

# 基于安卓平台的小型化混凝土探测雷达系统

栗 榛<sup>1,2,3</sup> 叶盛波<sup>1,2</sup> 高云峰<sup>1,2</sup> 刘小军<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;

2. 中国科学院电子学研究所 北京 100190; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 面向钢筋混凝土内部结构的探测需求研制出一款小型化探地雷达, 并利用 Java 语言研发了一款基于 Android 手机平台的实时信号处理系统, 旨在为工程人员提供更加高效、便捷的探测方式和现场处理方法。该系统能够实时接收雷达探测数据, 将数据绘制成单道波形图、灰度图, 并且可以将数据保存在 SD 卡指定文件夹中。同时, 提出了一种实时的钢筋识别算法, 应用于信号处理客户端, 实现了对混凝土结构中的钢筋目标的自动识别。实验证明, 该算法具备较高的准确性与良好的实时性。

**关键词:** 探地雷达; Android 应用; 目标识别; 信号处理; 钢筋混凝土

**中图分类号:** TN95 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

## Compact concrete detection radar system based on android

Li Zhen<sup>1,2,3</sup> Ye Shengbo<sup>1,2</sup> Gao Yunze<sup>1,2</sup> Liu Xiaojun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Sensing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A new compact ground penetrating radar system has been built and an android application of real-time signal processing has been developed with Java language in the demand of reinforced concrete detection, which can help the engineers to work efficiently and conveniently. The radar data would be received in real time, and be drawn into single-channel oscillogram and grayscale images, and stored in the SD card. At the same time, a real-time steel rebar recognition algorithm has been proposed and applied to signal processing client, realizing automatic identification of the target in reinforced concrete structure. Experiments show that the algorithm has high accuracy and good real-time performance.

**Keywords:** ground penetrating radar; android application; object identification; signal processing; reinforced concrete

## 1 引言

随着城市化建设的蓬勃发展, 小区改建、房屋翻新和建筑物质量检测等工程领域需求旺盛, 对混凝土墙体内部结构以及钢筋数量和位置进行检测尤为重要。探地雷达 (ground penetrating radar, GPR) 技术作为一种浅层地质构造探测和工程质量检测的无损探测技术, 具有高效率、高精度、宽频带、高分辨率和轻便的优点<sup>[1]</sup>, 在此领域得到了广泛的应用。

我国在 20 世纪 90 年代初展开了探地雷达的相关研究, 在探地雷达方面取得了突出成绩<sup>[2-4]</sup>, 能够对钢筋混凝土内部结构 (配筋、钢筋保护层等) 进行成像与解释, 快速实施无损检测并完成便捷数据存储, 已成为混凝土结构检测

的重要手段, 而且后期的技术支持也日趋成熟<sup>[5-7]</sup>。

然而, 传统的 GPR 数据处理平台成本高昂, 携带不便, 且目标识别多采用后处理方式, 不能满足钢筋混凝土探测时的移动探测和现场解释的需求。面向此应用需求, 需要研制小型化、便携式的探地雷达系统, 包括雷达探测器以及信号处理平台。

Android 操作系统是由 Google 推出的基于 Linux 内核的操作系统, 是第一个完整、开放、免费的智能手机平台。Android 系统具备明显的市场优势和平台优势, 可供开发人员自由编写代码, 加之日益强大的手机硬件支持, 为基于智能手机平台的信号处理创造了条件, 国外已有学者开展了相关研究<sup>[8]</sup>。本文基于 Android 手机平台开展了探地雷达数据处理的研究与应用工作, 满足实时性、移动性的需

求,方便工程人员对钢筋混凝土等结构探测成像,在建筑质检、建筑维护等钢筋混凝土检测领域有着巨大的应用价值。

## 2 探地雷达的基本原理及系统设计

### 2.1 探地雷达原理

探地雷达通过天线以宽频带短脉冲形式向探测目标发射高频电磁波,基于不同介质的电性差异,电磁波在传播时,部分能量会发生反射,在另一端利用天线接收反射回波,如图 1 所示,并传输至主机实现记录。回波信号经探地雷达信号处理平台分析形成雷达图像,在不破坏地表结构的情况下获取地下介质的分布特征和内部结构等信息。

