

国内探地雷达的应用与发展

于景兰

中国电波传播研究所·青岛·266071

摘 要 国内外正兴起探地雷达研制和应用研究热潮。本文首先给出中国电波传播研究所(CRIRP)生产的 LTD 系列探地雷达的技术特征和几个应用实例,在加以分析基础上,就探地雷达技术的应用前景作一展望。

关键词 探地雷达 无损检测 探测深度 分辨率 前景展望

Application and Prospect of the Internal GPR

Yu Jinglan

China Research Institute of Radiowave Propagation, QingDao, 266071

Abstract: The development and application of GPR is being pay more attention home and abroad in near several years. The technology speciality of LTD-GPR from CRIRP is first compared to other GPRs abroad. On the basic of application analysis of some example from LTD-GPR, then the prospect of the technology and application of GPRs is stated in this paper.

Key words: Ground Penetrating Radar / non-destructive detecting / penetrating depth / resolving power / application prospect

0 前言

随着世界经济建设和材料科学的发展,对地下非金属类目标探测技术的需求变得愈来愈迫切,六十年代末期得到发展的时域电磁场理论和相关的电子技术,进一步推动了毫微秒脉冲地下目标探测设备——探地雷达(GPR)的研制和应用。现在,国内外兴起了利用探地雷达进行地下目标无损探测的研究和应用热潮,探地雷达在城建、交通、地质、考古、国防等部门中扮演着越来越重要的角色。

在军方及地质与勘探部门的持续支持下,中国电波传播研究所在地下目标高分辨率探测领域,已开展十余年的研究工作,目前已经研制成功 LTD 系列多种型号的探地雷达产品,其中全数字化 LTD-10 一体化探地雷达具备携带方便、功能强、性能稳定等特点,既可以用于公路、隧道面层厚度检测,又可以用于地下较深层目标的探测,已广泛应用于军事和民用各领域。

但随着应用范围的不断拓宽,现场对尚处于成长期的探地雷达提出越来越高的技术要求,其中探测深度和分辨率的矛盾显得越来越明显,作者在此抛砖引玉,希望更多的科研院所、学校和现场应用部门加入到无损探测技术研究中来,通力合作,尽快使电磁波传播理论和探地雷达应用技术有大的突破。

[收稿日期]2003-08-18; [责任编辑]曲丽莉; [作者简介]于景兰(1968 年-),男,1995 年毕业于吉林大学,获硕士学位,高级工程师,现主要从事探地雷达数据处理和分析工作。Email: yujl@chinagpr.com

1 LTD 探地雷达

1.1 工作原理

LTD 探地雷达工作时,在雷达主机控制下,脉冲源产生周期性的毫微秒信号,并直接馈给发射天线,经由发射天线耦合到地下的信号在传播路径上遇到非均匀体(面)时,产生反射信号(图 1)。位于地面上的接收天线在接收到地下回波后,直接传输到接收机,信号在接收机经过整形和放大等处理后,经电缆传输到雷达主机,经处理后传输到微机。在微机中对信号依照幅度大小进行编码,并以伪彩色电平图/灰色电平图或波形堆积图的方式显示出来,经事后处理,可用来判断地下目标的深度、大小和方位等特性参数(图 2)。

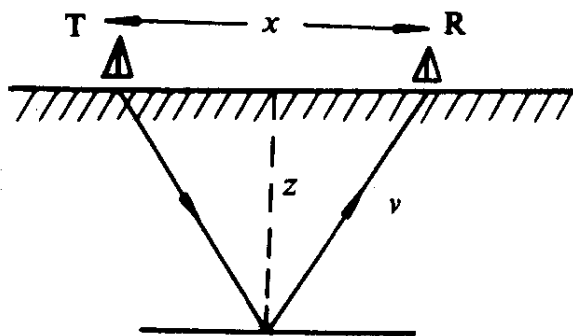


图 1 电磁波反射示意图

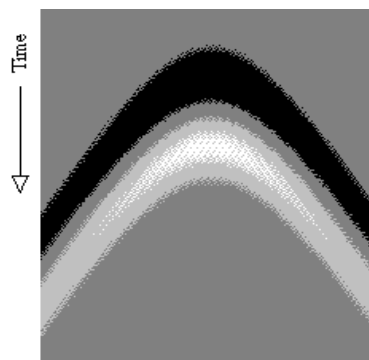


图 2 地下点目标二维成像结果

1.2 系统组成

LTD-10 探地雷达系统主要由 LTD-10 一体化雷达主机、天线、综合控制电缆、测距轮及其它相关配件和随机附送软件(包括实时采集和后处理软件)组成(图 3 是 LTD-10 车载探地雷达示意图)。

