_{r1}} + \sqrt{\epsilon_{r2}}}$$

一般来说目的体的功率反射系数应不小于0.01。

(4)围岩的不均一性尺度必须有别于目的体的尺度,否则目的体的响应将淹没在围岩变化特征之中而无法识别。

(5)测区的工作环境必须搞清。当测区内存在大范围金属构件或无线电射频源时,将对测量形成严重干扰,此外测区的地形、地貌、温度、湿度等条件也将影响到测量能否顺利进行。

3. 测网布置

测量工作进行之前必须首先建立测区坐标，以便确定测线的平面位置。

(1) 管线方向已知，测线应垂直管线长轴；如果方向未知，则应采用方格网。

(2) 目的体体积有限时，先用大网格小比例尺初查，以确定目的体的范围，然后用小网格、大比例尺测网进行详查。网格大小等于目的体尺小。

(3) 对基岩面等二维体进行调查时，测线应垂直二维体的走向，线距取决于目的体沿走向方向的变化程度。

4. 测量参数选择

测量参数选择合适与否关系到测量的效果。测量参数包括天线中心频率、时窗、采样率、测点点距与发射、接收天线间距。

(1) **天线中心频率选择**。天线中心频率选择需兼顾目的体深度与目的体的尺寸，一般来说，在满足分辨率且场地条件又许可时，应该尽量使用中心频率较低的天线；

天线频率与探测深度的粗略关系：

1000M-----0.5m

500M-----3-5m

200M-----3-8m

100M-----15m

50M-----30m

10M-----50m

(2) **时窗选择**。时窗选择主要取决于最大探测深度 h_{\max} (单位m) 与地层电磁波速度 v (单位m/ns)。时窗 w (ns) 可由下式估算：

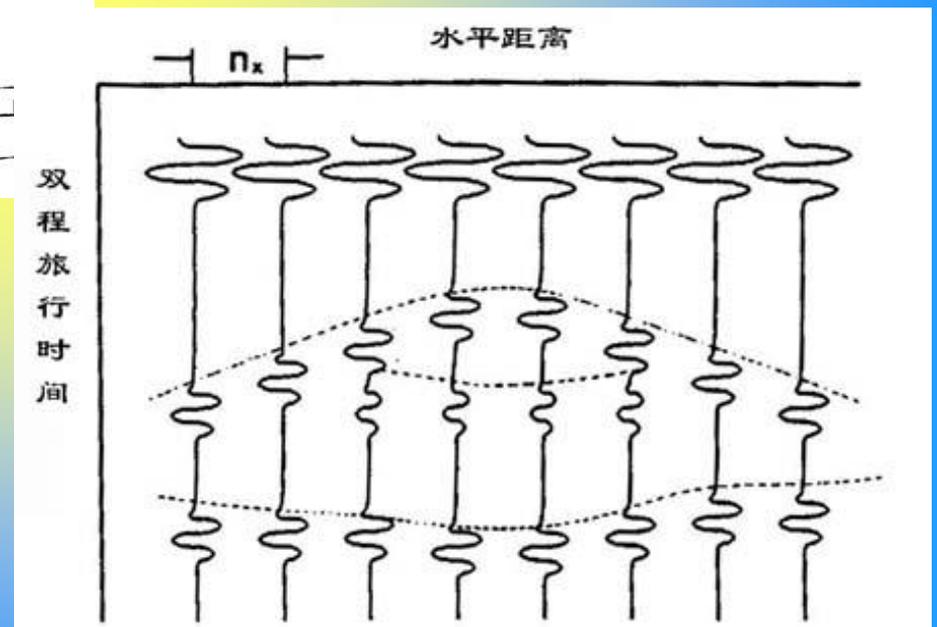
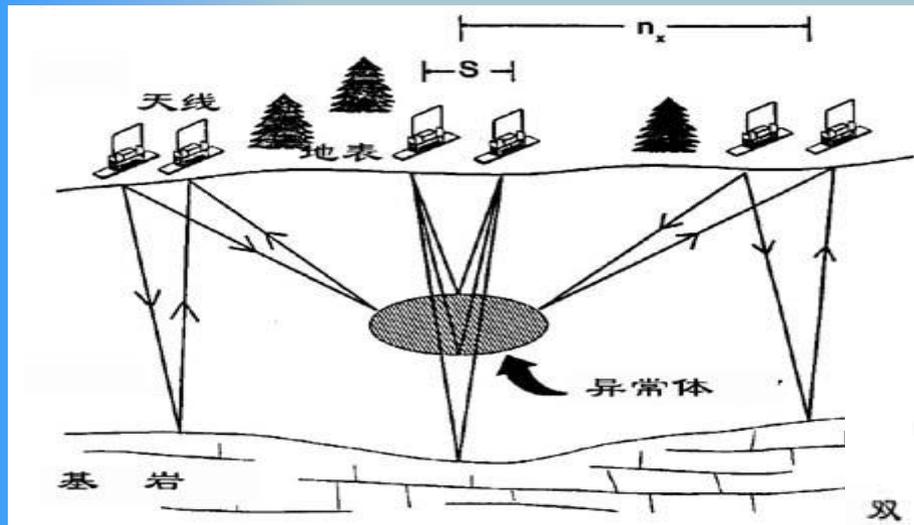
$$w=1.3(2 h_{\max}/v) ;$$

(3) **采样率选择**。采样率是采样点间的时间间隔。采样率由尼奎斯特(Nyquist)采样定律控制，即采样率至少应达到记录的反射波中最高频率的2倍。大多数探地雷达系统，频带与中心频率之比为1: 1，即发射脉冲能量覆盖的频率范围为0.5—1.5倍中心频率。这就是说反射波的最高频率约为中心频率的1.5倍，按Nyquist定律，采样速率至少要达到天线中心频率的3倍。为使记录波形更完整，专业工程师建议采样率为天线中心频率的6倍

(ZOND系列雷达系统建议10倍)。当天线中心频率为f(MHz)。则采样率(ns): $\Delta t=1000/6f$

5. 野外信号采集方式

5.1 剖面法 (反射观测方式)



