

LTD-10探地雷达 在高速公路建设中的应用

中国电子科技集团第二十二研究所青岛分所

地址：青岛市青大一路 19 号 邮编：266071

电话：0532-5889546 传真：5895252

E-MAIL：tdldxmz@public.qd.sd.cn

一、引言

随着经济的飞速发展，各项基础设施建设也呈现出良好的发展势头。交通作为国民经济的命脉，其发展状况直接影响国民经济发展的速度，在整个交通运输体系中，公路又是基础中的基础。近几年来，每年国家投资成百上千亿用来修建公路，全国的高速公路迅猛发展，形势十分喜人。但同时也产生了一些新的问题，如现有落后的公路检测手段和高速发展的公路建设之间的矛盾，怎样保证又快又好地检测施工质量，如何提高公路养护管理的水平等，都是一些亟待解决和探讨的问题。

二、常规检测和维护方法的局限性

我们知道，在公路施工中，为确保工程质量，从夯实地基、碾压每层路基，到灌注水泥砼层路面或沥青路面，每道工序都需要严格检测。传统的方法是根据规程随机选点，钻孔取样、进行室内分析处理，从中获取厚度、深度、压实度和强度等工程参数。然而，这种常规方法存在一定的局限性：首先被测点是随机选择的，因而检测结果往往缺乏代表性。同时，由于检测点的密度稀，有些局部压实度达不到标准、厚度偏小、水泥混凝土或沥青内部存在的缺陷等不良区段极易漏检，给后续工程工作留下隐患。另外，在道路投入使用后的日常维护管理中，通常对路表面出现的破损、凹陷、裂缝、平整等问题可以及时发现，但对道路内部存在的隐性灾害，如路面下的空洞、积水、脱空、基础疏松等却无有效的检测手段，难以做到防患于未然，随着冬冰夏融，热胀冷缩以及日积月累的冲压，往往容易导致重大交通事故的发生，使人民生命财产造成巨大的损失。因此，如果能够研究开发出一种无损、快速、直观、能显示道路内部状态的检测设备和技术手段，必将使道路建设质量和养护管理提高到前所未有的水平。

三、LTD-10 车载公路检测仪

LTD-10 车载公路检测仪是中国电子科技集团公司第 22 研究所针对当前国内道路建设中质量监测和养护管理的现状，应用先进的冲击雷达技术，历经十余年，先后投资上千万元研制生产出的一种道路专用探地雷达。利用这种探测设备可以象现代化医院中用的“B 超”、“CT”一样，给公路做一次透视诊断，方便地检测公路的综合质量状况（包括施工质量、使用受损和自然变迁等情况），及时发现

病灶，确保公路的建设质量，提高公路的建设和养护水平。

1、技术来源

众所周知，采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。然而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，瞬态无载波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。电子 22 所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（见图 1）。

