

低成本手机平台墙体结构检测雷达系统

沃远^{1,2,3} 叶盛波^{1,2} 纪奕才^{1,2} 方广有^{1,2} 高云峰^{1,2}

(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 100048)

摘要: 探地雷达能对墙体内部目标(如钢筋、水管、电线)进行检测与成像,有着良好的应用效果。针对以上需求研制了一套小型化、成本低的便携式墙体结构探地雷达系统,并开发了相应基于安卓手机平台的软件。该软件可实现与雷达之间的数据通信,能够实时接收雷达的探测回波数据,并可以人工选择合适的数据显示方案。探测结果可在手机上通过频率-波数域方法进行聚焦成像处理,图像显示直观。测试结果表明,该系统人机交互性好,操作简单,有良好的测试效果,能满足工程中的实际需求。

关键词: 探地雷达;无损检测;钢筋混凝土;安卓应用;信号处理

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

Lowcost wall structure detection radar sytem based on cellphone platform

Wo Yuan^{1,2,3} Ye Shengbo^{1,2} Ji Yicai^{1,2} Fang Guangyou^{1,2} Gao Yunze^{1,2}

(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: Ground penetrating radar can detect the inner object in the wall and imaging them, such as steel, water pipe, electric wire. It has good application prospect. For the purpose above we developed a miniature, low-cost, portable ground penetrating radar system. And developed a software based on Android system. This software system can transmit data between software and radar. Also, it can receive the radar signal in real time and show the data in a suitable way by the operator's choice. The signal data can be dealt with by the frequency-wavenumber method. The test shows that the system has good results. The system can meet the requirement in practical engineering.

Keywords: ground penetrating radar; nondestructive testing; reinforced concrete; Android platforms; signal process

0 引言

通过在混凝土中加入钢筋可以有效改善混凝土材料的力学性能。人们使用钢筋混凝土对房屋的质量进行检测,随之而来的,对钢筋混凝土墙体进行检测成为了一种需求。无损检测,是一种非侵入式的不影响房屋结构、建筑材料力学性能的技术,利用电磁波由于不同材质电介质常数的差异而有不同的传播特性这个性质对墙体内部的钢筋网络进行数量、位置方面的检测。钢筋混凝土无损检测是对钢筋混凝土质量进行监督和诊断的重要手段,是混凝土工程技术中的一项重要内容^[1-3]。

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是近几十年来发展起来的新型探测工具,目前国内外已经应用得非常广泛,而且整体技术也日趋成熟^[4]。探地雷达利用超高频脉冲电磁波探测地下介质分布,是一种常见的地球物理勘

探方法,具有高效率、宽频带、高分辨率、高精度等优点,能对墙体的内部目标(如钢筋、水管、电线)进行检测与成像,有良好的应用效果。目前现有的探地雷达产品成本高,体积大,且在户外多采用笔记本电脑进行显示,现场操作不方便。同时雷达测量结果也不直观,数据处理往往需要专业人员进行解译,这对非专业人员使用造成了极大的不便。

针对以上问题,研发了一种小型化、低成本、便携式的墙体结构探地雷达系统,并开发了相应基于安卓平台的信号采集处理软件,该软件可以在现有主流手机中稳定运行,且雷达回波图像可以在手机中进行频率-波数域处理以方便操作人员观察。首先介绍系统原理与信号处理算法,然后详细给出整个系统的开发过程,最后展示实际测试结果。

实验测试结果表明,该雷达具有很好的测试效果,软硬件均能满足实际工程应用需求。其中,软件用作探地雷达的操作平台和返回数据的结果显示,同时在手机上也集成

了频率-波数域方法对雷达回波数据进行处理,并将结果显示出来,以方便使用人员观察。具有良好实际应用价值。

1 探地雷达的系统原理与系统设计

研制基于手机平台的墙体结构检测系统,包括雷达硬件模块和手机软件模块。系统操作流程如图1所示。首先打开手机蓝牙适配器与手持雷达进行配对,然后在软件主界面选择操作模式,然后通过手持雷达在墙面上拖动来获得实时回波数据并在屏幕显示灰度图。