四、探地雷达图像的数字处理技术

- 常规的数字处理方法：

 - 预处理：点平均、道平均等

 - 数字滤波，低通、高通及带通、中值滤波等

 - 增益调节：AGC、SEG、Const

 - 偏移处理：以射线理论为基础的偏移归位方法
波动方程偏移

 - 多次叠加技术

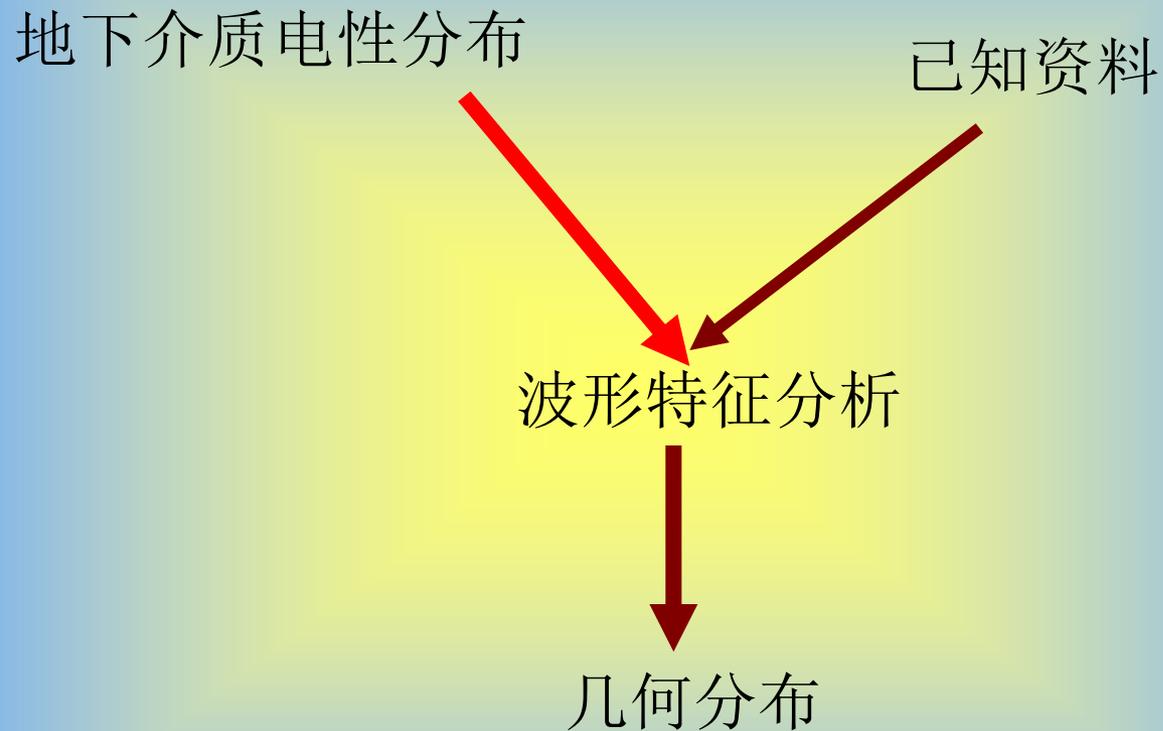
- 特殊的数据处理方法：

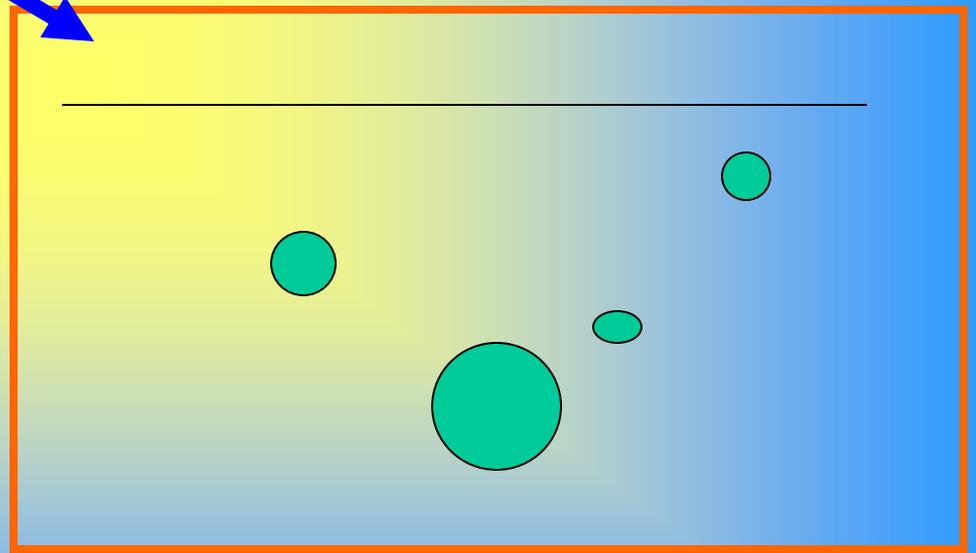
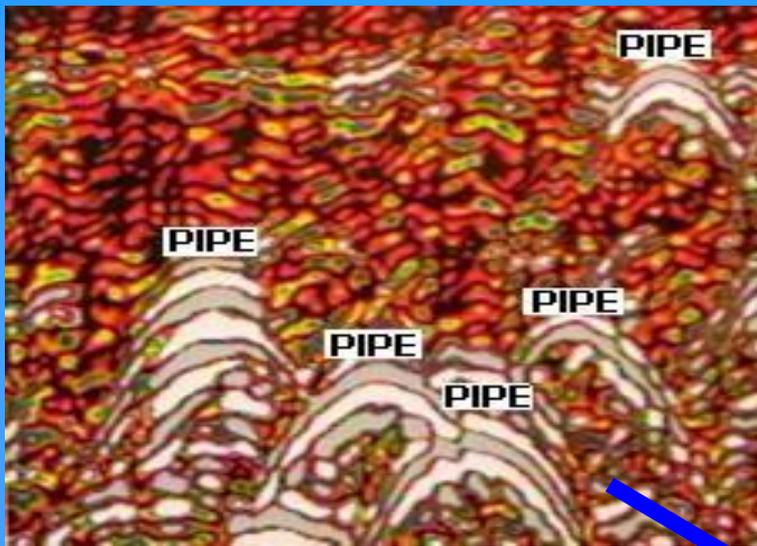
 - 复信号分析：瞬时相位、瞬时振幅、瞬时频率

 - 其它一些非线性技术的应用，如分形技术

- 发展方向：成像处理、图像的三维可视化、智能解释功能

五、探地雷达图像的解释方法



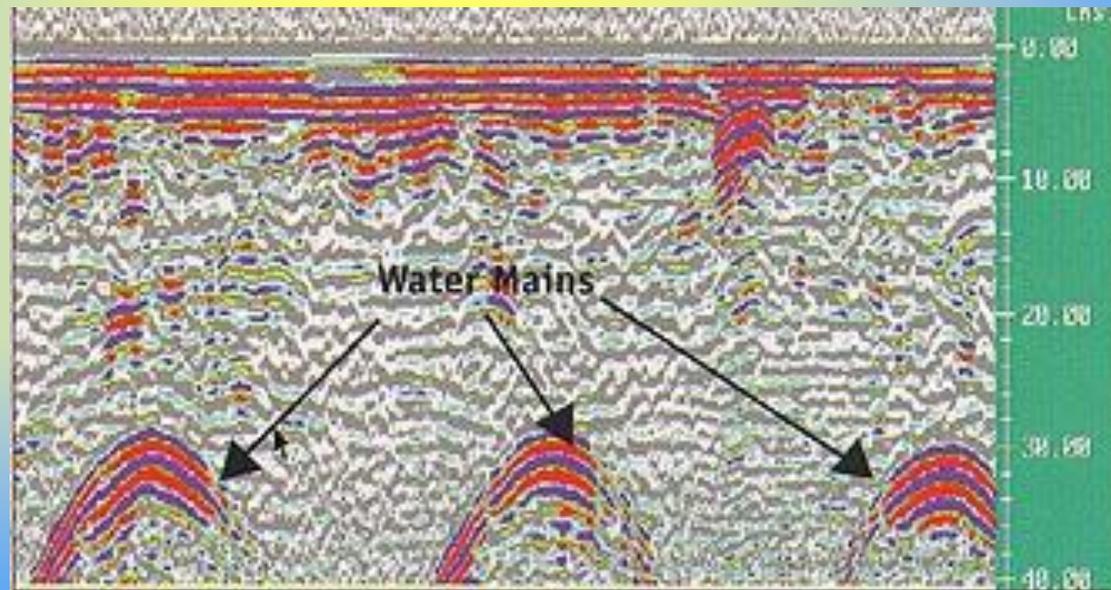


1 时间剖面的对比原则

拾取反射层，依据勘察孔进行对比，建立各种地层的反射波组特征；只要地下介质存在电性差异，就可在雷达剖面上找到相应的反射波。

识别和追踪同一界面的反射波形
依据：

同相性、振幅显著性变化、波形特征



2 干扰波的雷达图像特征

如何识别干扰波与目标体的图像特征非常关键
干扰信号在实际探测工作不可避免

1) 地面干扰

地面架空电线（双曲线）

测线附近的金属物（强振幅、密集的反射波组）

地面上的砾石（多次反射，局部强振幅回波）

测绳和皮尺（典型的“X”型干扰）

2) 地下异常的多次波

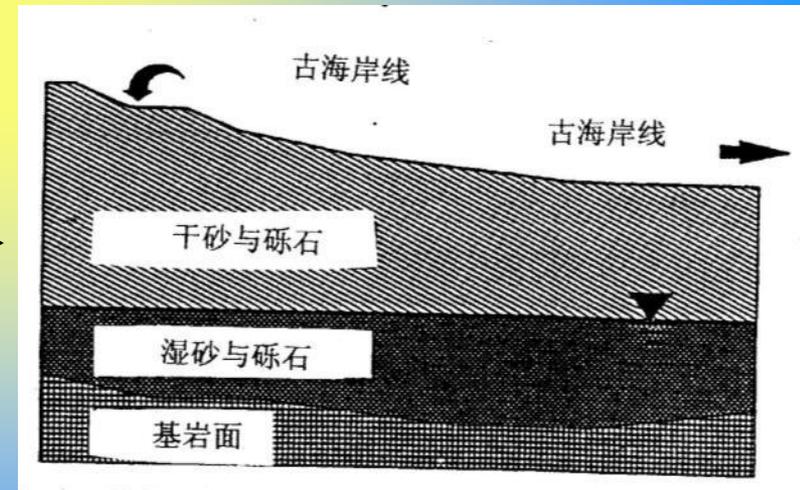
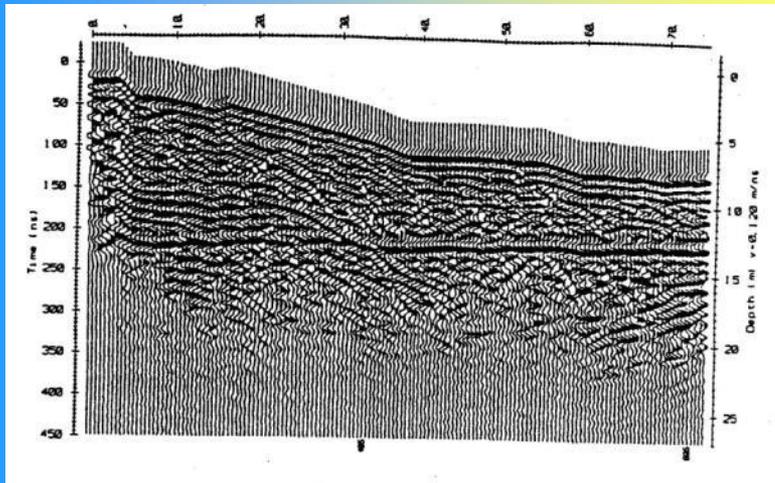
在地质体与地表面来回反射，严重影响目标体的反射波信息，波形杂乱，不规则。

3 常见特殊地质体的雷达图像特征

1) 潜水面

水平的强振幅反射波

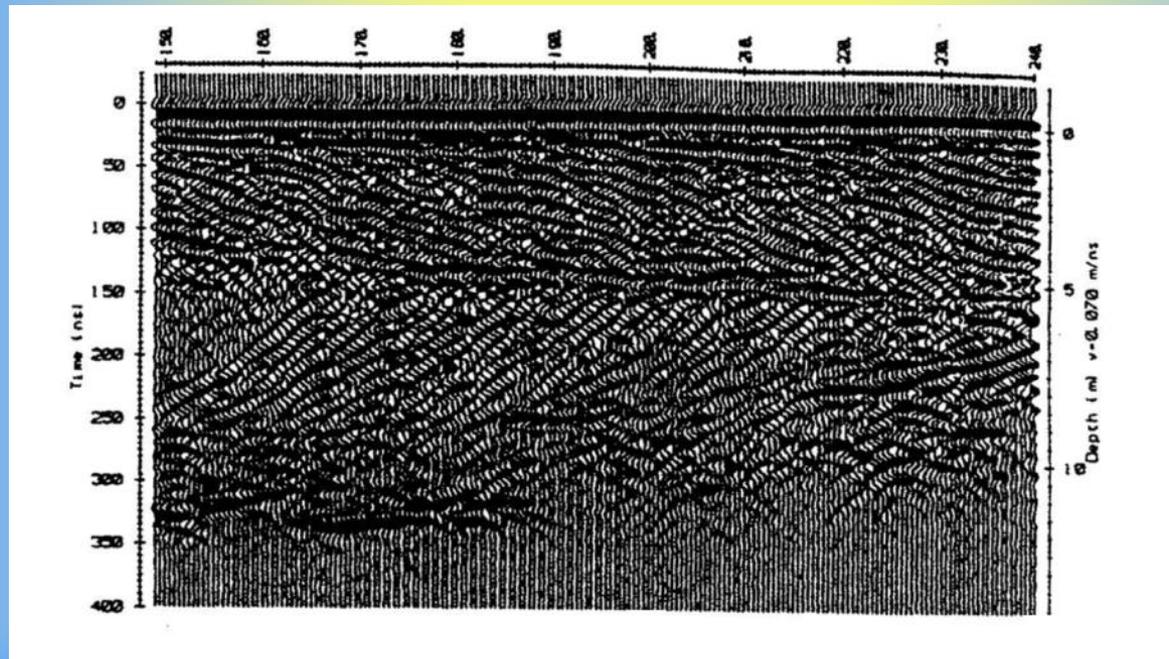
潜水面上下介质因为含水量的差别，介电常数产生较大的差异，反射系数较大。潜水面下的反射波组衰减较大。