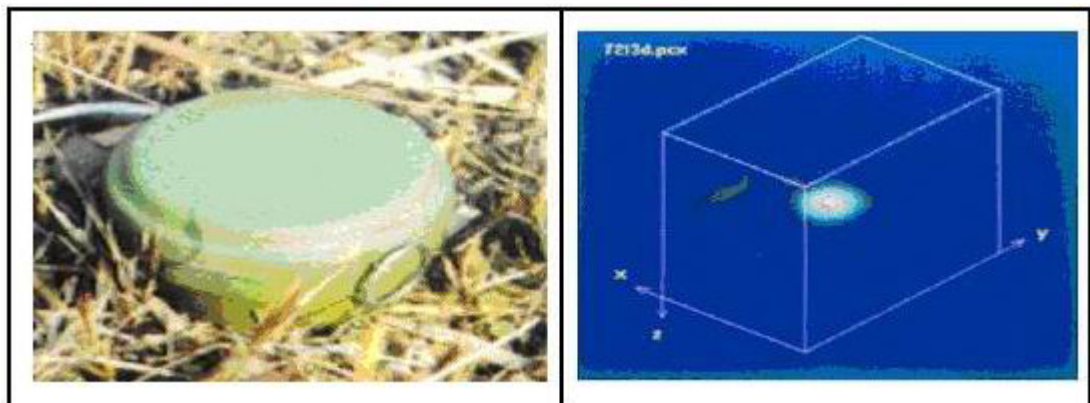


图 1 72 式塑料防步兵地雷（左）和雷达图像（右）

多年来，我所拥有的探地雷达技术基本上与国际先进水平保持同步发展，先后取得了与国外同类技术基本相当的研究成果。分别获得电子部科技进步三等奖，省科技进步一等奖，省优秀新产品一等奖等奖励，并获国防专利一项。另外，我所在超宽带理论分析和建模方面也取得了丰富的研究成果，在国内外学术刊物上已发表研究论文四十余篇。目前已经研制成功 LT-1、LT-2、LTD-3、LTD-3R、LTD-10 等多种型号的探地雷达产品，新研制成功的全数字化产品 LTD-10 一体化探地雷达既可以用于对公路等浅层道面厚度进行探测，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领域。

2、基本原理

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介质的非均匀体（面）时，产生反射信号。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）。