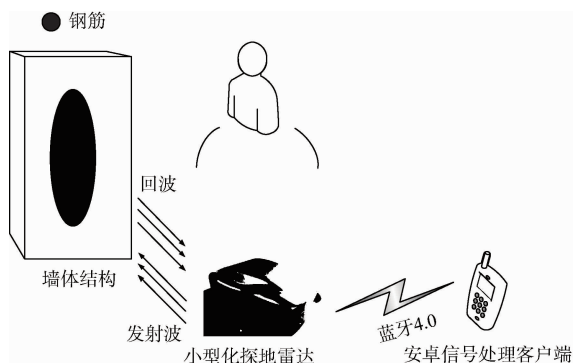


图1 系统操作流程

1.1 探测原理

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,造成雷达反射回波在波幅、波长及相位上的变化^[5]。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 ϵ_r 和电导率 μ ,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 ϵ_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

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,这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。

一般情况下,探地雷达探测数据以二维的灰度图来显示。在二维剖面图中,点目标的回波响应表现为双曲线形态,这与电磁波在介质中传输时间差有关^[6]。探地雷达沿介质表面运动,以黑色圆点代表点目标,如图 所示。当探

地雷达运动到 X_{-N} 处时,接收到由点目标反射的回波信号,可以求得距离 d_{-N} ;当雷达运动到点目标正上方的 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2可知,距离 d_0 最短,小于 d_{-N} 和 d_N ,因此形成了上凸双曲线形状^[7]。

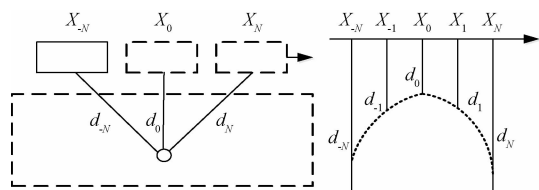


图2 点目标回波响应

对于钢筋来说,由于探地雷达天线在介质面上沿垂直于钢筋走向的方向移动,不断地向地下发射宽带窄脉冲,也不断地接收地下目标的反射信号。若发射和接收的均为理想的窄脉冲,则在形成的地下剖面图像中钢筋的回波响应应该类似于点目标,也呈现为上凸双曲线形状^[8]。

1.2 基于移动平台的频率-波数域偏移成像

在墙体结构探测中,墙内结构反射回来的杂波信号与钢筋等目标的回波信号混杂在一起,而且绕射信号在回波数据形成的图像中分布范围也非常散乱,难以对关心的目标进行对位识别,所以需要回波数据进行处理将不同目标体的电磁响应信号分开,以突出目标体的特征。然而很多传统的方法在移动平台上存在着算法复杂,耗时时间长等问题。在此,采用计算效率相对比较高的频率-波数域($F-K$)偏移技术,偏移技术是处理绕射波的有效方法,电磁场随着时间与空间的变化符合波动理论,由此建立的雷达波波动方程与声波波动方程在方程形式上一致,这就为将已经在地震勘探中得到广泛运用的、成熟的偏移技术合理地引入到到 GPR 资料处理解释中提供了理论基础。 $F-K$ 偏移方法兼具有有限差分法和克希霍夫积分法二者的优点:计算效率高,耗时少;无倾角限制,无频散现象;精度高,计算稳定性好。 $F-K$ 偏移方法不仅可以对目标能量进行聚焦,同时可以提高回波信号的信噪比,从而提高了检测图像目标体的分辨率^[9]。 $F-K$ 偏移一个关键性的弱点是偏移速度对偏移结果影响较大,因此在偏移处理中应尽可能地提高偏移速度的精度,以提高偏移效果^[10-11]。