2) 不同土层的波场特征

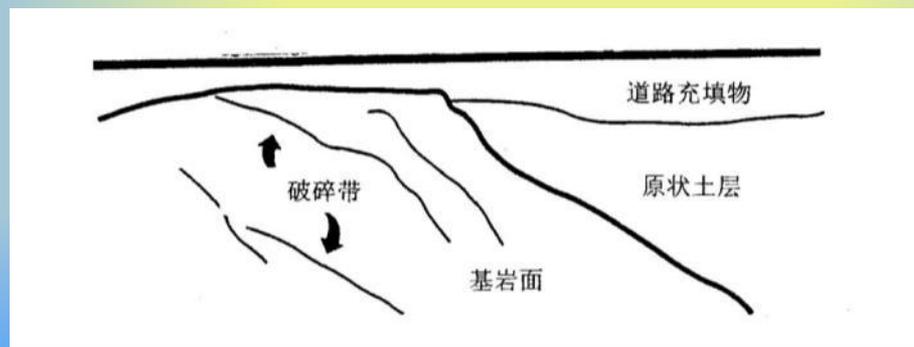
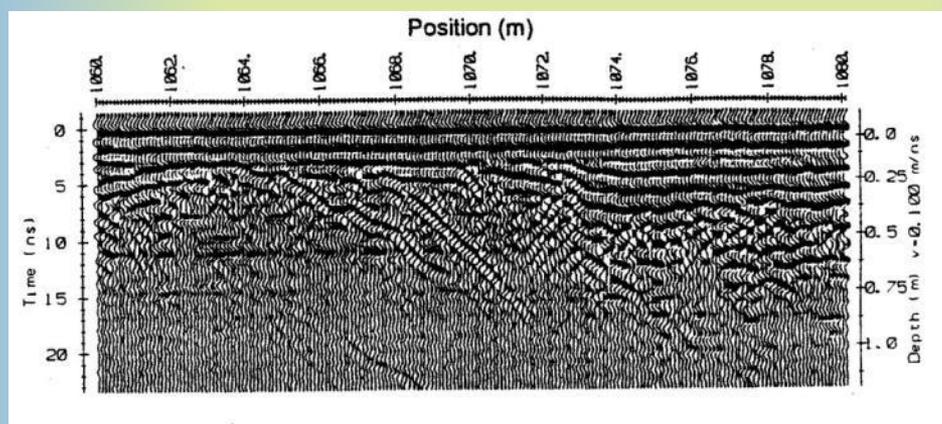
杂填土：反射波杂乱无序，

粘土层：同相轴连续，波组平行，粉质粘土，振幅中等，淤泥质粘土，衰减大，振幅小，砂层的波场特征与粘土层相似，中等及粗砂层，反射波同相轴不连续，存在有规律的绕射波。



3) 基岩破碎带的波场特征

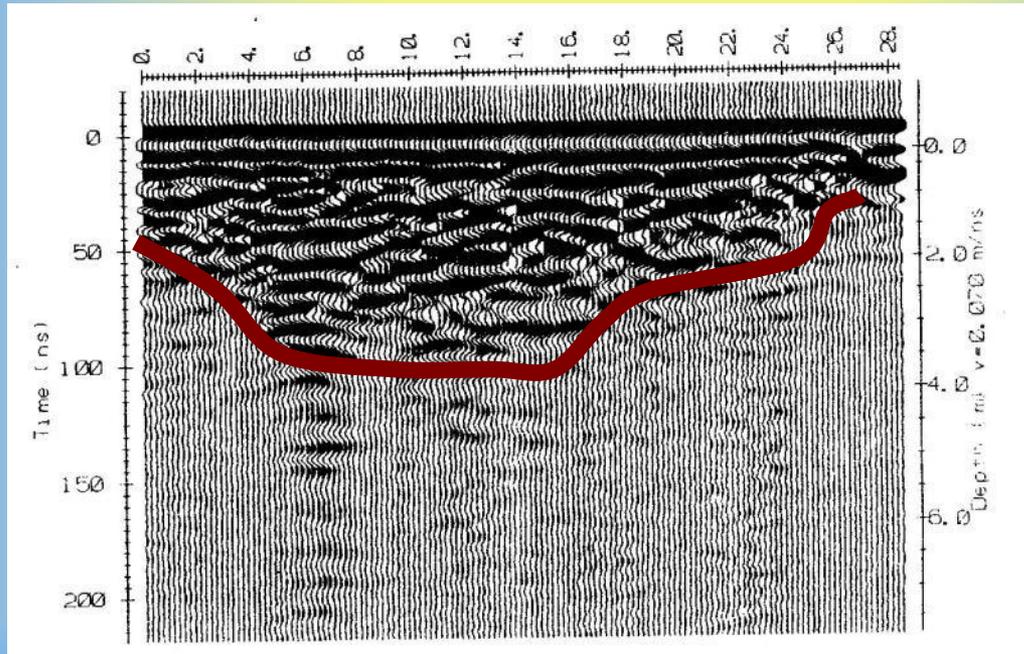
同相轴错断，但破碎带两侧的波组关系相对稳定
破碎面上的振幅强



4) 暗浜及古河道的波场特征

特殊的地质现象。成分复杂，电性差异大
二者雷达图像特征相似，区别在于范围的大小

反射波振幅大，波形粗黑，同相轴不连续，波形杂乱，边界明显，



4 常见地下目的物的雷达图像特征

地下管线

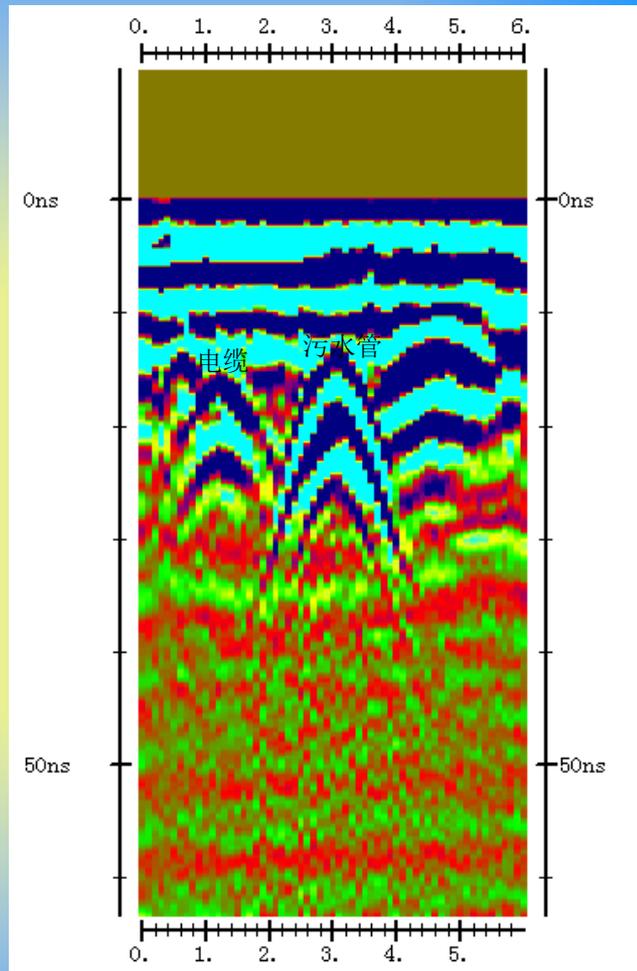
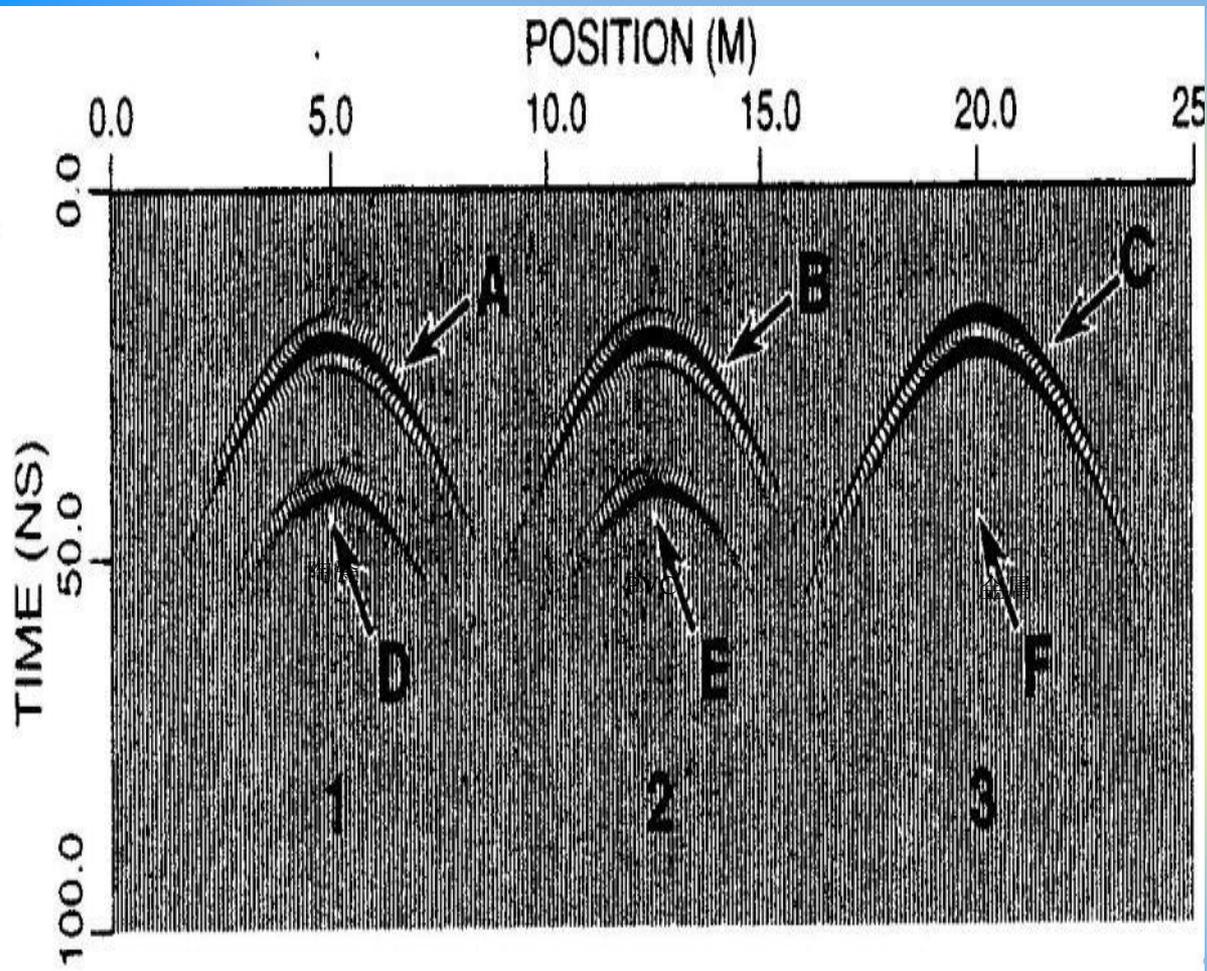
反射同相轴呈向上凸起的弧形，顶部反射振幅最强，弧形两端反射振幅最弱，不同的材质的管线的反射波特征不同：