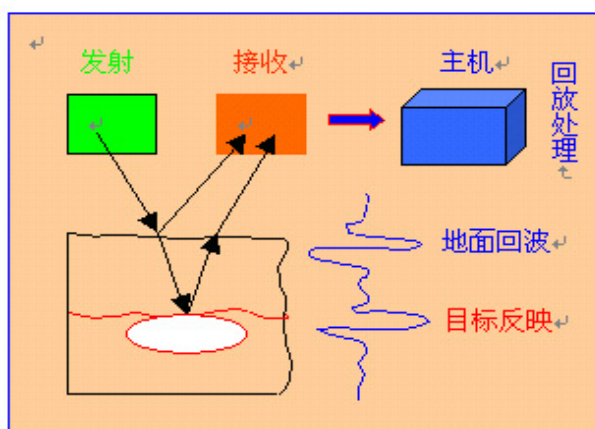


图 2 探地雷达工作原理示意图

3、系统组成

LTD-10 车载公路检测仪主要由 LTD-10 一体化雷达主机、喇叭形屏蔽收发天线、测距轮组成（如图 3）。

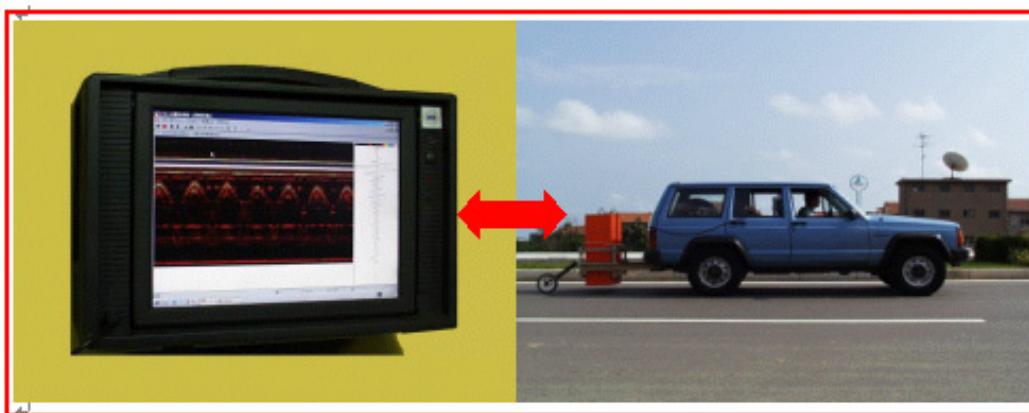


图 3 LTD-10 型路面检测车载系统

（车载系统探测速度可达到 60km/h，各项指标已达到或超过国外同类产品，可广泛应用于军事、地质、城建等部门）

这套雷达系统的特点是：

(1) 主机一体化：发射源、接收机、信号处理、显示器都集中在一个主机内，结构简单，易于组装、使用和维护；

(2) 利用人们熟知的计算机控制数据的采集、完成数据的回放和处理，操作简便，只需简单的学习，即可掌握系统启动、参数调试、数据采集和处理的整个过程；

(3) 喇叭形屏蔽收发天线：本系统使用 1000MHz 高频收发双置式天线，它发射的电磁波可覆盖较宽的路面范围，但能量都集中在天线中心下方的地下目标上，能够保证探测信息高保真、无遗漏地显示在屏幕上，避免了收发单置天线所固有的探测盲区；另外，天线是空气耦合型，不与地面直接接触，探测速度每小时可达到 60-80 公里，大大提高探测效率；

(4) 便于维护与保养

本系统采用了结构化设计，对于使用不当或其它原因造成的质量问题，简单地更换接插件即可保证雷达的正常工作；
可扩充配置。

(5) 通过选择相应的发射源和收发天线，再配上相应的处理软件，就可以在中深层探测范围，如地下管线、地基空洞、钢筋分布、堤坝密实程度等方面扩大应用。

4、探地雷达检测法的特点

(1) 无损、连续探测，不破坏原有路面，避免了后期路面修补工作，可节约大量的时间和费用；

(2) 操作简便，探测结果显示直观

使用者经过 2—3 天培训就能掌握，探测时，主机显示器实时成像，操作人员可直接从屏幕上判读探测结果，现场也可打印成图；

(3) 测量精度高，测试速度快

无载波电磁脉冲技术与高频聚能天线的组合使探地工作完全避开了人为因素，它能有效地探测出道路的分层结构和内部变化，在车载工作方式下，测试速度大大提高，当车速达 80Km/h 时，系统仍能正常工作；

(4) 收、发天线离地面的探测高度可以针对不同的埋地目标进行调整，以达到

最佳的探测能力和探测分辨率：同时还可以调节收发天线之间的距离寻找系统工作的最好效果；

(5) 测点密度不受限制，便于点测和普查

工作方式的灵活使得用户可以连续普查某一段路面的质量，也可随时对道路的异常区域进行重点探测和分析。

四、探地雷达在道路建设与管理中的应用

在公路质量检测与养护管理中，雷达探测技术对于公路施工质量检测的科学化，路况普查和公路养护的制度化都有重要作用。LTD 型探地雷达以全中文菜单、便利的操作方式、清晰直观的图象显示和探测精度高等特点引起众多领域专家的浓厚兴趣，在军用和民用领域都显示出广阔的应用前景。车载式道路专用探地雷达，尤其适用于机场和公路这类浅层高分辨率探测领域。目前，国内的用户已遍及广东、重庆、江苏、安徽、湖北、河南、山东、天津、河北、黑龙江、内蒙等省、市，他们在实际检测应用中，均取得了较好的社会 and 经济效益。

1、探地雷达法进行公路检测的适用性

为了验证 LTD-10 探地雷达在高速公路建设中的作用，我所进行了大量室内和现场公路检测试验，证明公路路面探测仪能够真实反映公路施工情况，并且具备测量方便、速度快、提供资料翔实等特点，大大方便了监理人员对施工全过程进行科学、严格的质量监控。以下是河南省交通厅公路建设处、监理部以及华北石油五普物探科技实业公司等共同在郑州～许昌高速公路上，验证公路路面探测仪进行面层厚度检测适用性的实例，其具体过程如下：