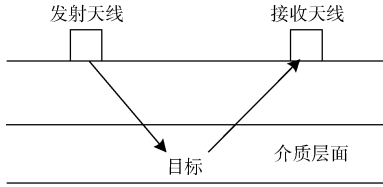


图 1 雷达波反射简图

电磁波在地下介质传播时,其路径、波形等将随介质的电磁特性和几何形态的不同而变化,因此,探测目标和周围介质的电磁特性差异越大,便越容易被检测出来。而描述物体或介质电磁特性的参数主要有相对介电常数  $\epsilon_r$  和电导率  $\mu$ ,表 1 展示了混凝土相关介质的电磁特性参数。

表 1 混凝土相关介质的电磁参数

介质	相对介电常数 $\epsilon_r$	电导率 $\mu / (\text{ms} \cdot \text{m}^{-1})$	电磁波速度 $V / (\text{m} \cdot \text{ns}^{-1})$
空气	1	0	0.3
淡水	81	0.5	0.033
铁	300	$10^{10}$	0.017
普通干混凝土	4~10	1	0.09~0.15
普通湿混凝土	10~20	20	0.07~0.091
PVC 塑料	3.3	1.34	0.16

可以看出,混凝土与空气、金属等介质之间的电磁特性差异极大,将使得雷达回波信号的幅度、相位等产生明显变化,因此可以利用探地雷达探测混凝土结构中的钢筋和裂缝等内部结构。

通过接收天线接收到反射回波的时间可以确定反射界面的距离,同时根据回波信号的波幅、频率等信息计算反射体的位置,结构形态和埋深等信息。

回波信号在混凝土介质中的传播速度可由下式求得:

$$V = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (1)$$

式中:  $c$  是电磁波在真空中的传播速度,约为  $3 \times 10^8$  m/s,  $\epsilon_r$  是混凝土的相对介电常数。

然后,根据电磁波发射和接收的时间差可以求得距离:

$$D = \frac{VT}{2} \quad (2)$$

混凝土中的钢筋在雷达波形图上显示为向上凸起的弧形,这与电磁波在介质中传输时间差有关<sup>[9]</sup>。探地雷达沿介质表面运动,以黑色圆点代表钢筋,如图 2 所示。当探地雷达运动到  $X_{-N}$  处时,接收到由钢筋反射的回波信号,可以求得距离  $d_{-N}$ ;当雷达运动到钢筋正上方的  $X_0$  处时,可以求得距离  $d_0$ ;同理,可求得  $X_N$  处的距离  $d_N$ 。由图可知,距离最短,小于和,因此在波形图上产生了向上凸起的弧形。

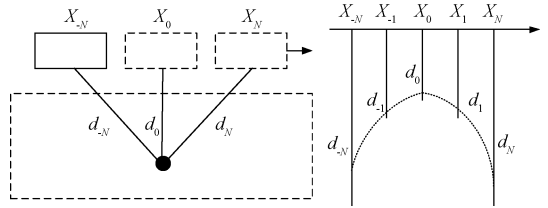


图 2 探地雷达工作原理

### 2.2 探地雷达系统设计

本文针对钢筋混凝土内部结构探测应用需求,研制出一款小型化、便携式超宽带墙体结构探测雷达如图 3 所示。

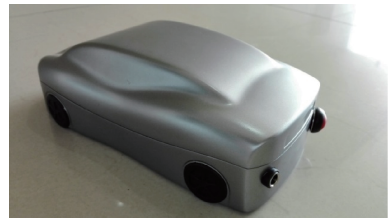


图 3 小型便携式超宽带墙体结构探测雷达

小型探地雷达系统主要包括 4 个部分:发射机、接收机、收发天线及雷达主控,原理框图如图 4 所示。其中,发射机可以产生窄脉冲信号并通过发射天线将其辐射出去,接收天线接收来自目标的反射回波并送给接收机,接收机对其进行采样数字化,雷达系统各单元所需的时序、控制信号则由主控单元产生。