探地雷达天线发射的电磁波在地下媒质中的传播时间为双程时间,电磁波传播速度的选取和混凝土的电介质常数有关, $v = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}}$ 。

二维波动方程的频域解为:

$$E(k_x, z, \omega) = C_1 \exp(jk_z, z) + C_2 \exp(-jk_z, z) \quad (4)$$

根据成像原理,只考虑上行波:

$$E(k_x, z, \omega) = C_1 \exp(jk_z, z) \quad (5)$$

探地雷达天线在混凝土表面接收($z=0$),则 $C_1 =$

$E(k_x, 0, \omega)$, 变换到时间-空间域, 并令 $t=0$, 得偏移剖面:

$$e(x, z, t = 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int E(k_x, z = 0, \omega) \cdot \exp[j(\omega t + k_x x + k_z z)] dk_x d\omega \quad (1)$$

根据频散关系式: $\omega^2 = \frac{v^2}{4}(k_x^2 + k_y^2 + k_z^2)$, 得

$$d\omega = \frac{V \cdot k_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} dk_z, \omega = \frac{V}{2} \sqrt{(k_x^2 + k_z^2)} \quad (2)$$

将 $E(k_x, z = 0, \omega)$ 映射为 $B(k_x, z = 0, k_z)$, 则偏移剖面变为

$$e(x, z, t = 0) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty-\infty}^{+\infty+\infty} \int B(k_x, z = 0, k_z) \cdot \frac{V k_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} \exp[j(\omega t + k_x x + k_z z)] dk_x dk_z \quad (3)$$

频率-波数域偏移处理可用下面的过程来描述:

$$e(x, z = 0, t) \xrightarrow{fft} E(k_x, z = 0, \omega) \xrightarrow{\text{映射}} B(k_x, z = 0, k_z) \xrightarrow{\frac{V k_z}{2\sqrt{k_x^2 + k_z^2}} ifft} e(x, z, t = 0)$$

频率-波数方法能聚焦关心的目标体在回波图像上的电磁波能量信号。突出钢筋对电磁波的反射回波, 产生高信噪比的处理后的偏移图像。

1.3 仿真验证

使用 GprMax 进行仿真, 模拟混凝土墙内有 3 根钢筋, 间隔 15 cm, 埋深 5 cm, 每根钢筋直径 10 mm, 每道回波对应测线长度 2 mm, 混凝土介电常数为 6。回波成像图如图 3 所示。

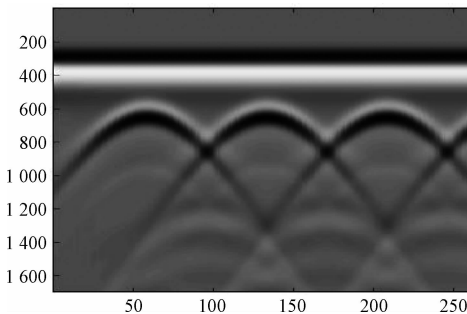


图 3 仿真结果

考虑到雷达本身回波数据中收发天线耦合波对解译的不良影响。将仿真结果的纵向前 500 道耦合回波数据去除, 同时为提高处理速度, 将回波图像采样均匀采样为 1 幅 256×256 的图像, 这样可以使用基-2 的快速正逆傅里叶变换。结果如图 4 所示。

考虑到移动平台计算能力的限制, 考察降低处理图像的分辨率对频率-波数域处理有着怎样的影响。分别对图 4 采用不同的间隔采样, 也就是采用频率-波数域偏移分别处理 256×256 、 128×128 、 64×64 这 3 幅图, 同时, 也要根据不同的道隔间对频率-波数域算法中测线长度参数进行修

