

基于智能雷达机器人的检测技术体系

(V1.00)



2023-08-5 初稿

四川升拓检测技术股份有限公司

www.scentralit.com

目 录

第一章 概述	3
第二章 智能雷达检测机器人系统	3
2.1. 系统组成	3
2.2. 工作模式	5
2.3. 数据成图模式	6
第三章 道路缺陷（地下病害体）检测方法及原理	6
3.1. 测试的意义和技术现状	6
3.1.1. 道路缺陷测试意义	6
3.1.2. 检测技术现状	6
3.2. 雷达检测原理	7
3.3. 雷达检测道路缺陷可能影响因素分析	7
第四章 地质雷达的应用	8
4.1. 道路行业分析	8
4.1.1. 道路缺陷的成因及分类	8
4.1.2. 道路缺陷分类	9
4.1.3. 道路塌陷事故	9
4.2. 道路地下病害体检测	10
4.2.1. 天线的选取	10
4.2.2. 检测布线及现场注意事项	10
4.2.3. 智能雷达机器人探测案例	11
第五章 智能雷达机器人结果展示	12
5.1. 地质雷达三维展示	12
5.1.1. 雷达原始数据获取	12
5.1.2. 雷达数据三维展示	13
5.1.3. 铁路隧道衬砌三维检测实例（2021.10，四川雅安）	14
5.2. 雷达数据的高分辨率频谱处理	15
第六章 智能雷达检测机器人特点	16
6.1. 道路等行业道路检测技术现状	16
6.2. 系统特点	17
结语与致谢	18
技术支持	18

第一章 概述

在现代化公路运输中，不仅要求道路能全天候通行，还要求汽车能以一定的速度，安全、舒适地在道路上行驶。这就要求公路路面质量必须具备足够的承载力、足够的平整度、足够的稳定性、良好的抗滑性能等，目前行业内常采用探地雷达检测技术对在道路、运营道路等进行地下缺陷病害体无损检测，避免由于工程质量、地质原因、施工年限等影响因素造成人员安全、生命财产等造成不可挽回的损失。

我们历时多年研究，与国内青岛电波所等相关机构合作，基于成熟的雷达无损检测技术，开发了一整套针对公路路基地下病害体缺陷检测、市政管道（线）探测等方面的解决方案和技术体系。研发生产的智能雷达检测机器人检测系统，采用多传感器融合，可实现自动巡航检测，对指定区域进行精准扫描，提高上道作业效率，减轻人员负担。适用于公路路基缺陷检测，市政管道探测及其他检测，该技术方法，具有测试效率高、可靠性好、成本低，设备轻便，可自动巡航定位，降低人员安全等特点，可以大大地提高公路工程，市政道路工程等施工质量把控，预防道路沉降，龟裂，塌陷等灾害发生，为人民生命及财产安全保驾护航。

智能雷达检测系统，通过无线局域网连接，对指点检测区域可自行设置行驶路径，实现了纵向移动，横向移动变换，自行方向切换等，搭配 RTK 定位系统，可对行驶路线精准定位，误差可到达 cm 级，整个技术体系采用电磁波作为测试媒介，并集成到一套测试体系中，形成一套完整且成熟的测试设备中（智能雷达检测机器人（SIDR-AF-R1）），可对道路结构进行二维和三维分析，搭配 MEM 频谱分析方法，其测试精度和效率达到工程要求，并在实际工程中得到了应用。

第二章 智能雷达检测机器人系统

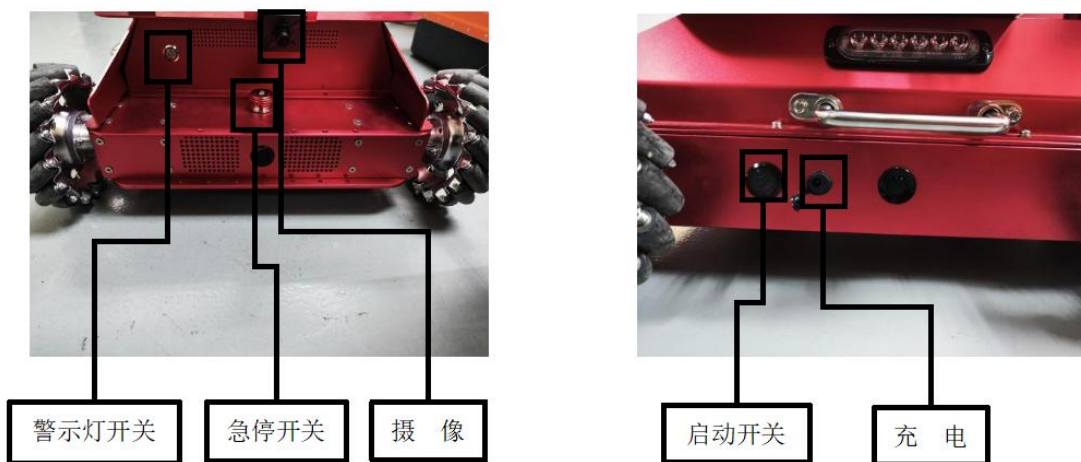
2.1. 系统组成

智能雷达检测机器人通过 RTK 定位实现自动行驶，而机器人上的雷达天线则向地下介质发射高频电磁脉冲（几十兆赫至上千兆赫），电磁脉冲遇到不同电性介质的分界面时即产生反射或散射，平板电脑接收并记录这些信号，再通过进一步的信号处理和解析即可了解地下介质的情况。