一般情况下,建筑墙体厚度在 50 cm 以内,墙内钢筋直径最小约为 8~10 mm。为满足对墙体内钢筋的深度和分辨率的探测需求,雷达系统工作的中心频率为 1.6 GHz。其各项主要参数表 2 如所示。

## 3 安卓操作系统的雷达数据处理软件

小型化、便携式的探地雷达能够缩短检测工作周期,其信号处理平台要满足实时性、移动性的探测需求,传统的信号处理平台不具备此优势。本节将研究基于安卓操作系统的探地雷达信号处理,对墙体结构探测数据进行成像与解释。

表 2 探地雷达参数表

参数	数值
天线中心频率	1.6 GHz
A/D 位数	12 bit
采样点数	256
时窗	10 ns
探测深度	20~30 cm
扫描率	20 道/s
数据率	80 kbps
尺寸	17.5 cm×12 cm×6 cm

3.1 软件设计方案

应用软件基于 Android 平台,利用蓝牙 4.0 作为雷达与手机的通信端口,开发环境为 Eclipse,采用 Java 语言编程实现。系统技术方案图 5 所示。

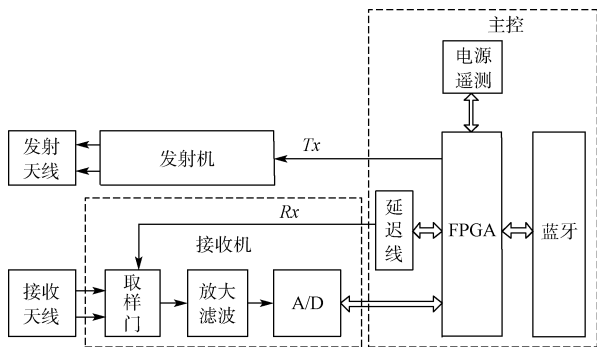


图 4 雷达原理

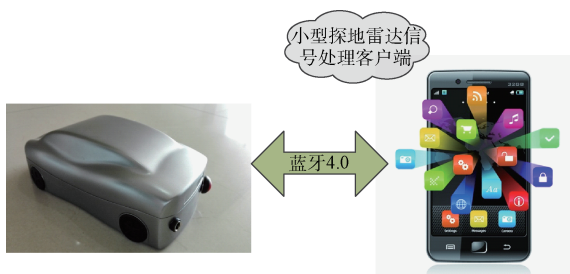


图 5 系统技术方案

3.2 主要功能

在同时开启雷达和安卓手机蓝牙的状态下,运行软件,则软件可以在后台将手机和雷达建立连接。软件的流程如图 6 所示。

点击主界面的“单道波形”按钮,则软件可以将接收到的雷达探测数据绘制为单道波形图,点击“返回”按钮可以回到主界面。点击主界面“人工识别”按钮可以将接收到的雷达探测数据绘制为灰度图,并将数据文件以开始探测的时间命名,保存至 SD 卡中的指定文件夹中。在主页面点击“自动识别”按钮可以在灰度图中将需要探测的目标(如