首先用公路路面探测仪在该路段以 30～40km/h 速度进行检测，经数据处理得到相应的厚度曲线，在曲线上找出有典型意义的点（较厚与较薄的点），然后在该点位置上再次进行公路路面探测仪检测，并在路面上作出标记和编号。这次共选用了 6 个点，检测后立即进行厚度数据处理。其后由钻孔队对各标记点钻孔取芯，并将芯样编上与地面相同的号码，任取一个芯样给公路路面探测仪作为标定用，其余留作验证用。最后用芯样实测厚度对经标定参数处理的公路路面探测仪检测厚度数据进行验证，结果如表 1。

从验证结果来看，最大误差为 0.7mm，最小误差为 0.4mm，误差均在±0.8mm 范围内，这样的精度已达到项目预期的主要技术指标要求。

表2 公路路面探测仪检测与钻孔取芯实测厚度对比

编号	探测仪检测厚度	芯样实测厚度	误差
1	92.2	91.5	+0.7
2	105.8	106.3	-0.5
3	103.3	103.9	-0.6
4	105.1	105.5	-0.4
5	105.9	106.4	-0.5
6	供标定样点	102.0	

2、公路建设前期的应用

公路兴建前，它可用于对预定建设路段的地质基础进行勘察，确定地质结构，划分不良地质体(流砂体、暗河、暗塘、墓穴等)，路基下是否埋设了电缆和管线等，为道路设计提供地质基础的依据。

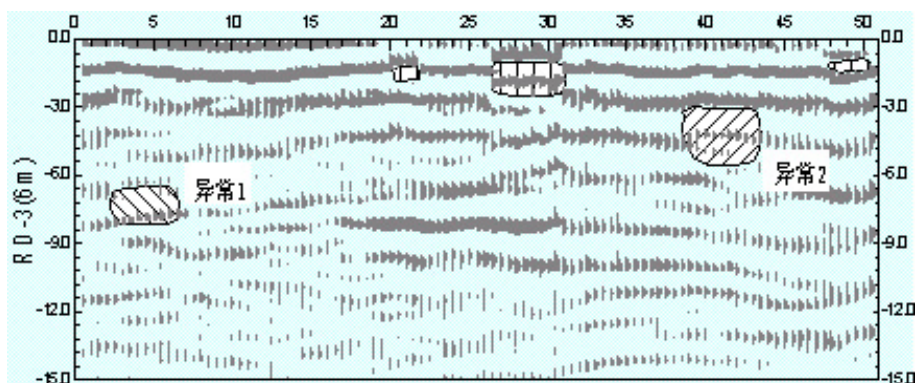


图4 洛三高速公路K9+350-K9+400段地下墓穴分布情况
(利用探地雷达可有效探测地下异常和地质不良体)

3、公路建设过程中的应用

目前，探地雷达技术已经可以精确测量路面面层厚度，效果良好。多次工程探测结果表明，其平均误差可以达到 $\leq \pm 5\text{mm}$ ；还可成像显示各层结构的均匀性，圈定质量不合格地段的范围，因此，使用道路探测雷达可以实时监控路面的施工质量，在施工各个阶段中，分阶段跟踪进行质量检测，从打地基到铺面层，铺一层快速检测一层，并将实时检测结果打印，现场分析，有问题及时发现和纠正；这样不但能保证施工质量，还大大节约了一旦返工所造成的费用损失。