智能雷达检测机器人系统组成主要包括：AGV 小车、RTK 定位系统、雷达天线（可搭配不同频率雷达天线）、配件（主机/平板电脑）组成。



智能雷达检测机器人系统



AGV 小车细节展示

该技术体系的检测内容主要包括：

- 1) 公路路基病害体缺陷检测
- 2) 市政管道（线）探测
- 3) 其他

智能雷达机器人组成

编号	名称	型号	外观	备注
1	AGV 小车	/		搭载雷达天线，智能检测
2	RTK 定位系统	/		提供定位信息，用于 AGV 小车自动行驶

3	平板电脑	/		对信号进行采集、保存、分析等功能
4	400M 雷达天线	ST-GPR-W400		发出并接收电磁波信号并传输至平板电脑（选配）
5	900M 雷达天线	ST-GPR-E		发出并接收电磁波信号并传输至平板电脑（选配）

2.2. 工作模式

本检测系统通过局域无线网连接成功即可使用，工作模式分为全自动、半自动、手动三种操作模式。在三种驱动模式下都可在测试开始前对机器人进行前进、后退、左转、右转、逆时针旋转、顺时针旋转等操作，右上角显示的是雷达扫描的灰度图，右下角是车头高清摄像头，用于观察障碍物。

自动模式下，机器人完全自主运行，无需人工干预。半自动模式下，机器人由计算机程序和人工操作员共同控制，操作员可以远程监控和指导机器人。手动模式下，机器人完全由人工操作员控制，操作员直接操纵机器人的移动和功能。这些工作模式为路面雷达机器人提供了不同程度的自主性和人工干预，以适应不同的任务需求和实际情况。

自动模式：在全自动模式下，路面雷达机器人完全由计算机程序控制，无需人工干预。它可以根据预设的扫描方案和参数，自主进行路径规划、数据采集和任务执行。机器人会自动驾驶并收集道路信息，将数据传输到中央处理单元进行分析和存储。这种模式下，操作员只需监视机器人的运行状态，而不需要直接参与控制。即设置好测区的长宽、覆盖方式后，由小车自动控制完成测试（适合小于 10 米的测试）。

半自动模式：在半自动模式下，路面雷达机器人需要人类操作员的介入和监控。操作员可以远程控制机器人的移动和功能，并对数据采集过程进行实时监视和分析。操作员可以通过专门的控制界面或遥控设备，指导机器人前进、停止、转向等。同时，机器人会自动执行某些任务，如数据采集和图像处理，以辅助操作员进行决策和评估。即手动记录行走测线，然后小车将按照第一条测线的方向和设置的测区面积进行测试。适合测区较大的情形（一般大于 10 米采用此方法）。

手动模式：在手动模式下，路面雷达机器人完全由人工操作员控制。操作员通过操纵控制器或遥控设备，直接控制机器人的移动和功能。操作员可以实时调整机器人的速度、方向和扫描范围，以满足特定需求。这种模式适用于需要对机器人进行精确操作和调整的情况，例如在特殊道路条件或狭窄区域中。

2.3. 数据成图模式

我公司开发的高分辨率频谱分析方法 MEM（最大熵法）算法在冲击弹性波无损检测技术 IE/IAE 中得到了巨大的成功。MEM 分析具体内容请参考我公司技术体系：SCIT-1-TEC-00-2022-冲击弹性波检测技术基本原理。

在此基础上，我们对雷达的电磁波信号也导入了 MEM 频谱分析。通过对频谱数据的三维描画，可以有效地增强对缺陷的识别能力。（具体可见第五章。）

我们具有相关技术的全部知识产权，并申请和获得了多项发明专利，技术水平以达到国际领先水平。

第三章 道路缺陷（地下病害体）检测方法及原理

3.1. 测试的意义和技术现状

3.1.1. 道路缺陷测试意义

随着我国经济发展水平的不断提高，人们对公路的需求量也越来越大，对公路建设施工的要求也越来越高，路面现场检测显得尤为重要。其重要性主要体现在可实现对公路路面问题的全程跟踪和检测，以及早制定切实可行的养护计划，同时对道路正常交通的不良影响，提前做好预防工作，大大减小施工及养护人员的工作量。