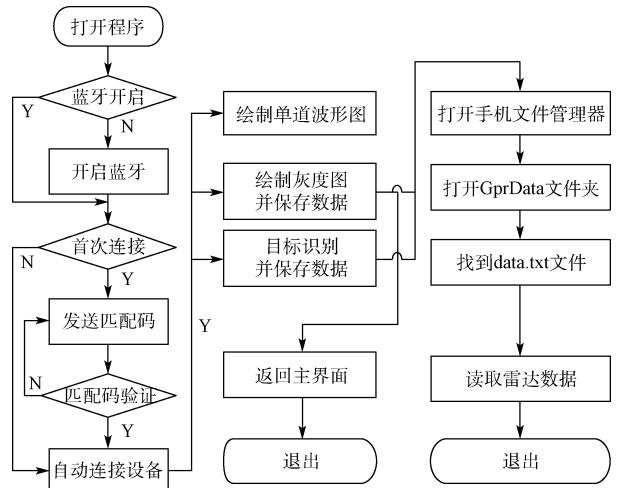


图 6 软件流程

钢筋)识别出来,在图像中以红色圆点标出。还同时在系统文档中对已经保存的文件进行复制、删除、网络共享等一系列文件管理操作。

3.3 目标识别算法

雷达图形常以脉冲反射波的波形形式记录,同一连续界面的反射信号形成同相轴,多道同相轴(或等灰线、等色线)可以形象地表征出地下反射面,同时显示介质的内部情况。

根据雷达图像识别的经验,在雷达波形图上混凝土的主要特征为:振捣均匀的混凝土的同相轴水平,各等色线平行。而由于雷达波的绕射,钢筋在雷达波形图上的波形是向上凸起的弧形,弧顶为钢筋顶部位置。因此,为了识别出钢筋,算法需要准确识别出弧顶的位置。

工程需要算法有优良的实时性能,同时受到安卓处理器性能制约,识别算法不宜过于复杂庞大。通过对相关领域的研究<sup>[10-12]</sup>,以传统的峰值检测算法为基础,设计出兼顾准确性与实时性,同时能在安卓手机上稳定运行的钢筋识别算法。它可以识别钢筋混凝土成像后的弧顶位置,算法步骤如图 7 所示。以  $X(i, j)$  表示雷达图像对应的二维矩阵中任意一点的数值,  $i$  代表采样点数,  $j$  代表道计数。

1)减背景:混凝土的图像特征较为简单,分别对每道波形相应像素点的雷达数据取平均,获得此刻的背景平均值,然后将每列数据与相应的平均值相减,得到去背景后的图像,即:

$$X_{Bg}(i, j) = X(i, j) - \sum_{j=1}^T X(i, j) / T \quad (3)$$

式中:  $T$  是个变量,代表当前测量时刻波形的道数。

2)去直流:将每道波形所有像素点的数值相加,除以每道波形的像素点数,可以获得此道数据对应的直流数值。然后将每道数据与相应的直流数值相减,得到去直流后的图像,即:

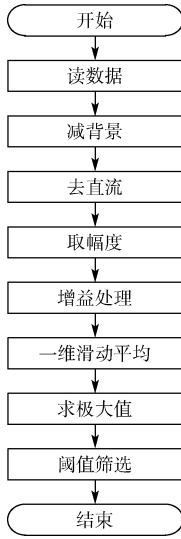
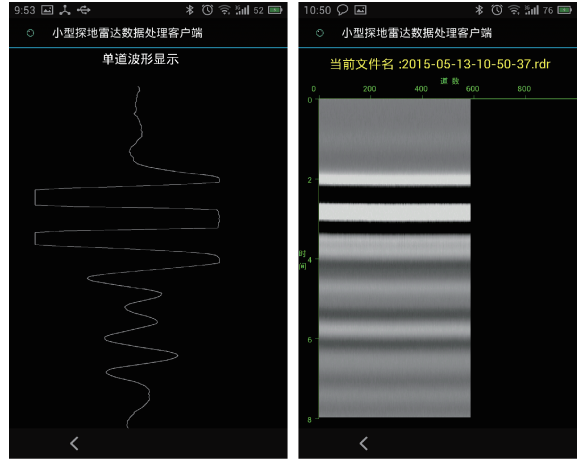