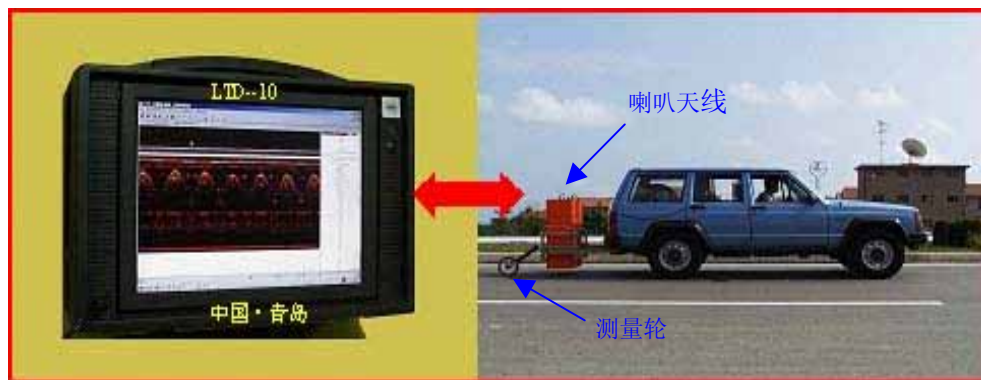


图 3 LTD-10 型公路检测仪的示意图

1.3 LTD 探地雷达与国外产品的技术性能对比

与国外部分品牌主机设计不同, LTD 探地雷达采用工控机和雷达主机一体化设计,与随机附送软件(包括实时采集软件 and 事后处理软件,两者都是全中文界面)配合,利用键盘或鼠标就可完成数据采集和后处理工作。其中,实时采集软件为用户提供分别在 DOS 和 Windows2000 下开发的两个版本,可以完成参数调试、数据采集、回放和快速输出等功能。相对 DOS 版本, Windows 版本界面直观,操作方便,时窗、信号位置等参数可由计算机自

动设置，同时可调用机内存储参数文件完成参数调试工作。机内附送的事后处理软件在 Windows2000 系统下开发，具备道（剖面）编辑、数据处理（方法包括背景消除、滤波去噪、反褶积、希尔伯特变换和奇异性分析等）、层位追踪、异常标定、工程评价和回放输出打印等功能。

在表 1 中列出了中国电波传播研究所（CRIRP）青岛分所的 LTD-10、美国地球物理探测设备公司（GSSI）的 SIR2000 和加拿大探头及软件公司（SSI）的 Pulse EKK01000 探地雷达部分性能参数的对比。可以看出，同是采用无载频脉冲雷达体制的 3 种探地雷达具有很多相似之处，国外品牌值得学习的是成熟的制造和营销管理模式，国内品牌应该充分发挥国内研制、国内销售、价格低、服务周到快捷的优势，弥补产品外观加工工艺等方面的不足。

表 1 国内外部分探地雷达产品技术性能对比表

技术参数	LTD-10	SIR2000	Pulse EKK01000
主机结构	工控机和雷达主机一体化设计, 利用键盘或鼠标可完成数据采集和后处理工作	一体化设计 专为数据采集设计	采集控制 和笔记本电脑 分体设计
发射脉冲重复频率(kHz)	64	64	32
探测时间窗(ns)	1—5000	0—8000	1—32767
采样率(样点/扫描)	128, 256..., 2048	128, 256..., 8192	不详
扫描速率(扫描/秒)	8—128	1—150	不详
波形叠加次数	1—4096	1—2048	1—2048
脉冲源最大输出幅度	1000(V)	1000(V)	1000(V)
A/D	12 / 16 位	16 位	16 位
可编程增益(dB)	-10~+70	-20~+80	不详
显示方式	波形堆积或伪彩色图	波形堆积或伪彩色图	波形堆积或伪彩色图
叠加去除随机干扰	是	是	是
叠加去除背景干扰	是	是	是
目标三维层析成像	是	是	是
天线主频范围(MHz)	25~1000	16~2500	110~1200
供电电源	12VDC/220VAC	10.8VDC internal	12VDC
工作温度(°C)	-10~+50	-10~+40	-50~+50
测量方式	连续、点测、控制触发	连续、点测、测量轮	连续、点测、控制触发
实时采集软件	图形界面、参数智能调节	利用功能按钮实现	图形界面、参数智能调节
后处理软件	回放处理分析、工程评价	回放、处理分析、输出	回放、处理分析、输出