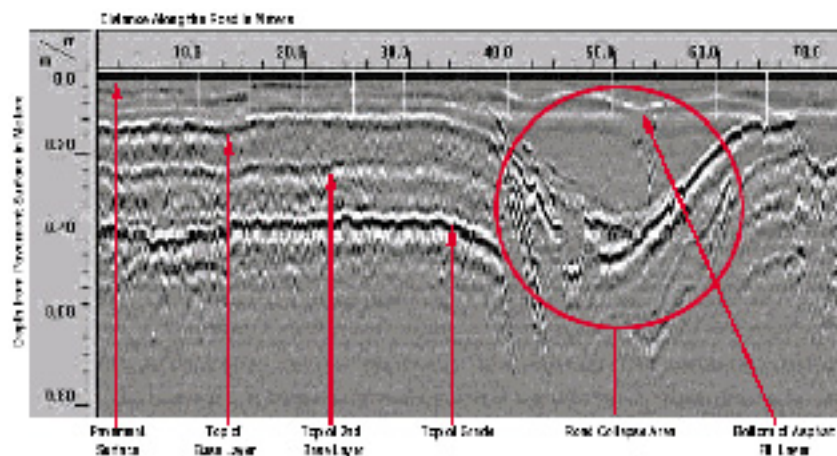


图5 某高速公路路面厚度及施工缺陷检测剖面

(从剖面图中可以清晰的看到沥青层与水稳层、水稳层与基层的分界线，修补后的沉降路面也

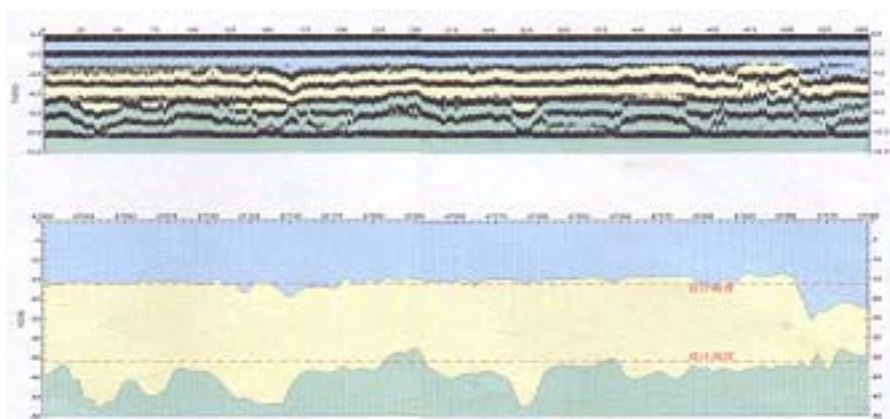


图6 许漯高速公路k98-k99段路面基层厚度检测效果对比图

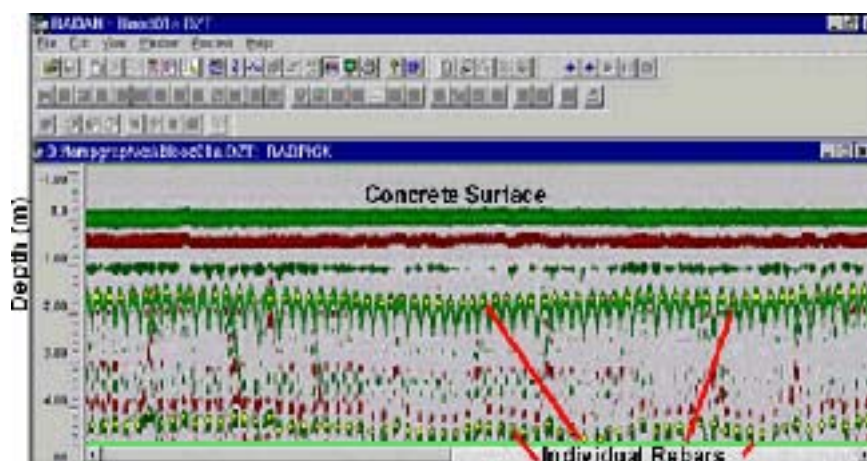


图 7 混凝土结构探测图

(配置高频天线，利用探地雷达可方便的探测混凝土中钢筋分布情况)