金属管：介电常数大，导电率极强，衰减极大，金属管顶反射出现极性反转，无管底的反射信息

非金属管，管顶无极性反转，有可能出现管底信息

管内是否充水，其波形特征亦不同，若充水，则亦出现波形的极性反转

管线的半径越大，反射弧的曲率半径就越大

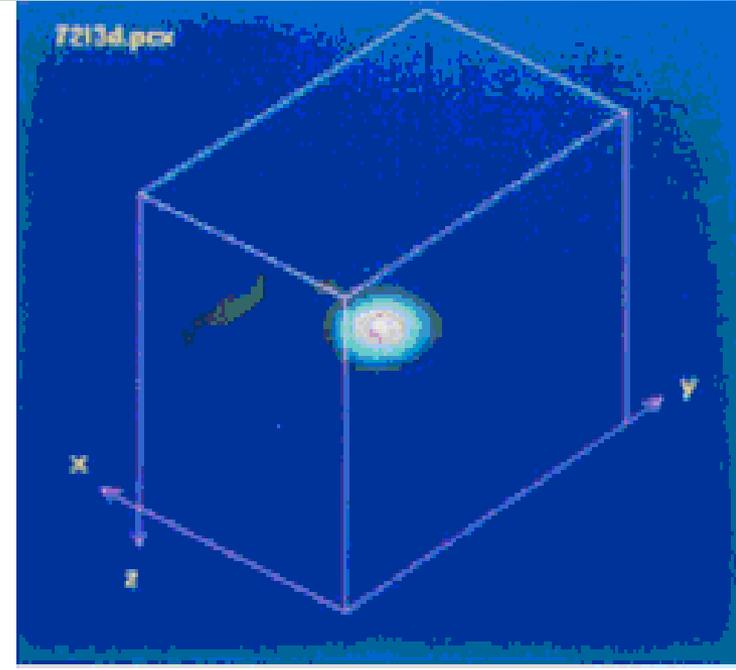


六、探地雷达的应用

地雷探测

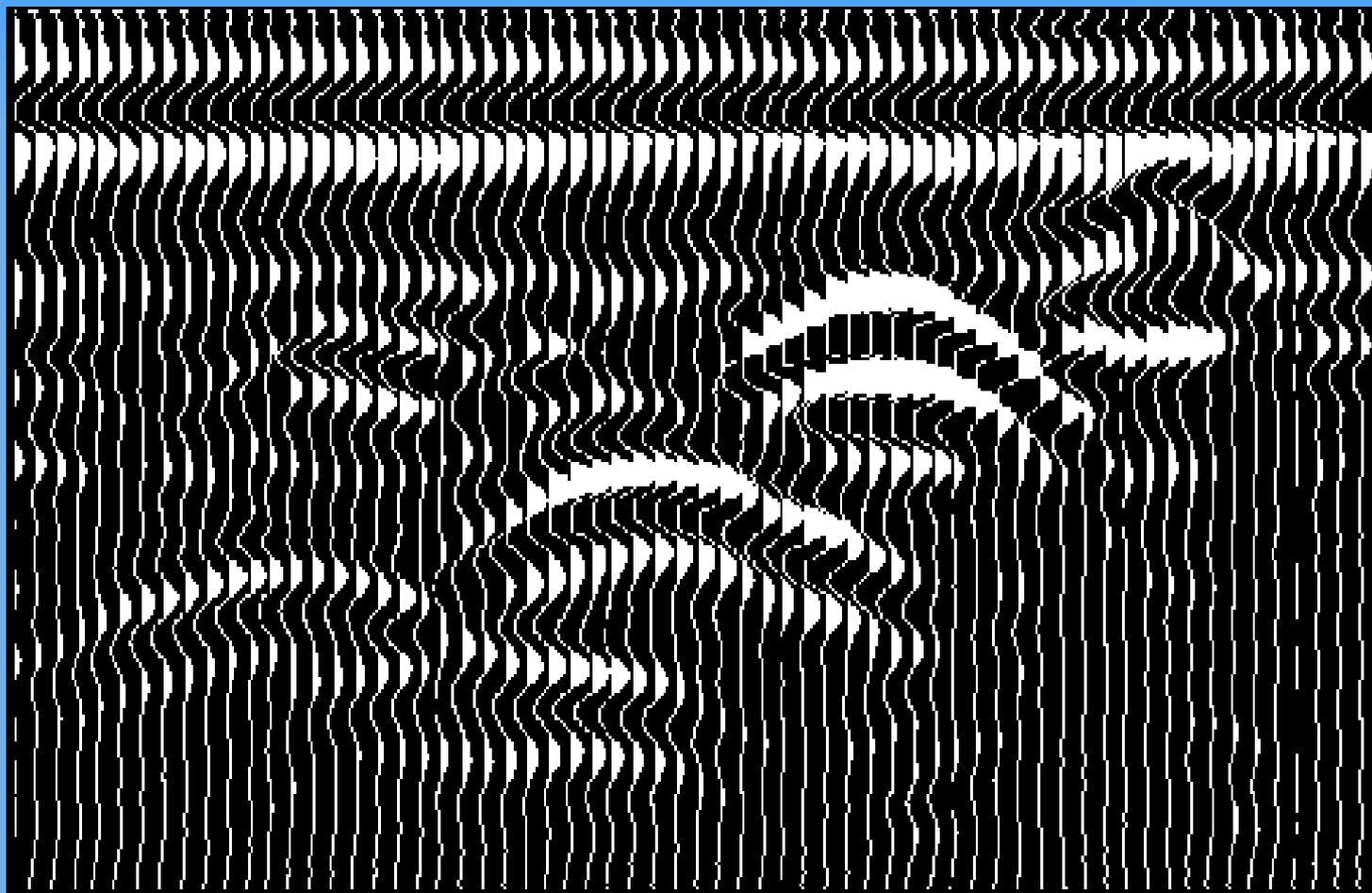


72式塑料防步兵地雷（左）

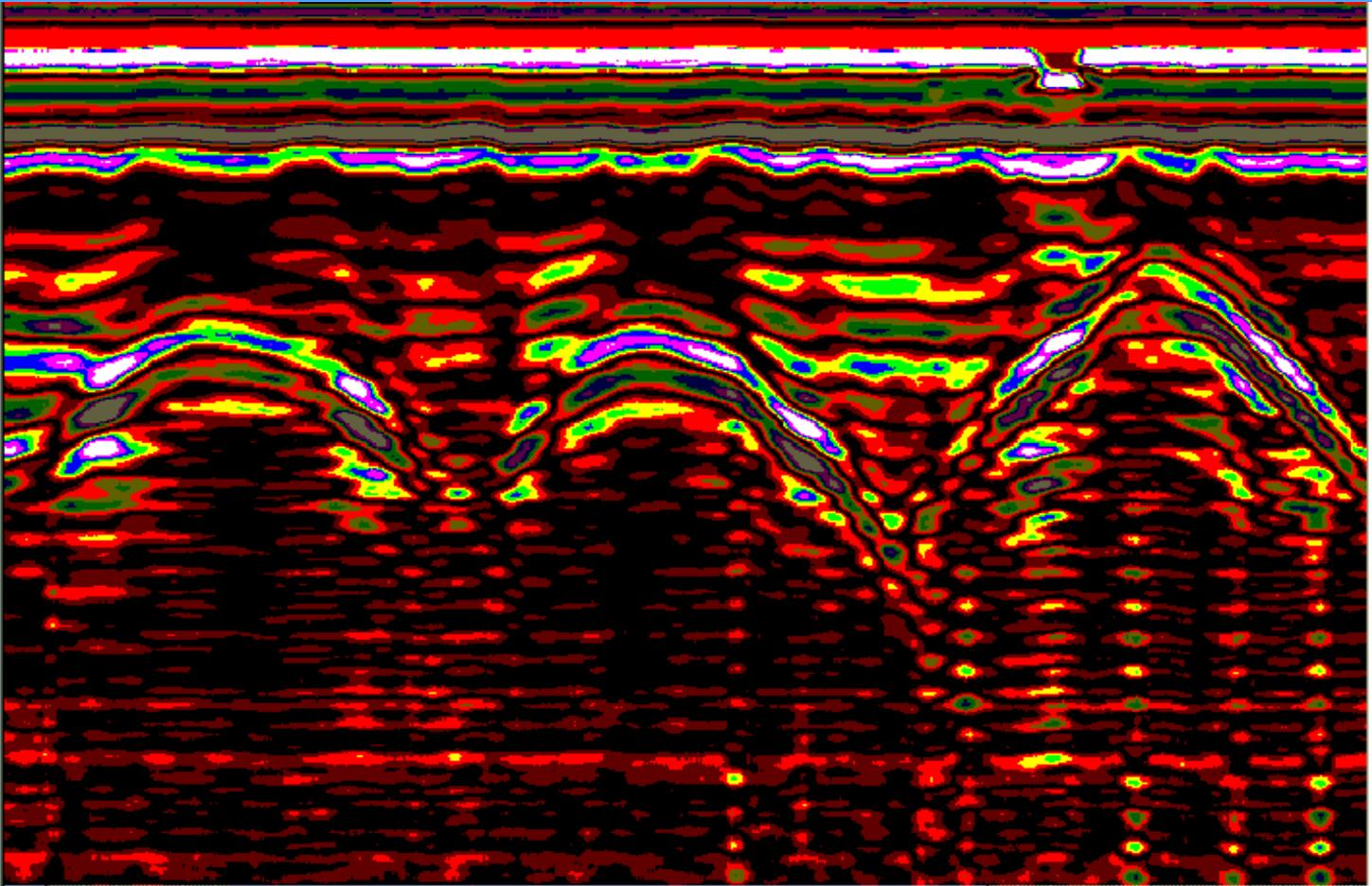


雷达图像（右）