3.1.2. 检测技术现状

道路空洞检测是指通过一定的技术手段，对道路表面或地下进行检测，以确定是否存在空洞或损坏，从而提前发现并及时修复，保障道路使用安全。常用的道路空洞检测技术包括声波探测、地磁探测、红外线探测等。这些技术可以有效地检测出道路表面或地下的空洞、裂缝、损坏等，为道路维修和保养提供了重要的参考。

1) 声波探测：通过将振动传感器嵌入地面，利用声波在地面上的传播反射方式，检测出地下空洞、坑洞等。

2) 振动传输方法：该方法使用机械或电磁震动器产生低频振动，利用加速度传感器检测地面振动响应，以确定地下是否有空旷或坑洞

3) 地磁探测：通过检测地面磁场的变化，识别地下空心、损伤及其它异常情况

4) 红外线探测：通过红外线热成像技术对道路表面进行扫描，检测不同区域表面温度的变化，以发现可能存在的空洞和损伤。

5) 激光测量：利用激光测距仪扫描道路表面，在检测表面缺陷、凸起等异常物体的同时，也可以检测出道路下方的空洞和损坏。

以上方法各有优缺点，应根据实际情况和需求选择合适的检测方式。同时，在使用任何检测方法时，应始终谨慎，并在施工或关闭警告区域的过程中加强人员及车辆的安全措施。

本技术体系主要是基于地质雷达法检测技术的拓展延伸，开发的智能雷达检测机器人，具有检测效率高，可自动定位及放点，避免传统人为拖动天线，降低成本，体积小，移动方便，成本低等优点。

3.2. 雷达检测原理

地质雷达检测原理可参考《SCIT-1-TEC-11-2022-C 地质雷达检测技术体系_102》。

3.3. 雷达检测道路缺陷可能影响因素分析

1) 结构影响

在道路地下病害体检测中，无论是桥涵构造物、路基、路面，在结构中均不是单一均匀介质，而利用电磁波中以单一介质作为理想化前提，其计算是建立在材质均匀性之上，在路面结构层厚度检测中材料差异性较小时影响尚不十分明显，但在路面基层、底基层检测中，由于其电磁波传递距离远和材质差异性大，其误差则将不容忽视，另外，若地下存在桥涵构造物，管线等多水泥混凝土结构、或金属结构，这时，材质的不均匀性影响因素较大，因为金属对电磁波的影响不容忽视。

2) 环境影响

雷达检测设备使用温度规定温度为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 40^{\circ}\text{C}$ ，但实际现场检测时天线常暴露在外界环境中，即常温环境下标定的参数是否满足特殊环境（高温，低温条件）下使用，环境温度对检测设备及数据影响还有待进一步研究。

其次，检测现场中雨水、雪、冰对检测结果的影响。从理论上来说，电磁波对水极为敏感，而对雪、冰影响相对而言要小的多。但是，无论是哪种情况，都对雷达检测图像界面造成影响，这时，对检测人员的要求较高，正确识别图像需具有一定经验。同时，目标体内部受湿程度对电磁波波速也将有不小的影响。我们在检测中就曾遇到连续检测剖面中局部有雪、水、冰的路面，这时对检测结果都需正确识别谨慎处理。

3) 人为影响

主要体现在从业人员对地面结构的了解程度不够，前期资料掌握不足，不能对结构内部不同介质层的误差进行正确分析判断。

检测天线选取不正确，检测方法单一，操作不正确（如移动速度过快，为正确移动天线等），缺乏雷达检测判断经验等均可能会造成结果分析偏差现象。

第四章 地质雷达的应用

地质雷达的应用非常广泛同时也非常成熟，在多个工程领域得到应用，并具有成熟的检测规程，本技术体系主要讲述地质雷达在道路工程结构上的检测应用。

4.1. 道路行业分析

随着城市进程的进步发展，一方面地铁、管廊、土建等便民服务工程正在日益发展。与此同时，随着车辆增多以及人文活动的加剧，带来的路面破损，管线老旧、土体扰动等问题随之出现。这些隐患因素在雨水冲刷、车辆载荷、冻土冻融等影响下容易进一步产生脱空、疏松或空洞等病害。



某城市道路地下空洞

4.1.1. 道路缺陷的成因及分类

行业内对于道路缺陷包含多种类型，例如沥青路面早期破损、车辙；半刚性基层过度开裂；结构物端部沉陷；埋置部位混凝土防水不到位等，但对于道路塌陷的形成原因，目前比较认可的有以下几种原因。