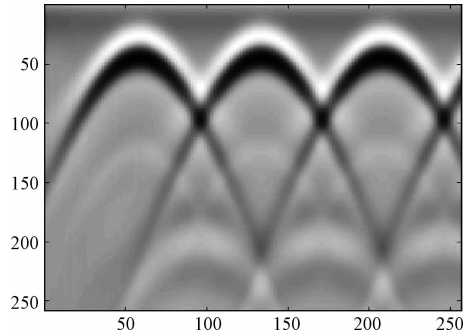


图 4 处理后的回波图像

改。结果分别如图 5~7 所示。

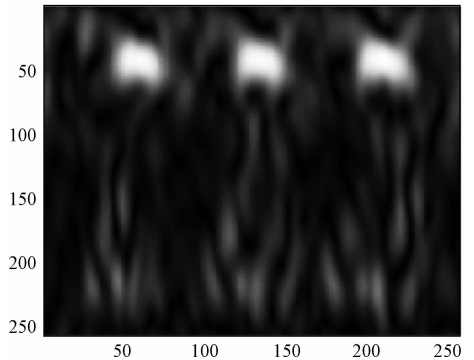


图 5 采样率为 256×256 时的结果

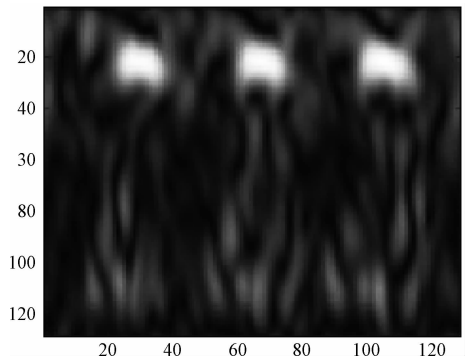


图 6 采样率为 128×128 时的结果

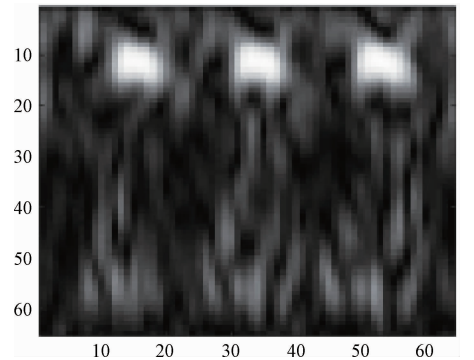


图 7 采样率为 64×64 时的结果

根据实测数据,实际回波数据的纵向前40个点是雷达收发天线耦合波数据,对其采取去除操作,剩余的216个点进行匀间隔采样,取出128个点。横向道数方面,对256道数据采取等间隔采样,取出128道数据。这样,就能使用基-2的FFT2D和IFFT2D运算。经测试,若对整幅图像(256×256)进行频率-波数域偏移处理,在移动平台需要至少60s才能得出结果,而采样后的128×128的图像进行频率-波数域偏移处理在测试手机平台(Google Nexus5)上只需要10s,

而且对于结果也并无太大影响,这极大提高了使用效率。

2 设计实现

研制基于安卓平台的墙体结构探测雷达系统分为2个部分:雷达硬件部分和安卓软件部分。手机终端通过蓝牙4.0对超宽带雷达系统进行参数设置,雷达工作后将雷达获得的数据传输至手机终端平台并进行显示。系统原理如图8所示。