说明：制造地雷的材料和触发方式趋于多样化，仅靠金属探测器远远不够。探地雷达不仅可以发现金属地雷，对非金属类目标探测也可大展身手。

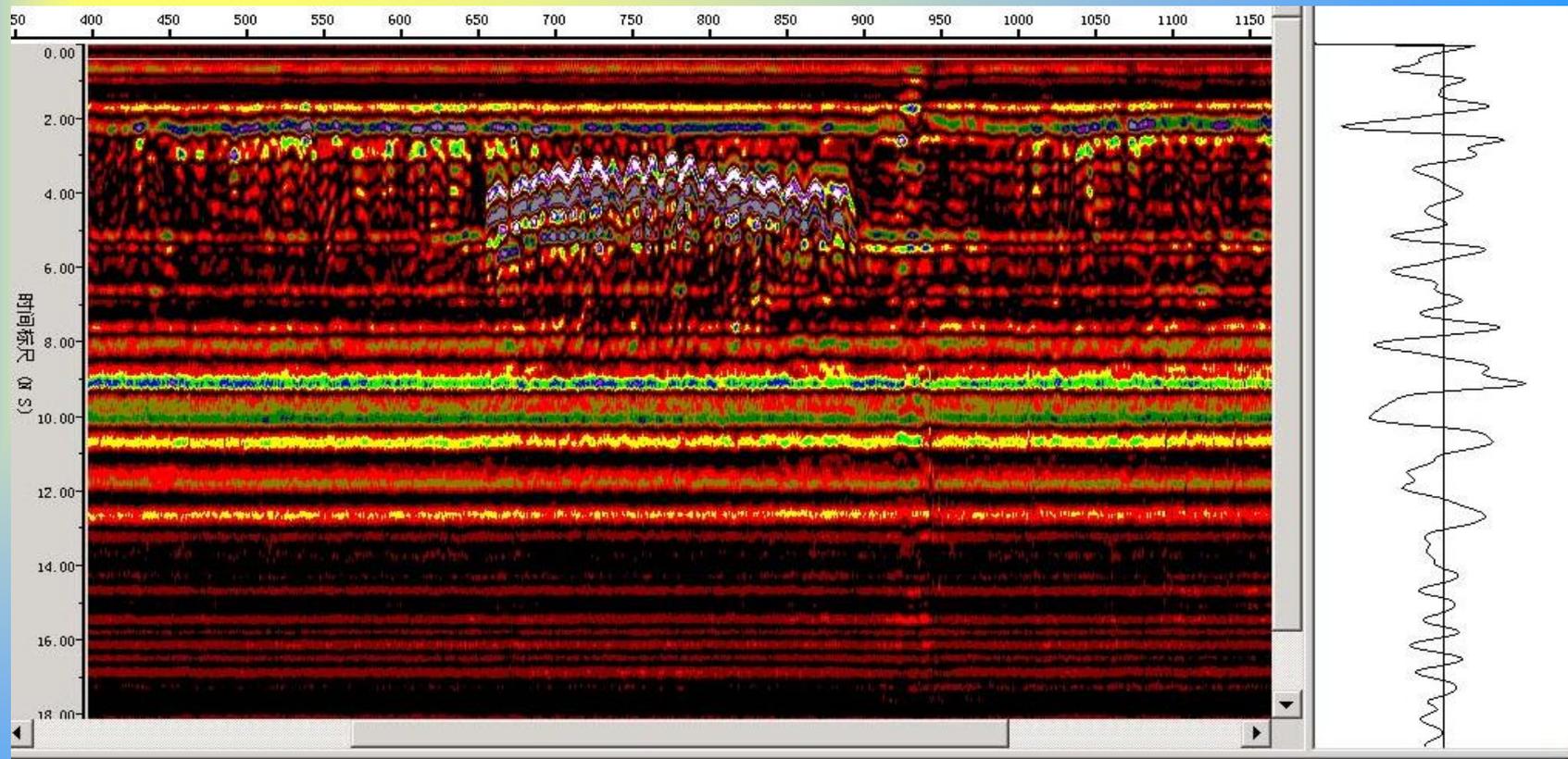


土洞群的波形堆积图象



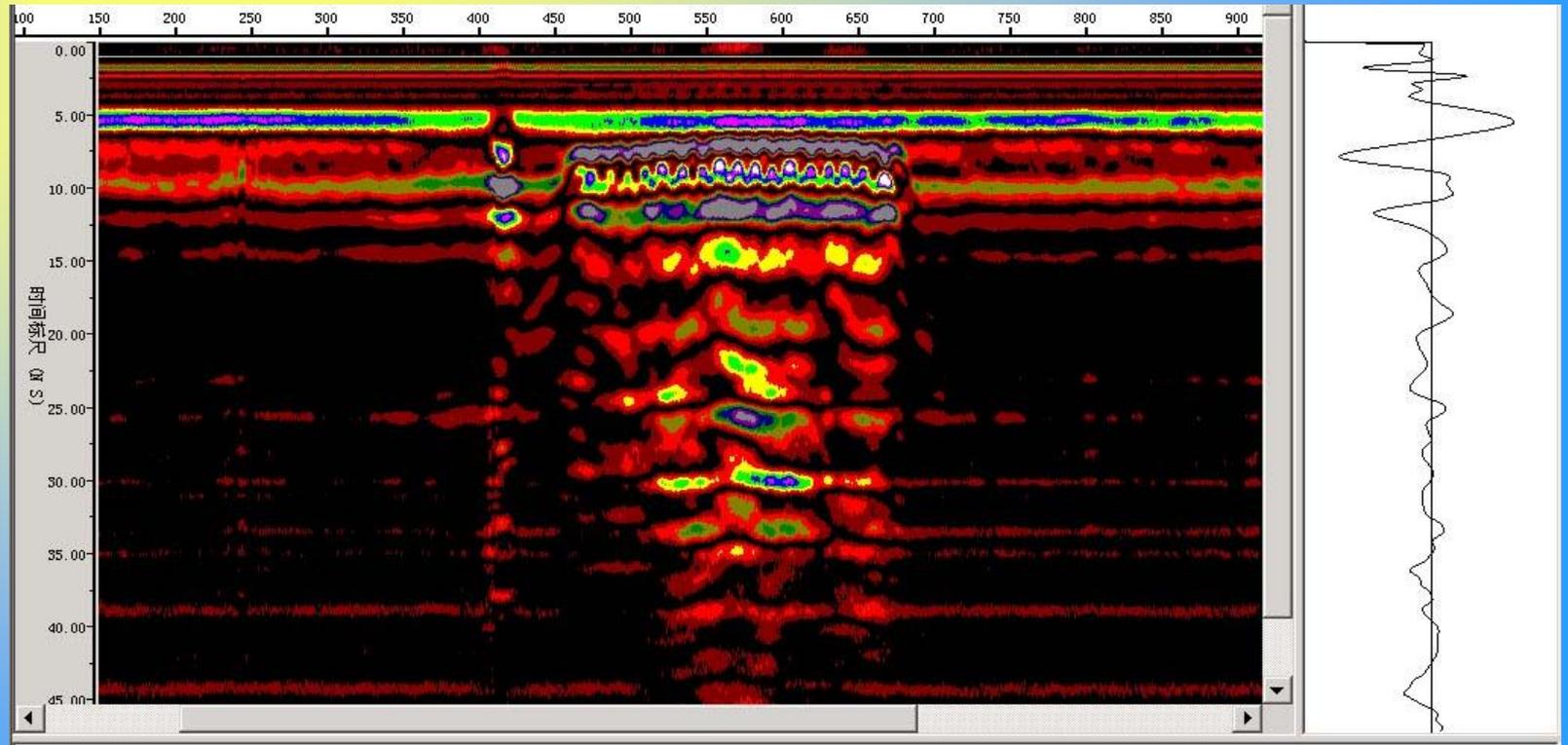
地下空洞探地雷达检测图象

廊道下钢筋检测



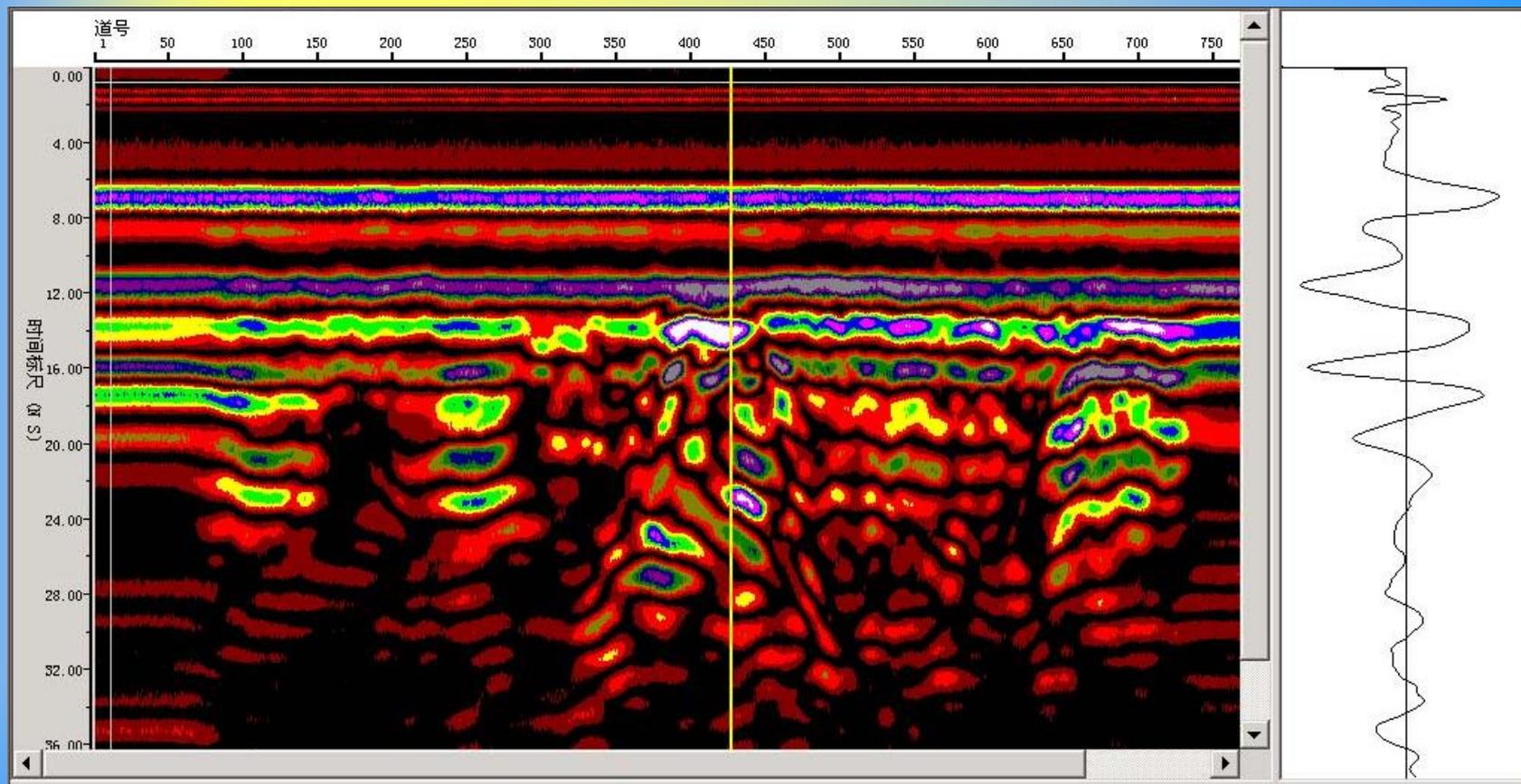
说明：电磁波在地下的传播过程中遇到钢筋等异常，其强度和相位将有明显变化，典型显示为双曲线（2003年测于长江三峡）。