（1）路基不均匀沉降

（2）管线破损：由于管线周围土体不密实，以及管线破损产生的水土流失，是道路塌陷形成的主要原因。

（3）雨季汛期对于路基层影响：汛期内管线排水压力加大，同时间隙水会加快土壤路基的软化速率，加快空洞的形成。

（4）地铁、基建、顶管施工等大型工程扰动影响：盾构法、浅埋暗挖法等施工容易造成地层扰动，加上可能存在的降水排水，使其周围土壤松散，泥土流失，逐渐形成

深度空洞，在上层土壤逐步沉降后，最终导致路面坍塌。

根据《城镇道路探地雷达法检测技术规程》（DB33/T 1262-2021）5.4.6，雷达法探测地下病害体缺陷类型包括，空洞、脱空、疏松体和富水体。

4.1.2.道路缺陷分类

1) 按照缺陷的性质划分：路面沉降、路面破损、路面龟裂、路基塌陷、路基侧滑等。

2) 按照缺陷的严重程度划分：

① 轻微缺陷：指对产品外观和下道工序可能会有轻微影响的缺陷

② 一般缺陷：指不影响产品的运转和运行、不会成为故障起因，但对产品外观和下道工序影响较大的缺陷

③ 严重缺陷：指可以引起易于纠正的异常情况、可能引起易于修复的故障或对产品外观造成难以接受的缺陷。

④ 致命缺陷：指会造成安全问题的各类缺陷

3) 按照缺陷的面积划分：一般分为小面积缺陷、中面积缺陷和大面积缺陷等级。

4) 按照缺陷的位置和形状划分：路面上的凹槽、坑洼、裂缝、起伏等缺陷，以及路基上的变形、塌陷、滑动等缺陷。

4.1.3.道路塌陷事故

1) 青海某城市道路

2020年1月13日17时36分许，青海省西宁市某道路发生路面坍塌，一辆由南向北行驶的17路公交车（青A60xxx）陷入其中。事故共造成9人死亡，1人失踪，16人受伤。造成重大安全事故，社会反响极大。关注城市道路安全刻不容缓。



某城市道路道路坍塌

2) 黑龙江某高速公路

2023年8月3日，据黑龙江省公安厅高速公路交通管理局消息，目前，哈牡高速235公里处往牡丹江方向应急车道和行车道发生路面塌陷，303公里处发生漫水，315公里处桥梁有坍塌风险，另有多处路段积水较多。



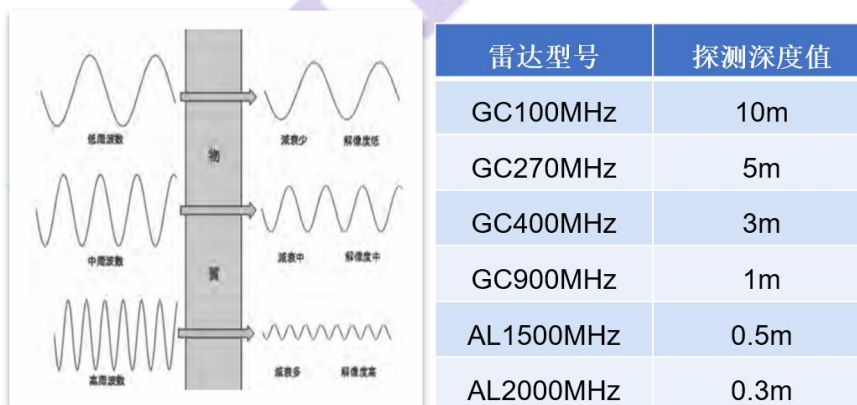
哈牡高速坍塌事故现场

基于目前国内多发的道路塌陷事故，对于道路的地下病害体检测已刻不容缓，国家相关部门也对在建公（道）路，运营道路等颁发了相关的检测、验收、评估标准等，大大降低了由于施工质量，地质灾害，大型施工或其他基建可能带来的不良影响。

4.2. 道路地下病害体检测

4.2.1. 天线的选取

受城市道路结构影响，电磁波正在传播过程中的衰减较大，探测深度相对于岩石等致密结构中有所减少。结合表中探深数据以及道路结构规范，建议道路检测中，雷达频段控制在 100MHz-1GMHz 范围之内。同时，在打孔验证前的复测时，考虑到精度及常见钻孔机械的钻孔深度，因此在复测时，宜采用 400MHz 的天线。



不同天线的探测深度

4.2.2. 检测布线及现场注意事项

电磁波球面波的收发特性使单条测线区域检测成为可能。

探地雷达城市道路检测中，测线通常要求延车道方向布设。

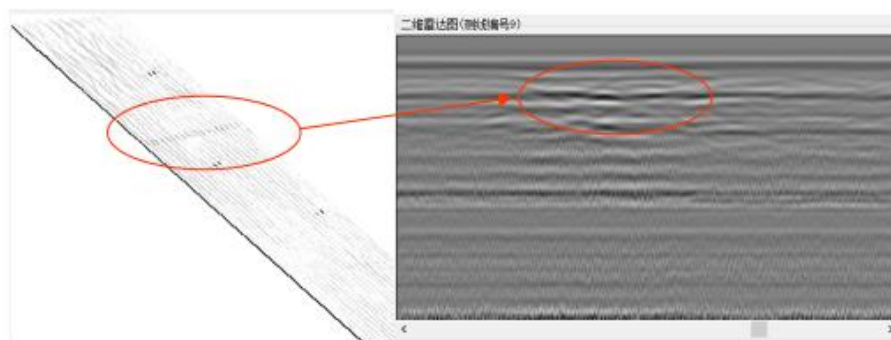
从探地雷达的工作原理收发方式可知，电磁波的收发以椭球型（近似球形）面波方式探测，探测角度 $\geq 60^\circ$ ，有一定覆盖范围，根据规范要求以及项目经验，中高频天线