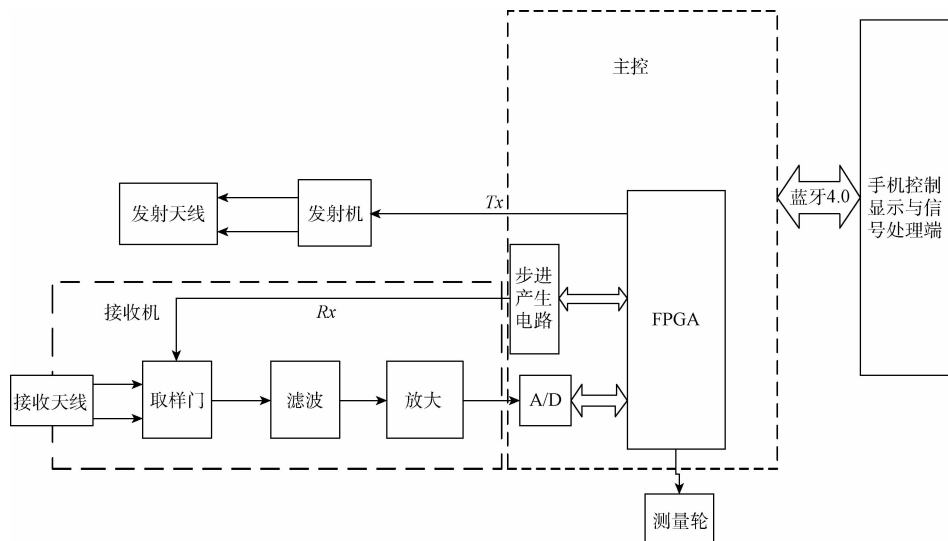


图8 系统原理

2.1 雷达系统模块

雷达系统主要由T/R天线、发射机、接收机、主控、以及测距离等组成。主控模块是基于可编程逻辑门阵列(FPGA)的,用于系统时序的产生和控制逻辑的实现。发射天线将发射机产生窄脉冲信号辐射,接收机接收反射波并通过A/D数字化后将结果返回给FPGA,主控模块产生接受和发射模块所需的各类信号。发射机采用阶跃恢复二极管产生高斯脉冲信号,辐射电磁波的频率为1.6GHz,天线采用平面蝶形偶极子天线,保证了良好的阻抗特性。接收机将回波经过宽带巴伦成为单端信号,然后使用LNA对信号进行放大,使之达到后端采样保持电路的输入要求。经过放大的回波信号再经过模拟采样保持电路模块,使用模拟采样门结合等效采样技术将射频信号转换为音频信号。而后经过A/D模块将信号数字化传输至主控模块。

GPR雷达的技术指标如表2所示。

2.2 软件开发

基于Android的探地雷达信号处理应用在Android Studio上进行开发。该软件通过蓝牙4.0与雷达建立连接,获得雷达采集的数据后将其绘制成单道波形图、灰度图,并将该数据通过SQLite存储在SD卡中指定文件夹内。同时软件利用前面的频率-波数域算法对墙内钢筋等目标进行成像和定位。软件运行时流程如图9所示。

表2 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
数据率	80 kbps
尺寸	17.5×12×6 cm

本系统中采用蓝牙作为数据交互的通道,安卓系统的框架层提供了足够的蓝牙控制和传输的API,使得开发者能方便地使用如下功能:扫描其他蓝牙设备、查询本地已经配对的蓝牙适配器、建立RFCOMM通道、通过服务发现来连接其他设备和在设备间传输数据等功能。同时,在建立连接时,App会向雷达设备发送控制字,设置雷达设备的采样率、工作模式等参数。

在软件中,使用SQLite作为数据存储与读写的媒介。SQLite是遵守ACID的关系型数据库管理系统,不同于常见的SQL数据库,SQLite是轻量型数据库,占用系统资源非常低,所以常用于嵌入式设备,同时其也支持主流系统。在安卓操作系统中,SQLite得到了系统层面很好的支持,