廊道下钢筋及过人通道检测



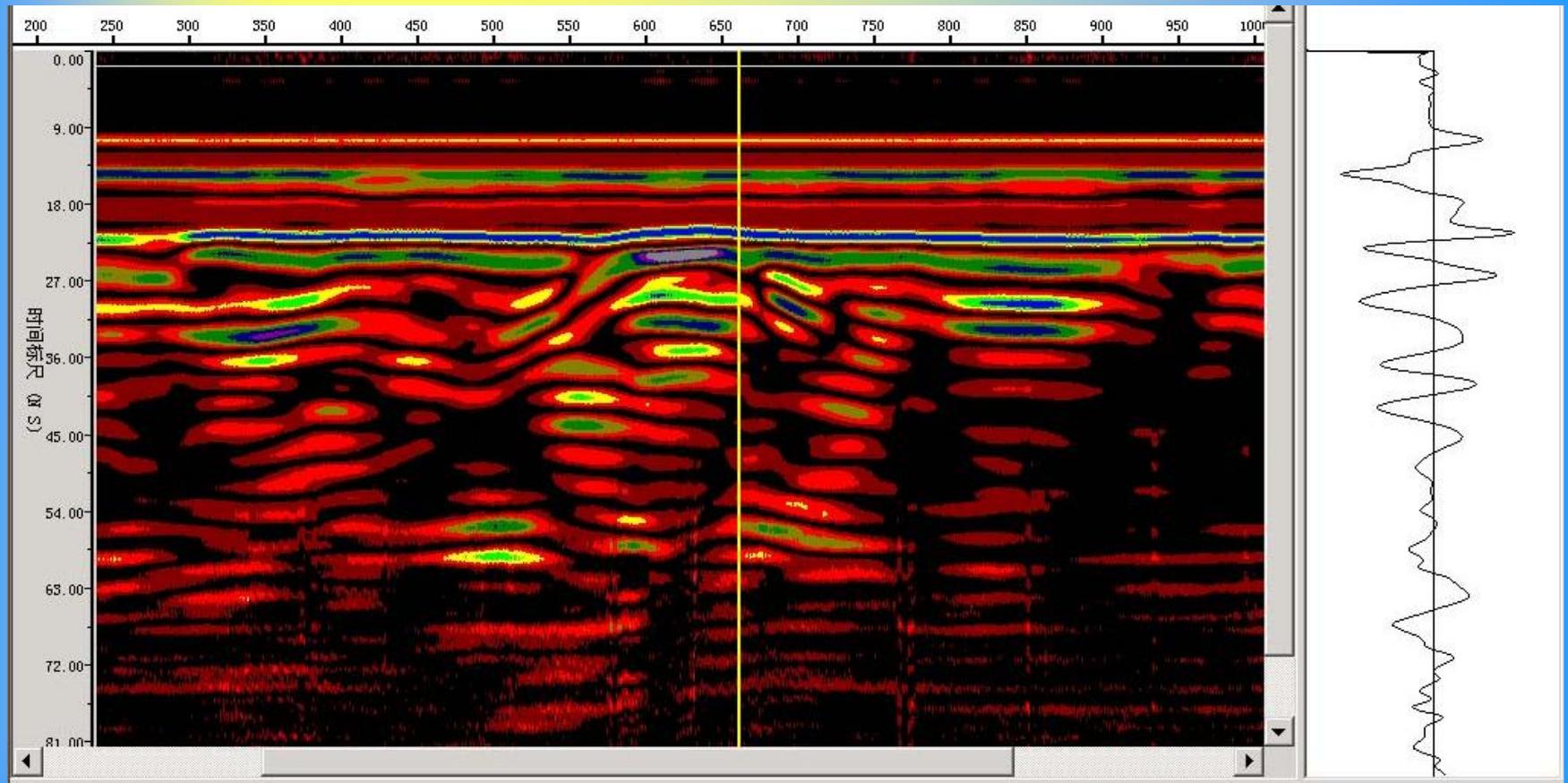
说明：电磁波在地下的传播过程中遇到不同介质层，其强度和相位将有明显变化，典型显示为双曲线（2003年测于长江三峡）。

长江三峡库区里的混凝土污水管道 (500M)



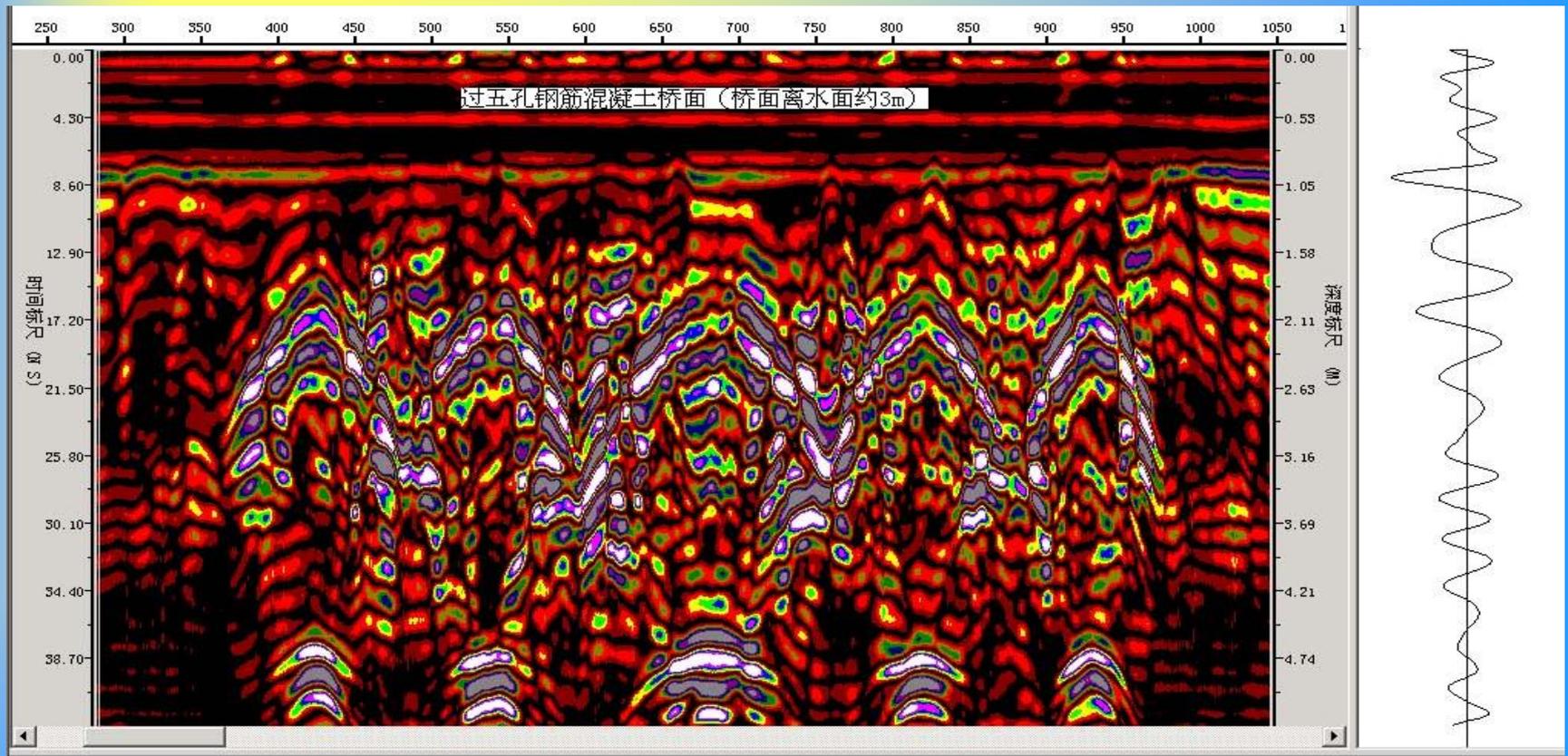
说明：对应埋深30cm, 直径为50cm的混凝土管道处出现明显异常

长江三峡库区里的混凝土污水管道 (300M)