道路检测，测线间隔建议 0.5m 左右。

4.2.3.智能雷达机器人探测案例

1) 成都市某道路地下缺陷检测（成都，2022）

利用探地雷达对成都市某道路进行多测线的探测，探测的主要内容为管线及空洞。

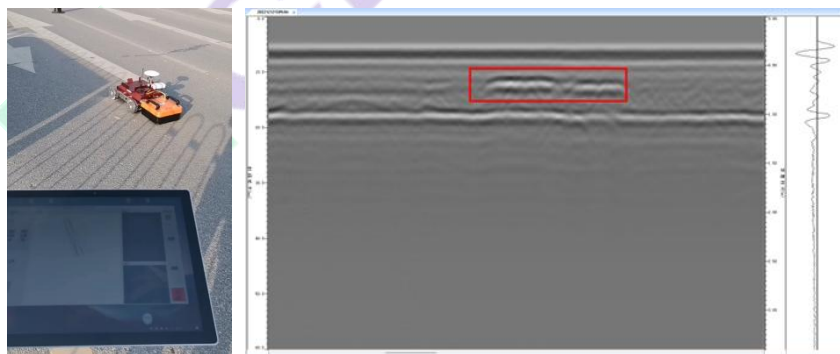


道路探测

从左侧的多测量水平切片图中，可以很直观的看到有一个横穿道路的管线，同时右侧的二维雷达图也能印证这一点；但是，如果我们只利用二维雷达图进行判断，则很容易将其判定成脱空。

2) 合肥某城市道路检测（合肥，2022）

应合肥某单位邀请，对合肥市某城市道路地下缺陷进行检测复测，委托单位先用三维雷达车进行检测，后采用智能雷达检测机器人对疑似缺陷区域进行复测，并找到具体缺陷位置如右图。



合肥某城市道路复测

3) 成都某厂房道路缺陷检测

受某单位委托，对其厂房门口的道路进行检测，明确下面的管线分布及病害，为后期的开挖工作提供支撑。检测当天，地表温度超过 40℃，传统的人工拖拽方式无法进行。因此，采用了智能雷达机器人进行自动化的检测。在检测过程中，智能雷达机器人所体现出的高效率及人性化得到了客户的好评。