注：表中信息来自期刊或网络，如有不符或遗漏，希望得到各位专家指正(0532-5889546)。

2 应用实例

2.1 公路施工质量检测

与对空雷达相比，探地雷达面对地下复杂多变的强衰减介质，其探测数据的处理和解释要困难得多，因此，探地雷达最容易发挥其快速、无损、精度高等技术特长的领域，作者认为首推公路施工质量检测。公路路面相对平整，地下介质分布相对均匀，如果探地雷

达生产商和现场应用部门大力合作，用探地雷达检测方法取代常规的钻孔取芯法，必将大大提高公路建设和维护水平。

2.1.1 公路面层厚度检测实例

图 3 所示中国电波传播研究所生产的车载路面检测系统由工程车、一体化主机、空气耦合天线及其它配件组成，水平探测速度可达到 30~60km/h，各项指标已达到国外同类产品水平，可代替传统的钻孔取芯法，快速、准确、无损的完成公路面层厚度的检测。

图 4 是河南路通公司利用图 3 车载系统对许漯高速公路的面层厚度进行检测的实例。根据施工设计，从上而下依次为沥青面层、水泥稳定碎石、石灰稳定土，层内介质分布均匀，利用探地雷达检测时，反射系数较小，而层间交界面介质发生较大变化，电磁波在此处发生强反射，籍此在探地雷达剖面上可清晰分辨分界面。

试验时，首先根据标志点芯样求得电磁波在每一层中的传播速度，进而计算整个连续测线上的各层厚度，最后将计算结果与其它检验芯样对比。经比较，绝对误差均小于 8mm，相对误差都小于 5%，完全满足公路施工质量检测规范要求。

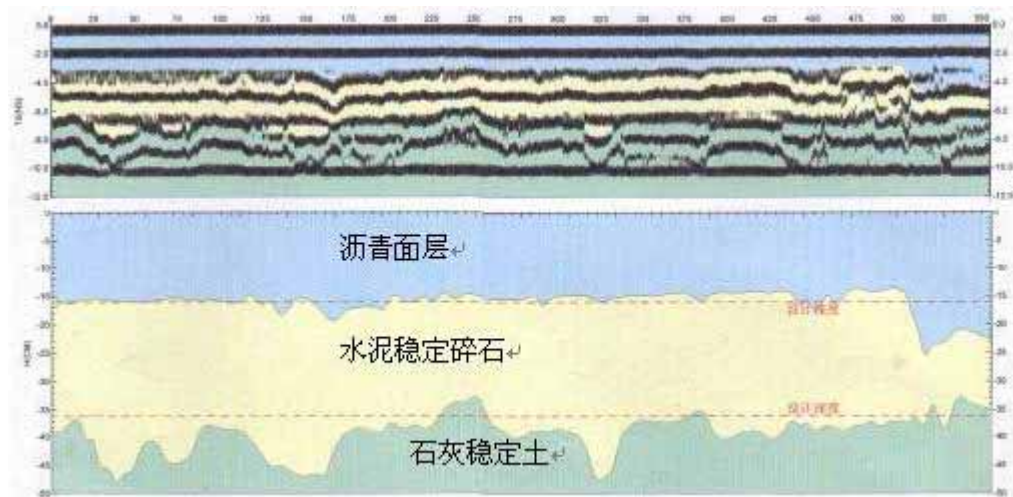


图 4 许漯高速公路 k98-k99 段路面基层厚度检测效果对比
(上图为雷达图像，下图为由此得到的介质分布图)

2.1.2 公路路基脱空检测实例

图 5 是南京物研科技有限公司利用 LTD-10 雷达，配置 500MHz 屏蔽天线，在合安高速公路上进行路基检测的实例。本次检测的目的层是水泥稳定层与稳定土之间的界面，主要是检查软土地基段的桥头搭板下部是否存在局部脱空现象。