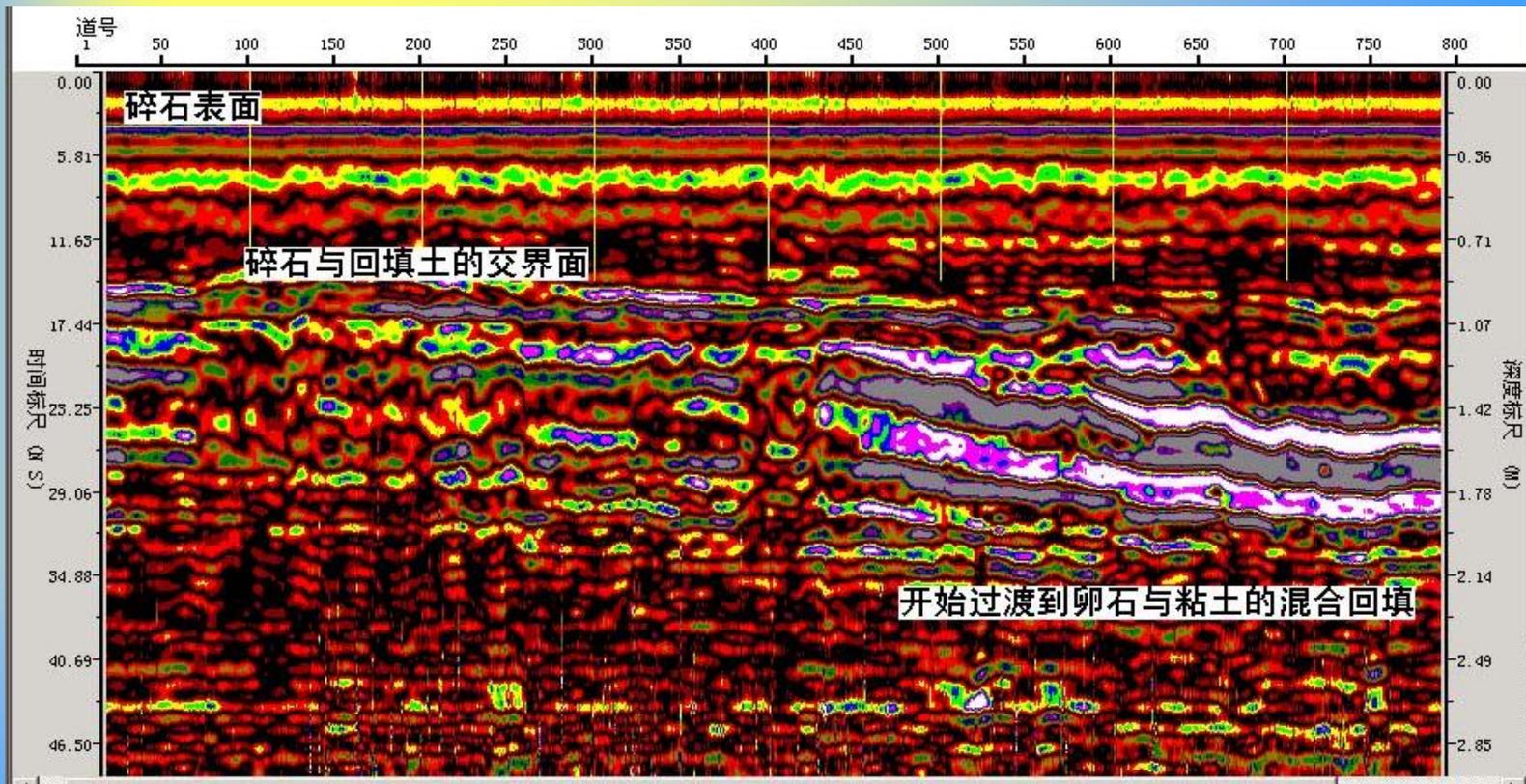
说明：埋深30cm, 直径为50cm的混凝土管道呈现典型双曲线反映

萧山观潮城五孔小桥探测图象



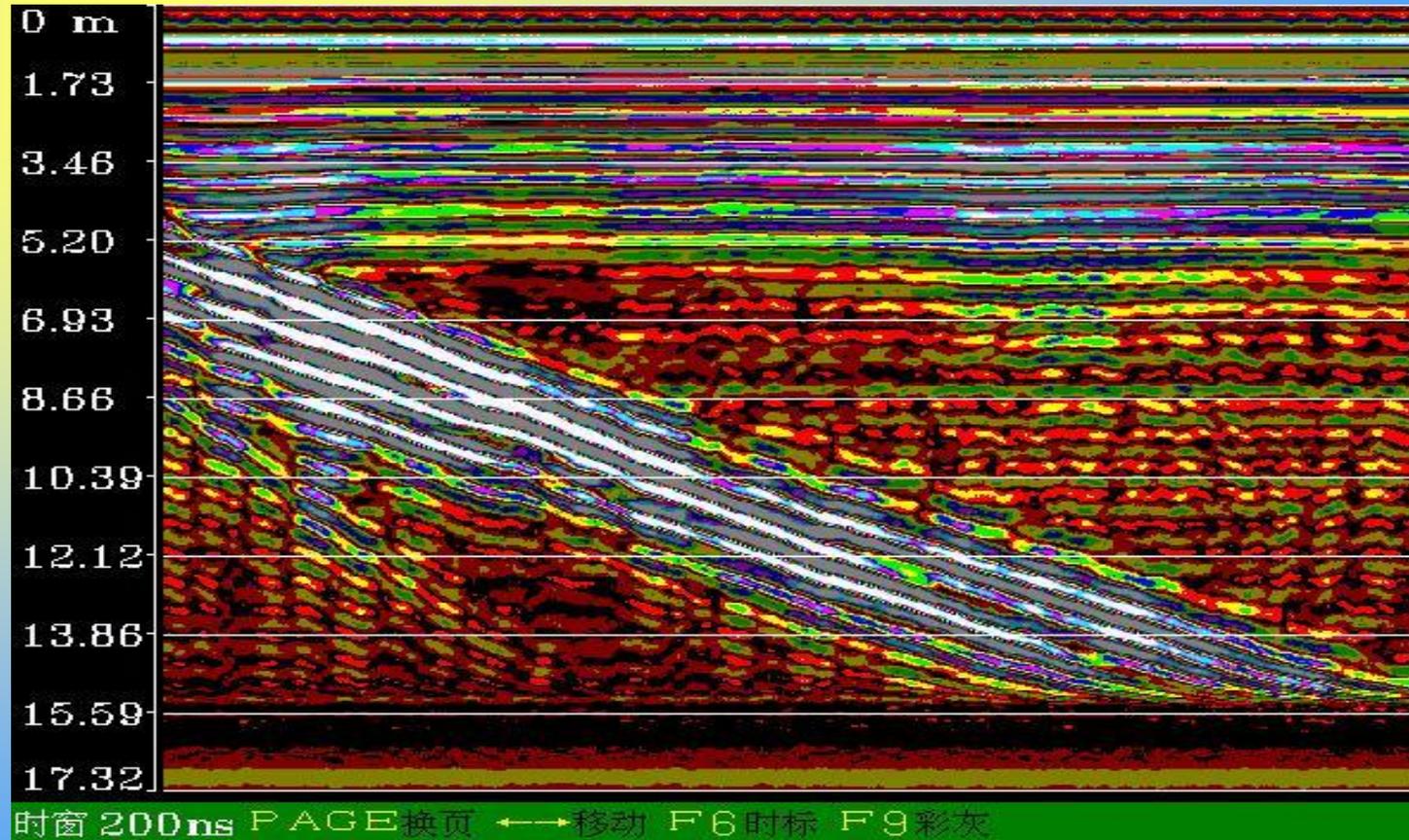
说明：天线拖过桥面时，来自桥孔和水面的反射信号较强，在剖面中显示为典型的双曲线（2003年用500M天线测于萧山）。

北疆铁路SKS段路基检测剖面



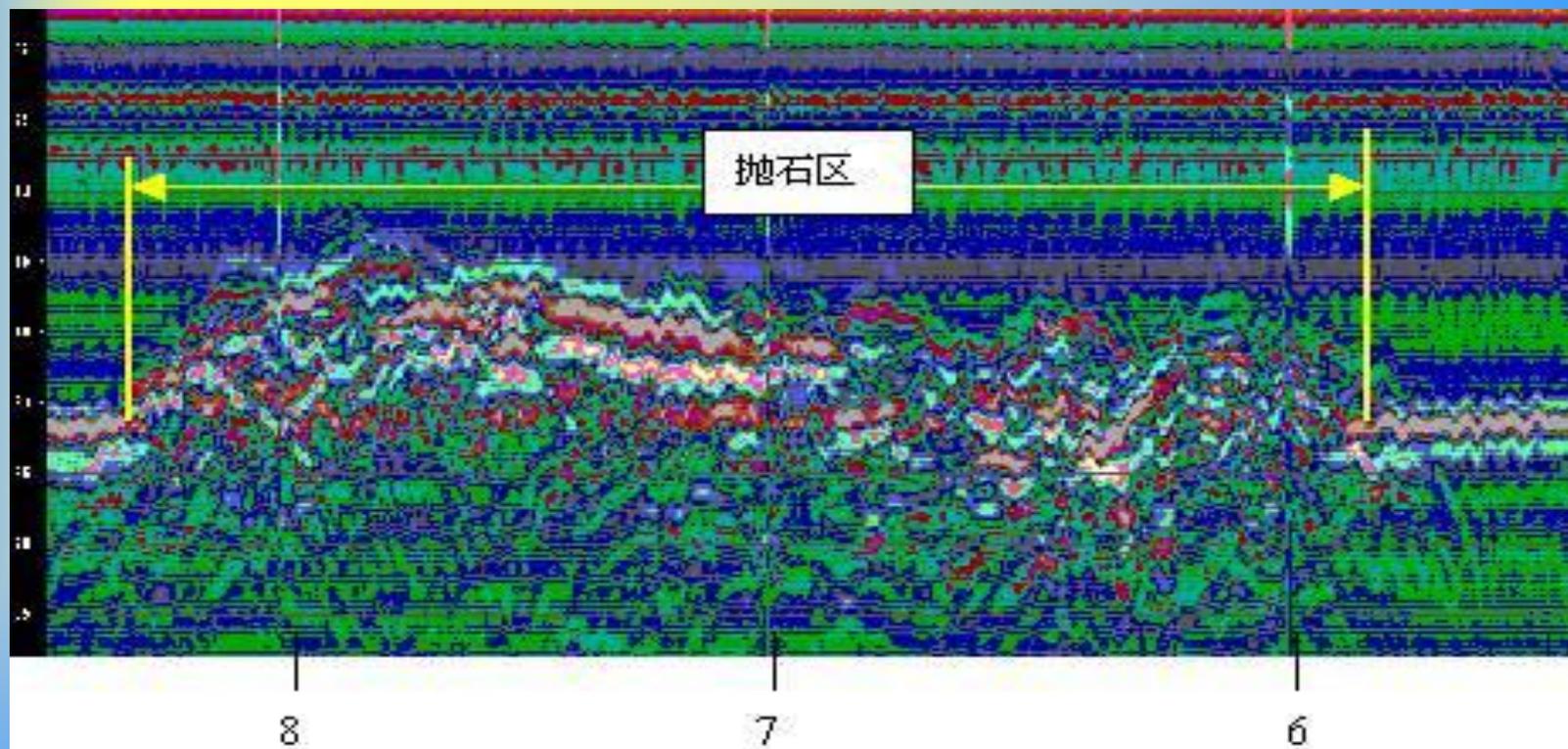
说明：冬冻夏溶的交替变化导致铁路路基发生不均匀沉降，严重影响行车安全。GPR可给出道渣厚度分布，进而确定路基沉降情况，为路基治理提供第一手资料。