某厂房道路缺陷检测

第五章 智能雷达机器人结果展示

为提高地质雷达的检测精度和成像能力，在我公司技术积累的基础上，与青岛电波所合作对地质雷达进行了信号分析、三维展示等功能的升级。

5.1. 地质雷达三维展示

三维地质雷达可实现雷达原始数据的数据切割、数据获取处理、道间均衡、雷达数据三维结构展示等机能。

5.1.1. 雷达原始数据获取

采用雷达设备以测距轮采样方式对已有混凝土试块进行布线采集，试块及雷达采集仪器如下图。

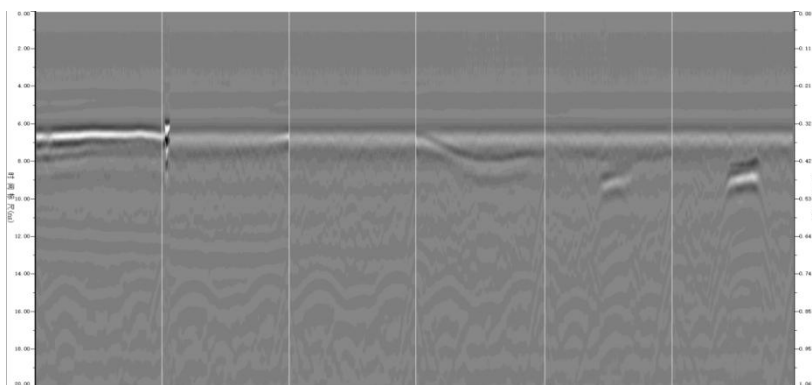


混凝土布线示意图



雷达采集仪器设备

如上采集数据后目前已有平台对雷达数据的展示多为二维平面图形展示，其展示效果不够直观。



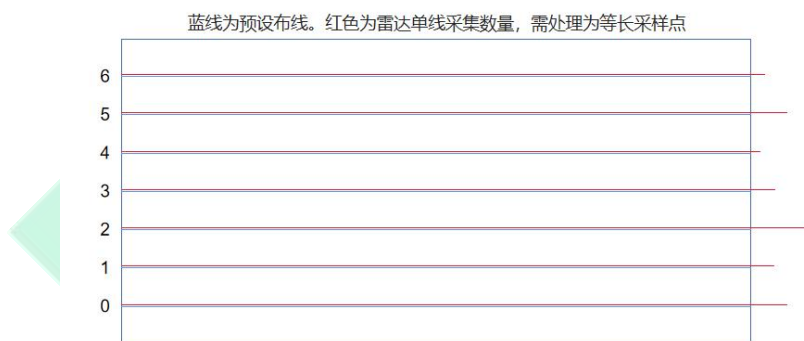
雷达原始数据二维平面展示图

5.1.2. 雷达数据三维展示

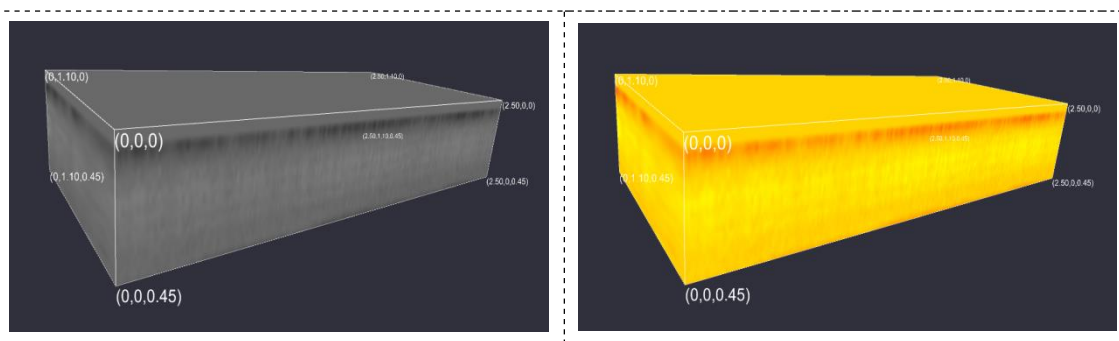
如下图布线，并使用测距轮采集方式，可以得到结构的几何信息（长、宽、高），以及所对应方向的采样次数，有

- (1) X 方向采样次数：测距轮记录次数；
- (2) Y 方向采样次数：布线条数；
- (3) Z 方向采样次数：雷达采样点数

以此可得到三维体结构的基本几何信息。但是，由于每条布线的测距仪记录点数不一致等其他因素的影响，对数据需先进行数据切割的分析工作。将雷达原始数据进行数据获取、数据切割、数据重排列、数据描画等工作可以得到三维雷达数据。