K16+620 小桥的事后处理剖面中显示，搭板下反射强度明显大于相临正常路面结构下的反射强度，并且向着桥身的方向反射强度逐渐增大，这时如果伴

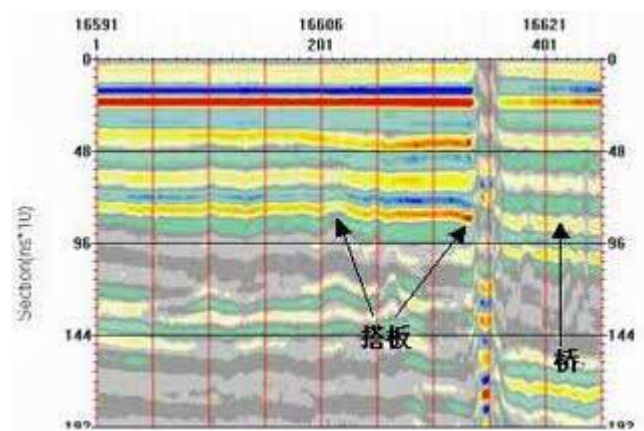


图 5 合安高速公路 k16 段基层脱空检测剖面图

有波形特征变化，并且能够排除底基层料源或含水量的变化因素，则这种情况可能与搭板下脱空有关。

2.2 在城建工程中的应用

2.2.1 地下管线的探测

随城建规模和复杂程度的增加，准确探明地下纵横交错的管线分布（管线仪对 PVC 管的探测效果不理想）变得十分必要和急迫。而探地雷达正可利用管线和埋藏环境的介电特性差异（金属管道将对入射电磁波产生强反射，而对于塑料管，由于管内存在的空气与周围土壤的介电特性也存在很大差异，在探测剖面上会出现典型的“双曲线”管道反映），确定管线的埋藏位置（见图 6）。

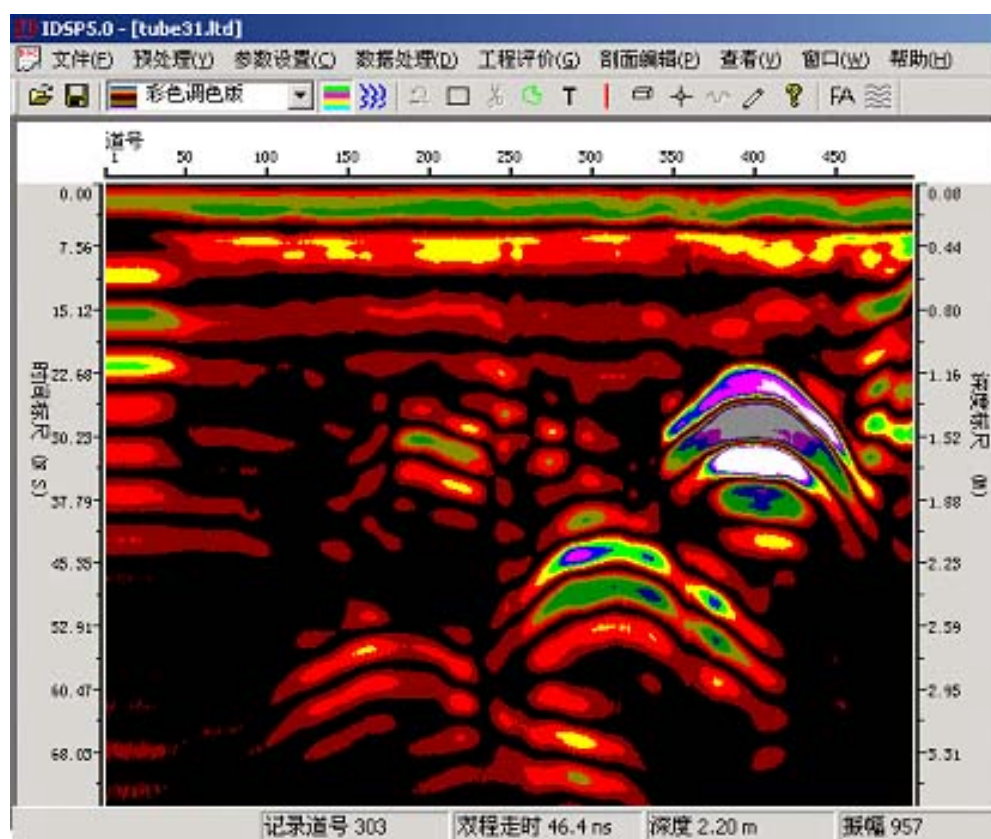


图 6 LTD-10 雷达探测地下管线的实例

2.2.2 地下溶洞或不良地基的探测

1997 年，山东临沂市的某厂区部分道路和厂房内路面出现裂纹和塌陷，怀疑地下分布有溶洞等地质不良体。国家地震局地球物理勘探中心（郑州）受托进行勘察，探测时采用国产 LTD 型探地雷达，配以 100MHz 天线。从图 7 的探地雷达图像上可以看到，5 米以上为地表层（相对介电常数设为 9），以下为灰岩。无反射或反射较小处对应无溶蚀的致密灰岩，强反射轴或典型的双曲线（地下 16 米处）指示存在溶蚀裂隙或溶洞。后对指示的空洞开挖验证深度为 18 米，并对其它指示溶洞施以钻孔灌浆处理，消除了因地面开裂或沉降可能导致厂房倒塌的隐患。