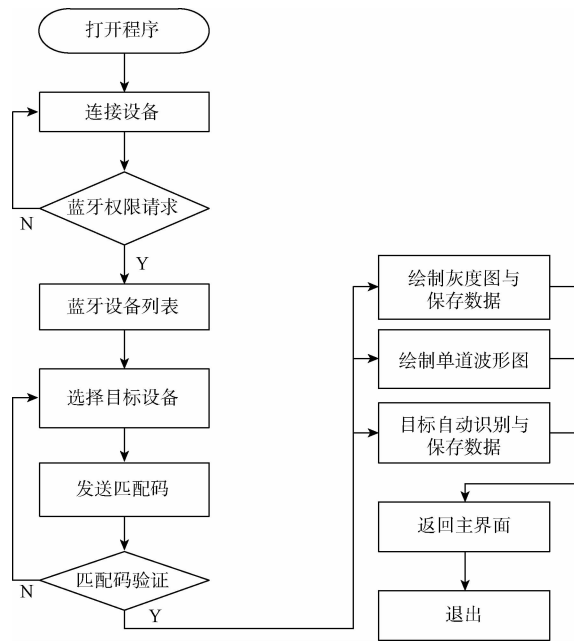


图 9 软件运行时流程

使用非常方便。经过测试,SQLite 可以满足数据 I/O 的需求。

由于涉及 FFT 和 IFFT,使得频率-波数域偏移成像算法在移动平台上运行非常耗时。所以针对移动平台对频率-波数域算法进行了优化。通过对原始数据进行等间隔采样减少了计算量。将原始的 256×256 的采集数据抽样为 128×128 ,同时也方便了采用基-2 的二维快速傅里叶正逆变换。在频率-波数域偏移处理中,涉及二维快速傅里叶变换和二维快速傅里叶逆变换,现有 Java 库中没有现成的 FFT2D 运算包,故开发了使用 Java 完成的 FFT2D 运算函数。

3 实验测试结果

为测试研制的墙体结构雷达的性能,对掩埋在混凝土中的钢筋和 PVC 管进行了测试。图 10 为测试的混凝土模型图。整个模型由上、下两个梯形组成,上半部分为混凝土层,下半部分为土层。在模型中不同高度掩埋了一些粗细和间距不等的钢筋和 PVC 管,在两层分界面有一模拟脱空区,内部填充泡沫,模型具体参数如表 2 所示。模型示意图如图 10 所示。

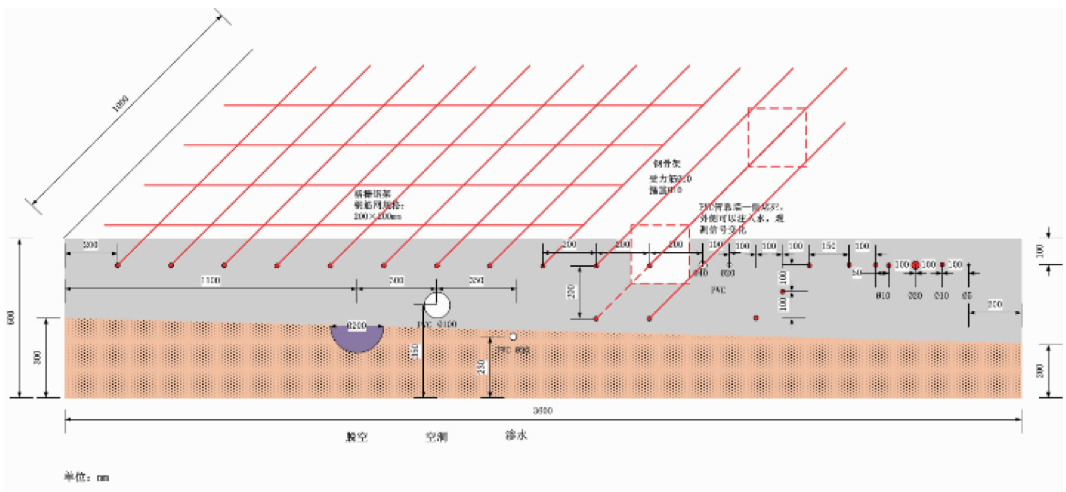


图 10 模型示意图

表 2 模型及掩埋目标参数

模型尺寸/cm	360×100×60
钢筋直径/mm	Φ10、Φ20
钢筋间距/cm	5、10、15、20
钢筋深度/cm	10、20、30
PVC 管直径/mm	Φ20、Φ40、Φ100
PVC 管深度/cm	10、25
脱空直径/mm	Φ200
脱空深度/cm	33