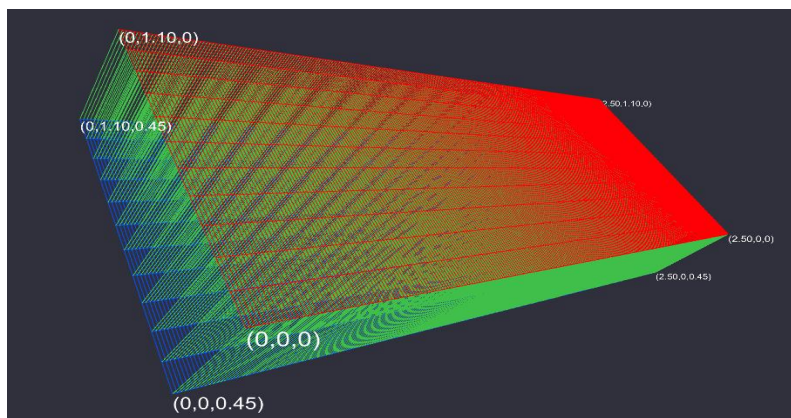


雷达采样数据多采样点切割示意图



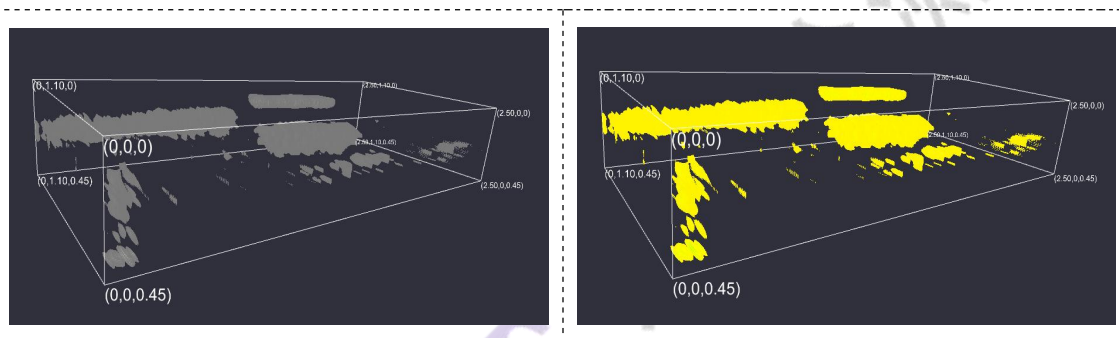
雷达原始数据三维结构展示图

在体结构描绘中，还可描绘雷达检测布线信息，便于后续对雷达检测时的布线信息进行回放。



雷达检测布线图

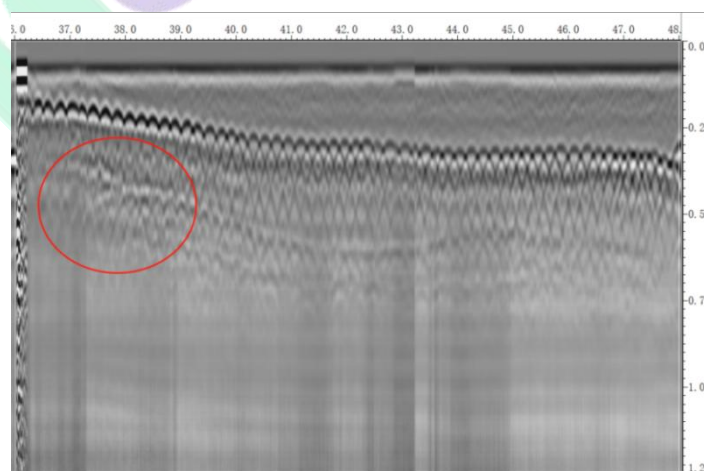
雷达三维结构内部体展示可以非常直观的观测检测结构的内部信息，相较于二维面图，三维体图极大的优化了数据的分析展示功能。



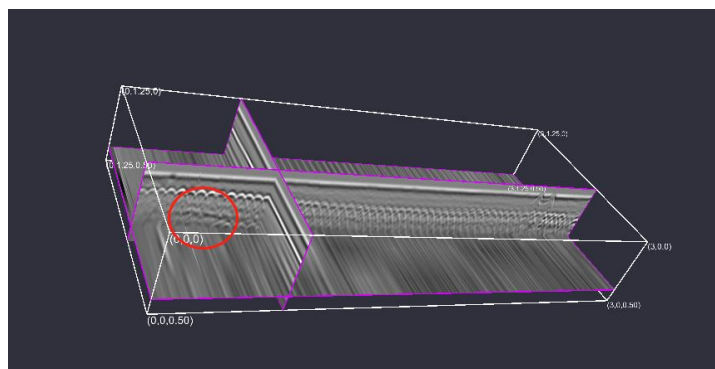
雷达内部体结构三维展示图

5.1.3.铁路隧道衬砌三维检测实例（2021.10，四川雅安）

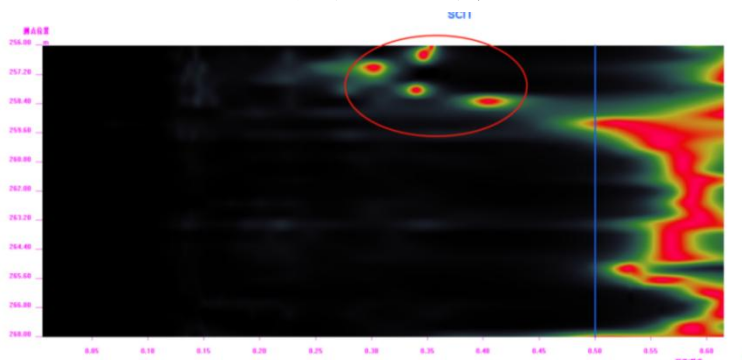
应中铁某局邀请，对某铁路隧道衬砌用地质雷达的二维、三维检测，以及与声频 IAE 的效果进行了对比。