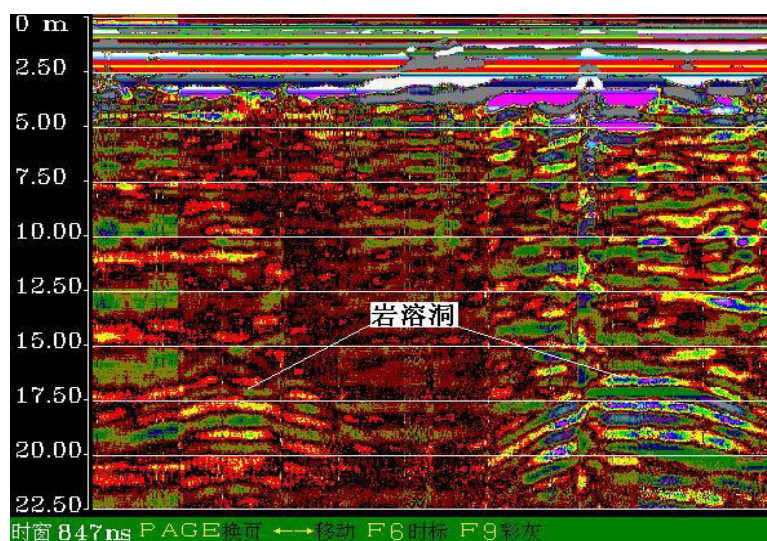


图7 LTD型雷达探测地下溶洞的实例

3 探地雷达的应用和发展前景

传统的地下目标探测（包括工程质量检测、地下隐患探测、地下目标查找等）方法，比如钻芯法、锥探法等，不仅具有破坏性，而且效率低、准确性差，市场的要求和相关技术的不断发展，使得众多无损探测方法得到快速发展，并逐渐成为行业检测规范的主角。无损探测方法主要集中在传导类电法（如常规电法、高密度电法等）和波动类方法（如瞬态瑞利波法、弹性波层析成像、瞬态电磁法及探地雷达等方法）上，除探地雷达外，其余的方法在现场都是采用点测，其分辨率和测量速度受到影响，而探地雷达可灵活选择连续或者点测方式进行工作，并且具有分辨率高、操作方便的优点，近几年得到如火如荼的发展。

探地雷达从20世纪初，随电子技术和数据处理技术的发展，其体积越来越小，从起初的肩扛手抬，到现在一个人就可以轻便的操作和检测（如LTD-10和SIR2000一体化雷达等）；其功能从探测冰层厚度（当时的工作信号频率较低）到现在的“全面开花”，在军事和众多民用部门都可见到它的影子；其技术指标也得到极大的提高，如利用高频天线进行公路面层厚度检测时，垂向分辨率可达到毫米级，利用低频天线探测深层目标时，探测深度可达几十米。

理论研究方面，目前仍相对地集中在信号处理上。为了识别图像或对图像进行地质解释，大量最新的数据处理方法，诸如分形、神经网络、小波分析等得以利用。通过人工判读和对地下介质的正演，正在开展专家系统技术的有关研究。与地震勘探工作相似，探地雷达探测体的正反演研究也正在进展之中，希望借助于GPR资料了解岩土的成分、压实度、含水率等结构性参数。

但不可否认，随现场检测指标要求的不断提高，探地雷达对付强衰减介质的本领、解决地下目标的复合反映及多解性的能力方面亟待提高，这也为探地雷达技术的发展指明了方向。一方面，探地雷达主机和天线的结构要有突破性变革，以提高穿透力和适应成像探测的要求（长江水利委员会和中国电波传播研究所正合作研制的相控阵雷达，就是一个良好的尝试）；另一方面，脉冲源技术、高效收发机和低噪声取样技术等也要进一步发展，以提高探测分辨率和探测效率；最后，作为探地雷达资料得到应用的一个重要环节，探地雷

达数据处理方法和理论应尽快从借鉴和学习中走出来，形成探地雷达自身的一整套探测原理、数据处理解释及应用的理论体系，最终实现建立探测快速准确、成果显示直观的“基于探地雷达技术的目标自动识别系统”的发展目标。

致谢

LTD 系列探地雷达在研制和发展过程中，自始至终得到军方、兄弟科研单位和众多用户的支持，在此一并表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- 1 李大心，探地雷达方法与应用，地质出版社，1994
- 2 范国新等，探地雷达原理、设计思想及其实现，电波科学学报，Vol. 7, No. 3, 1992
- 3 肖柏勋等，我国堤防隐患快速无损探测技术的现状与思考，工程地球物理学进展，武汉水利电力大学出版社，2000