冰下湖床的检测图象



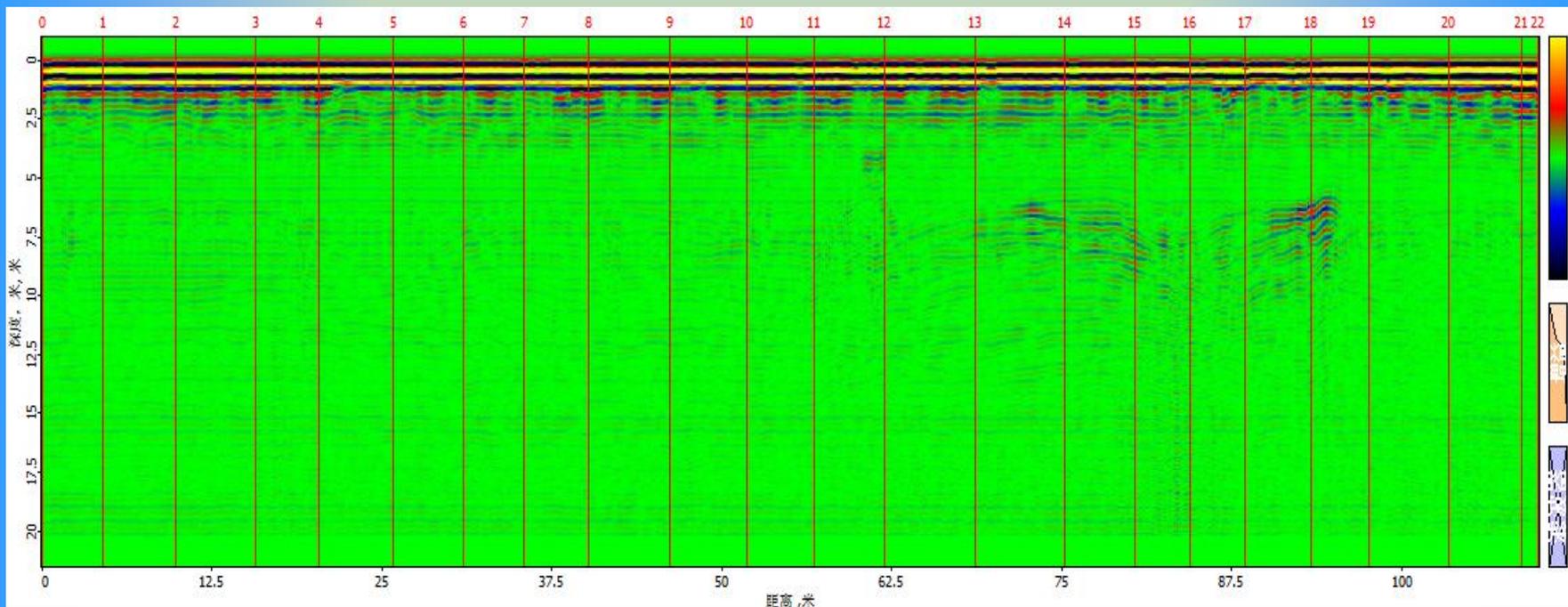
说明：水的介电常数为81，与湖床的性质差异较大，电磁波的强度和相位将有明显变化，沿界面产生明显异常

水库大坝下堆石探测图象

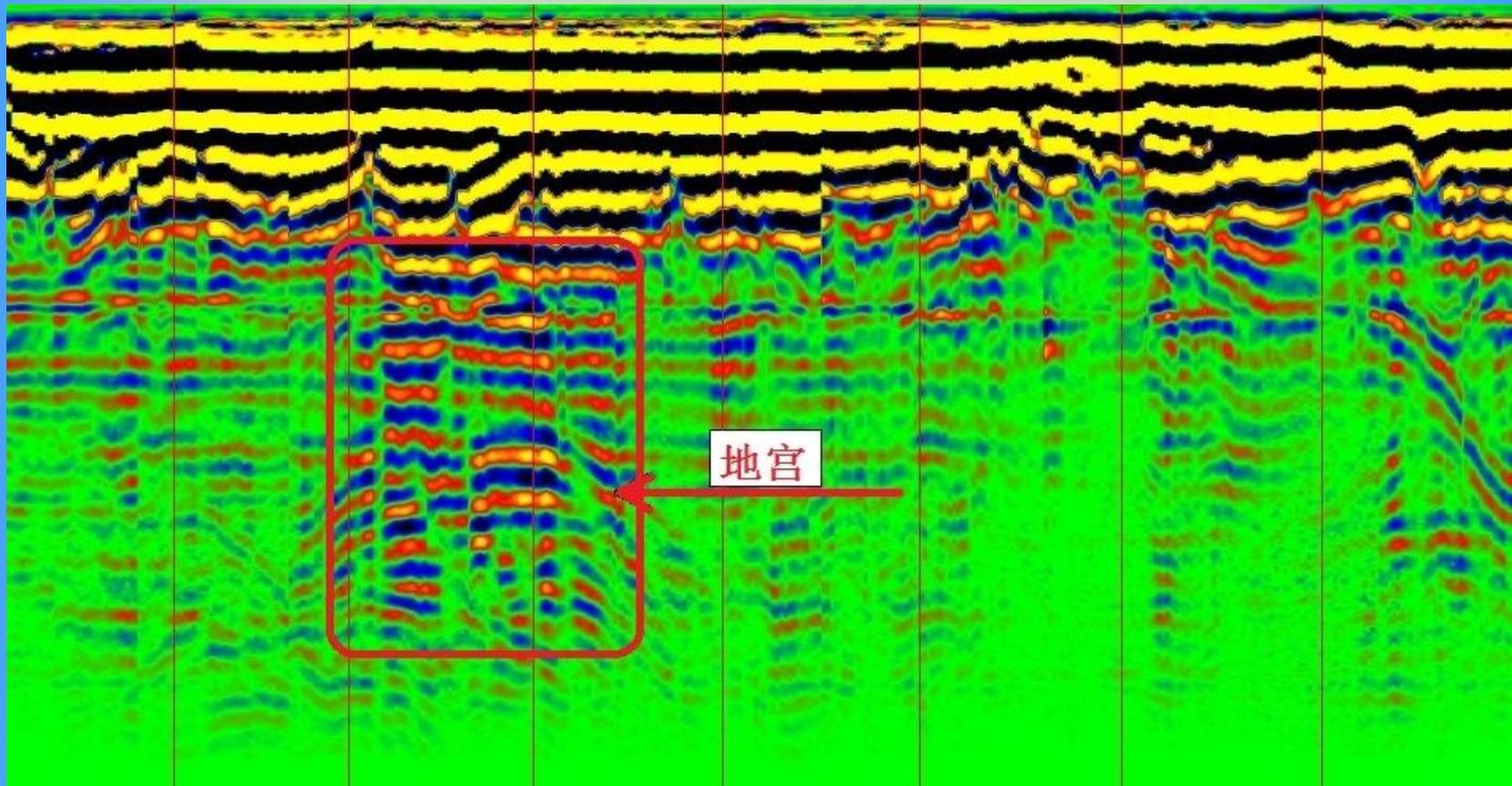


说明：大坝边的抛石起到保护大堤安全的作用，GPR可以随时监测抛石的分布，为随时补充石方提供提供第一手资料。

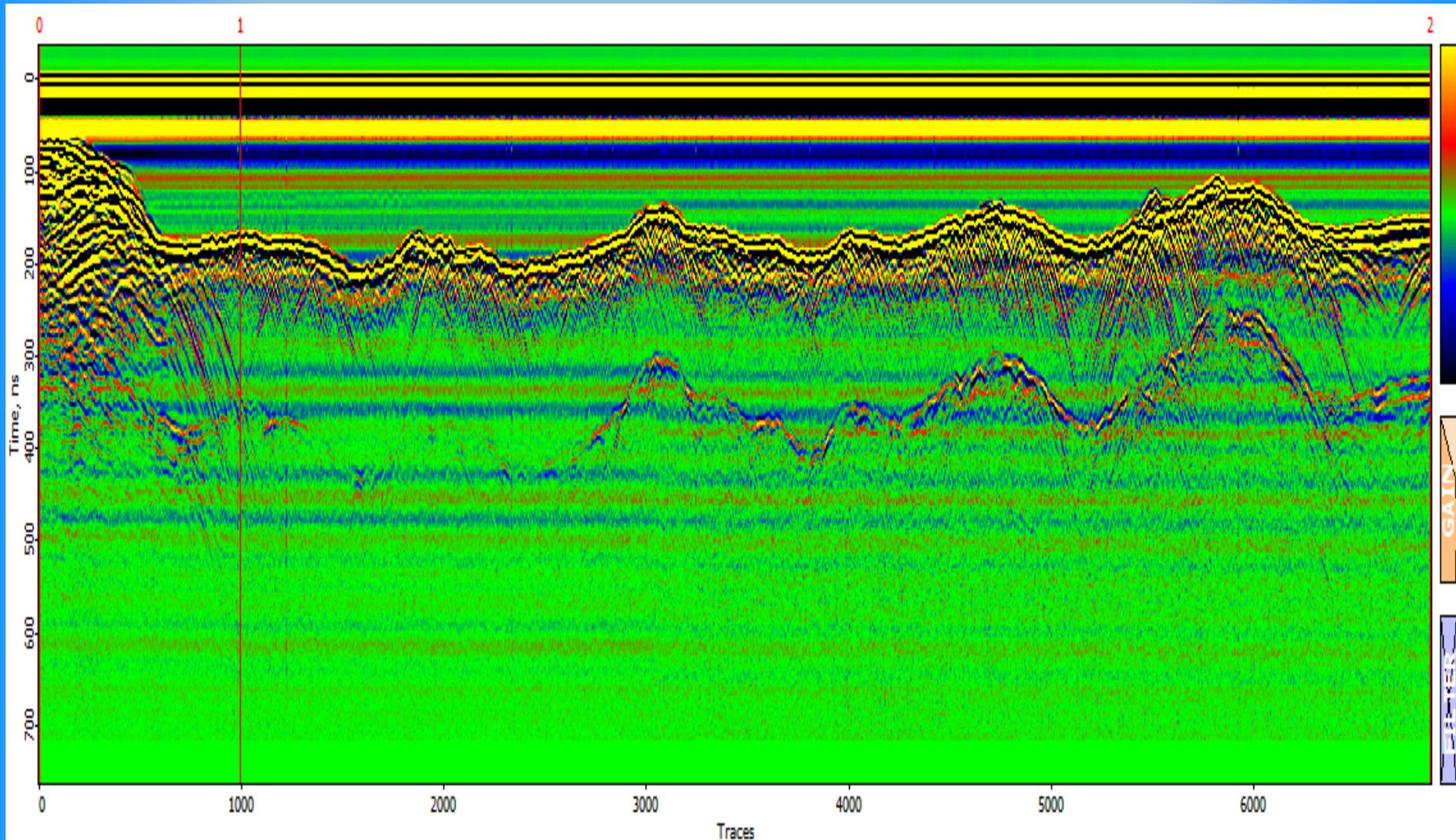
北京宛平古城墙检测



古墓探测墙检测



松花江丰满水电站江面剖面



北京水木坤成科学仪器有限公司

谢谢大家！