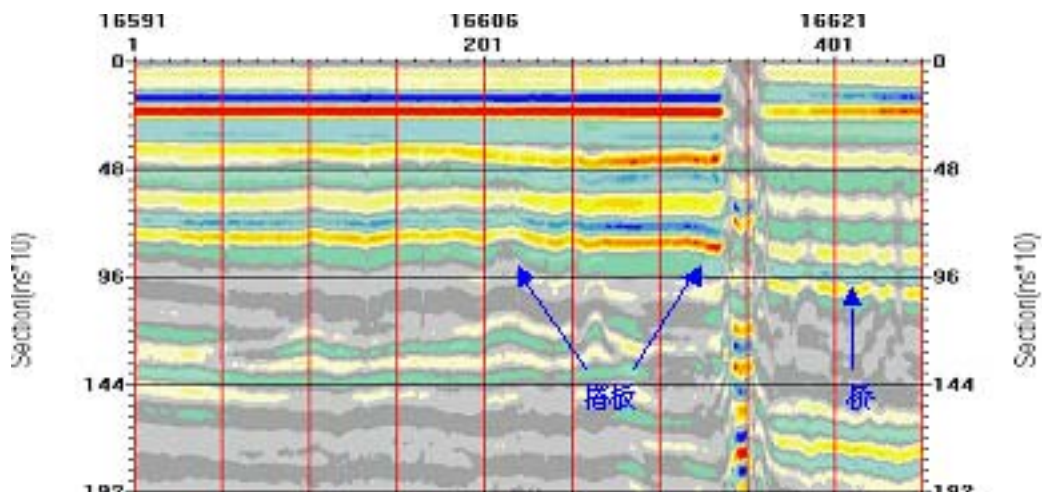


图 8 合安高速公路 k16 段基层脱空检测剖面图
(纵轴是双程走时, 0.1ns ; 横轴为桩号)

4、道路竣工验收阶段的应用

该雷达可配合传统方法和手段, 全面测试路面结构, 为整个工程的质量评估提供可靠依据。

用 LTD-10 车载公路检测仪对路面面层厚度进行检测, 检测密度可达到每米 2 个样点, 这样每公里的样点数可高达 2000 个, 对公路施工情况的评估报表可以每 500 米或每 100 米来进行, 这样对监理来说可以更精确地知道某一小段内路面厚度变化情况, 进而判断该段公路施工质量的优劣。

5、道路使用维护期的应用

道路投入使用后, 应用道路探测雷达可进行道路状态的日常维护监察、阶段性路基质量普查、路基内隐性灾害或病害(如裂缝、下陷、脱空、变形)的探测, 及时发现路面下的问题。

五、结论及应用前景展望

传统的地下目标探测（包括工程质量检测、地下隐患探测、确定目标查找等）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。

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”，如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，探测深度可达到几十米。

随着道路探测雷达在公路路面上的广泛使用，使得人们对雷达系统会提出更高的要求。应用无载波脉冲雷达原理发展起来的道路探测雷达，实质上是对瞬态电磁场技术的工程应用，它涉及到天线设计，数据信号处理等多项高新技术，特别是对于雷达在实际工程中的应用，我们还需要利用本技术的特点，结合各应用部门自身的实际应用经验，加速应用研究。为了促进和发展无损探测技术在公路中的应用，提高检测质量，加快公路建设步伐，必须与有关部门共同合作对公路路面的主要问题进行大量的反演研究，并建立标准公路模型试验场，通过雷达反复探测，积累数据，分析所得到的不同地质体的探测图像特征，汇集成探测成果数据库，作为实际工程探测的参考标准，从而进一步改进系统硬件，开发能解决更多实际探测问题的专有软件。

我所致力于高科技产品开发，并积极将成果转化为社会生产力，诚望以高质量的探测产品和高水平的探测服务为国民经济建设作出更大贡献。

期待与有识之士在
产品开发、项目研究、工程服务等方面的真诚合作

欢迎

游览红瓦绿树、碧海蓝天的青岛！
莅临团结勤奋、求实创新的 22 所！

中国电子科技集团公司第二十二研究所青岛分所
(中国电波传播研究所青岛分所)

地址：青岛市青大一路 19 号 邮编：266071
电话：0532-5889546 传真：5895252
Email：tdldxmz@public.qd.sd.cn