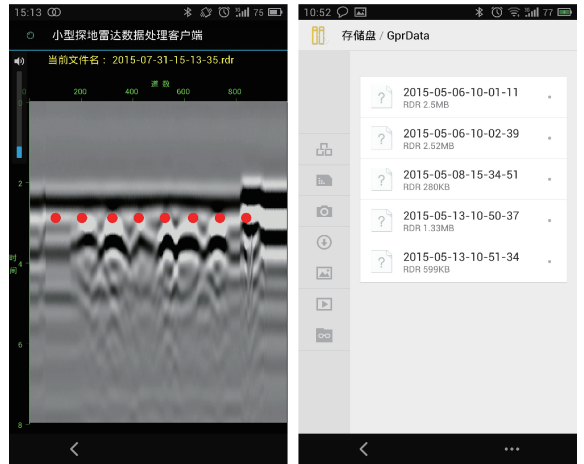
图 7 算法流程

对不同屏幕尺寸以及分辨率的手机具有良好的适配性,运行结果如图 8 所示。



(a) 单道波形图

(b) 灰度图



(c) 灰度图目标识别

(d) 数据存储

图 8 软件处理结果

其中,图 8(a)展示了单道波形图;图 8(b)展示了灰度图,黄色数字代表了数据在 SD 卡中存放时的文件名,横坐标代表了当前测量到的数据道数,道数随翻页递增,纵坐标代表了时间,单位是 ns;图 8(c)显示了具有自动识别功能的灰度图,红色标记位置为钢筋;图 8(d)展示了不同的雷达数据在 SD 卡中指定的文件夹 GprData 中的存放情况。

### 5 结 论

本文介绍了探地雷达在钢筋混凝土检测中的应用,提出了基于安卓手机平台的实时信号处理应用系统。该系统能够利用蓝牙将雷达探测数据绘制成相应图像,自动识别算法可以凭借其良好的实时性和准确性快速定位钢筋目标,为工程人员提供了很大的便利。同时,满足了实时性、移动性的探测要求,提升了相应工程操作的效率,且成本相对低廉,软件升级方便,在今后的建筑质检、建筑维护应用

$$X_{DC}(i, j) = X_{BG}(i, j) - \sum_{i=1}^P X_{BG}(i, j) / P \quad (4)$$

式中:  $P$  是常数,代表采样点数。

3)取幅度:对上述数值取绝对值。

4)增益处理:为了抑制杂波,获得更好的识别效果,对每道数据进行加权,即:

$$X_{WT}(i, j) = |X_{DC}(i, j)| \cdot \left(\frac{P-j}{P}\right)^3 \quad (5)$$

5)一维滑动平均:对加权后的信号进行纵向求和,转化为一维数据,同时对一维数据进行均值滤波窗口宽度选为  $N = 21$  :

$$x(j) = \sum_{i=1}^P X_{WT}(i, j) \quad (6)$$

$$y(i) = \sum_{j=i-(N-1)/2}^{i+(N-1)/2} x(j) / N \quad (7)$$

6)求极大值:在均值滤波后的数据中选取极大值,对一维数据  $y(i)$  进行差分计数,求得第  $i$  个点左边上升沿数目  $L$  和右边下降沿的数目  $R$  为:

$$L = \text{countif}(y(i+m) < y(i+m+1)) \quad (8)$$

$$R = \text{countif}(y(i+n) < y(i+n-1)) \quad (9)$$

式中:  $m = -1, -2, -3, -4, -5, n = 1, 2, 3, 4, 5$ 。如果  $L \geq 4, R \geq 4$ ,则认为点  $i$  是一个极大值点。

7)由于雷达图像中的波形交叠可能会使一维数据中产生假性波峰,所以还需要对上述极大值点进行阈值筛选。

通过在 MATLAB 上对数据的观察分析,一道数据中只有满足每个采样点的值大于  $M$  的不少于  $p$  个,才能认为这道数据可能出现波峰。通过经验分析以及利用二分法多次试验,确定了  $M$  和  $p$  的值。利用  $M$  和  $p$  对以上求得的极大值点进行再次筛选,从而得到了波峰位置。