地质雷达二维图形



地质雷达三维图形



IAE 测试结果

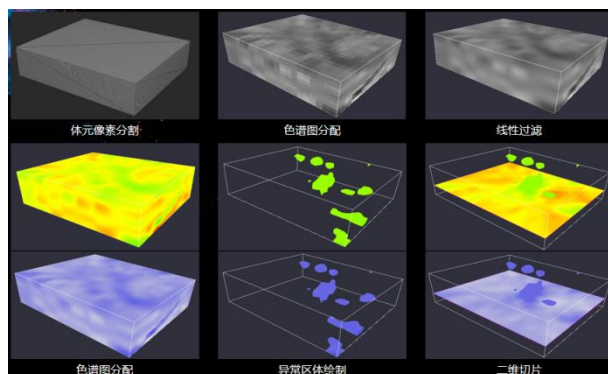
可以看出：

- (1) 三维成像较二维成像更加直观；
- (2) 在钢筋密集的条件下，IAE 图中在红圈位置有很明显的缺陷反应（脱空），而不管是二维还是三维雷达则难以识别。

5.2. 雷达数据的高分辨率频谱处理

我公司开发的高分辨率频谱分析方法 MEM（最大熵法）算法在冲击弹性波无损检测技术 IE/IAE 中得到了巨大的成功。

在此基础上，我们对雷达的电磁波信号也导入了 MEM 频谱分析。通过对频谱数据的三维描画，可以有效地增强对缺陷的识别能力。



雷达 MEM 频谱数据内部渲染及切片示意图

第六章 智能雷达检测机器人特点

6.1. 道路等行业道路检测技术现状

1) 传统方法-破损方法检测

传统破损方法查看地下情况必须开挖或钻孔，不仅成本较大，还破坏结构完整性，检查路段可能还需要封路处理，影响路面交通，不利于大范围开展。

2) 无损方法-人力拖动雷达

传统的基础雷达检测采用人力拖动式检测方法进行，检测效率低，需要人为控制天线的移动的速度和方向，基于传统雷达检测方式，形式单一；



人力拖动检测

3) 无损方法-雷达综合检测车

基于雷达检测技术，搭配不同雷达检测系统及天线，采用专用检测车驱动，具有检测效率高，可三维成图的优点，但设备体积大，系统复杂，设备造价、检测费用成本高，不利于重复检测。



雷达综合检测车

4) 智能雷达机器人

智能雷达检测机器人，体积小，造价成本低，搭配 RTK 定位系统，可实现自动巡航，设备简单，操作方便，可搭载 MEM 频谱分析技术，实现二维三维无间隙转换。节省人力成本，设备成本，可于三维雷达检测综合车形成互补。



智能雷达检测机器人

6.2. 系统特点

智能雷达检测机器人，经过现场应用及总结，该系统具备如下特点：

1) 定位精度高

RTK 定位技术能够提供厘米级的定位信息，这种高精度定位可以确保机器人在道路检测过程中准确地确定自身位置和姿态，从而精确获取和记录道路信息。

2) 携带方便、检测效率高

该系统采用轻便紧凑的设计，携带方便。同时，采用 RTK 定位技术的实现系统与基准站进行数据传输，无需复杂的有线连接，进一步提高了机器人的携带便利性。由于采用了高精度的 RTK 定位技术，该系统能够快速而准确地扫描道路，并收集大量的数据。这种高效率的数据采集能够大幅提升道路检测的速度和效率，节省了时间和人力成本。

3) 降低运行道路检测人员安全隐患

传统的道路检测通常需要人工操作员在道路上进行测量和观察，存在一定的安全风险。而采用 RTK 定位的路面雷达机器人可以在无人驾驶或远程控制的模式下进行工作，将操作员从危险环境中解放出来，有效降低了运行道路检测人员的安全隐患。

4) 检测结果直观

检测结果能以三维方向显示，可以从图像显示缺陷的具体信息（位置、体积等），帮助决策者和维护人员更好地理解 and 规划道路改进措施。

综上所述，采用 RTK 定位技术的路面雷达机器人能够提供直观的检测结果，包括高精度地图、可视化缺陷识别、三维重建和模拟以及实时监测反馈。这些直观的结果可以帮助操作员和决策者更好地理解和分析道路状况，从而做出相应的维护和改进决策。

结语与致谢

基于三维技术的雷达检测技术，是我公司与青岛电波所联合研制，倾情打造的新一代雷达无损检测技术。

较之现有的技术，我们在三维展示技术、高分辨率频谱分析技术方面进行了大幅的升级。试验验证表明，这些升级可以有效地提升对结构内部状态的识别能力。

最后，衷心向各位合作伙伴以及关心、支持我们的各位朋友表示诚挚的谢意！

技术支持

- ✘ 本资料为内部资料，仅供本公司及相关单位人员参考。未经本公司许可，任何单位和个人不能下载、阅读以及转载；
- ✘ 有关本资料相关的任何疑问，请咨询：
 - ✘ 四川升拓检测技术股份有限公司 客服咨询专线
 - ✘ TEL: (028)6861-1507、6861-1511、6861-1527
 - ✘ MAIL: Support@scentralit.com
 - ✘ HTTP: www.scentralit.com
- ✓ 有关本资料概要版的最新更新，可在本公司网站的下载中心下载：
http://www.scentralit.com/download_201003181343459218.html
- ✓ 升拓相关官网与平台：

升拓检测媒体矩阵 | 扫码识别即可进入

升拓检测官网



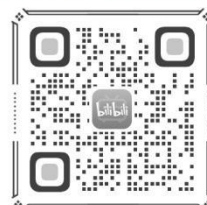
升拓官方公众号



抖音平台官网号



哔哩哔哩官网号



*抖音和淘宝请分别使用对应软件扫码