### 4 实验结果

目前软件已经能在多种型号的安卓手机上平稳运行,

中有巨大的应用前景和经济价值。

## 参考文献

- [1] 卞可, 俞顺. 探地雷达在混凝土质量检测中的应用[J]. 河南科技, 2014 (5): 14-15.
- [2] 戴舜, 刘丽华, 吴秉横, 等. 钢筋混凝土无损检测的手持式探地雷达研制[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2010, 37(9): 44-48.
- [3] 张长春, 张崇超, 刘小军. 具有 TVG 功能的探地雷达接收机技术研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(6): 51-55.
- [4] 王伟, 张群英, 方广有. 浅表层伪随机编码超宽带探地雷达研制[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(8): 224-230.
- [5] 晋良念, 钱玉彬, 刘庆华, 等. 超宽带穿墙雷达偏离网格目标稀疏成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(4): 745-748.
- [6] 铁磁管道用极低频磁发射机的逆向优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 634-640.
- [7] 陈伟民, 李存龙. 基于微波雷达的位移/距离测量技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1251-1265.
- [8] BENEDETTO F, BENEDETTO A, TEDESCHI A. A mobile android application for road and pavement inspection by GPR data processing [C]. 15th International Conference on Ground Penetrating Radar, 2014: 842-846.
- [9] 高云泽, 叶盛波, 张晓娟, 等. 基于电磁感应和超宽带雷达的新型探测系统[J]. 电子测量技术, 2015, 38(9): 134-140.
- [10] JANNING R, HORVATH T, BUSCHE A, et al. Pipe localization by apex detection [C]. IET International Conference on Radar Systems, 2012: 1-6.
- [11] 阮超, 陈小莉, 田茂. 基于 2D-LMS 的探地雷达背景噪声去除[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 119-125.
- [12] 曾伟. 钢筋混凝土环境探地雷达体制与数据处理研究[D]. 南京: 东南大学, 2011.

## 作者简介

栗榛, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为探地雷达信号处理。  
E-mail: yama2008@126.com

# 是德科技与 ASELSAN 签署 5G 研发战略合作伙伴谅解备忘录

双方将就 5G 有源天线系统、RRH、原型验证平台集成和表征功能进行合作

2016 年 11 月 17 日, 是德科技公司(NYSE:KEYS) 和土耳其 ASELSAN Elektronik Sanayi ve Ticaret A. Ş. 公司日前宣布签署《谅解备忘录》(MOU), 双方将在 5G 通信技术研发领域建立战略合作伙伴关系。双方将致力于共同协作开发 5G 支持技术——尤其是有源天线系统和 RRH、原型验证平台集成和表征功能, 以期增强未来 5G 无线通信的创新能力。

是德科技与 ASELSAN 的合作, 首先从 ASELSAN 毫米波 RRH 技术与是德科技的 5G 波形生成和分析测试台参考解决方案的集成开始, 包括 MIMO 实时波束赋形和波束控制无线表征功能。W1906BEL 5G 带探测程序库能够为 5G 技术研究提供可立即使用的参考信号处理用户专利(IP)设计。ASELSAN 将提供下列产品和解决方案:

77 年来, 是德科技依靠其对技术的专注和对产业深入洞察, 为如下行业(包括但不限于)提供综合性解决方案和测量服务, 助力从业者将产品快速推向市场, 在成本与质量之间找到完美的平衡, 赢得消费者信赖:

1)10 GHz 微波发射机及天线

2)10 GHz 微波接收机及天线

3)用于大规模 MIMO 波束控制的控制单元和本地振荡器

4)用户设备天线

本次协作将会推动下一代 RRH 高速宽带毫米波无线通信实验和新表征技术的启动。

ASELSAN 技术与战略管理副总裁 ismet Atalar 表示:“非常高兴我们的工程师将可以使用双方协作开发的测试台来执行实时 MIMO 技术探索和无线表征。这将帮助我们加速工作的开展, 更快地从产品原型和未来 5G 产品的设计阶段迈向测试阶段, 以及之后的验证阶段。”

是德科技中国实验室经理孔红伟博士表示:“毫米波 MIMO 系统的开发和验证提出了巨大挑战。高性能、可定制的毫米波 MIMO 硬件平台、易于使用的设计和仿真软件解决方案和可立即使用的 5G 程序库, 对于更快、更高效地解决这些挑战至关重要。通过与 ASELSAN 协作, 是德科技解决方案能够与 ASELSAN 天线阵列相集成, 从而完成了一个实际的原型系统, 这将是迈向解决这些挑战的重要一步。”