为墙体内部钢筋对雷达信号的反映。

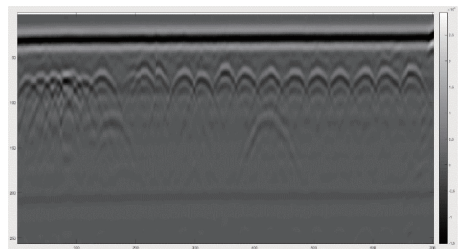


图 11 本套系统测试结果

图 11 是采用本套系统对同样的混凝土模型进行测试,图中可以很清楚的看到很多双曲线特征,这些特征即

为了与国际上同类产品的检测效果做对比,采用了美国的 GSSI(ground penetrating radar equipment)结构检测

小型雷达在该测试模型进行测试,这雷达的工作中心频率是 1.6 GHz,最大探测深度 50 cm。图 12 是美国 GSSI 雷达对混凝土模型的测试结果。

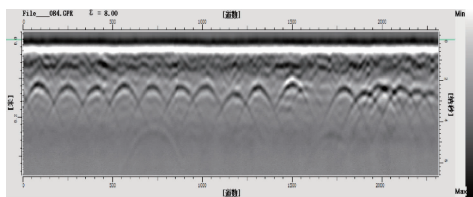


图 12 美国 GSSI 雷达测试结果

对比图 11 和图 12,从测试结果来看,在深度 100 mm 和间隔 50 mm 的极端情况下,两套系统均能分辨出两根加强钢筋,掩埋在混凝土中的 22 根钢筋和 3 根 PVC 管在雷达图像中都呈现双曲线的特征,它们在图中的位置信息和实际的位置是相符。另外两层分界面中的脱空也在图中很好的反映出来。因此,本套雷达和美国 GSSI 雷达的探测结果很一致,性能相当。

为进一步检测研制的雷达性能,对实际墙体内部钢筋进行了探测,如图 13 所示。雷达获得的结果在手机上实时显示。



图 13 检测过程

图 14 是实际墙面的雷达回波图,图中颜色的深浅代表了回波的强度,每点的位置代表了钢筋回波的反射的深度。一道弧代表了一根钢筋反射数据,从图上能清楚的看到钢筋目标。



图 14 实际墙面测试结果

在手机上对图像进行频率-波数域处理,处理结果如图 15 所示。根据优化后的频率-波数域偏移算法将结果显示,其中,色彩灰暗的地方代表了高置信度的钢筋存在。由于手机性能的限制,对上图 1 幅 256×256 的图像采用抽样操作,取得了 1 幅 128×128 的图进行处理,距离向对应了图 14

的前 6 个弧,可以看到,经过偏移处理的识别效果良好。

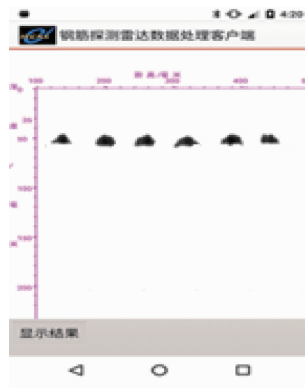


图 15 手机处理结果

4 结 论

针对混凝土内部目标材质的检测识别与设备便捷性的需求,研制出一套超宽带雷达和运行于手机平台的适配软件系统。该系统通过对混凝土中不同物质的电介质常数差异对墙体内部金属目标进行识别,同时通过消除直达波的干扰,使用频率-波数方法对目标能量进行了有效的聚焦,压制多次反射波,从而增强了目标的可判别性,得到墙体内部钢筋目标的准确信息。也考虑到在移动设备上计算力的瓶颈,对频率-波数方法进行了一些改进,使之能在较短的时间内得出识别结果。整套系统的研制,为墙体内部目标钢筋识别提供了方便快捷的手段。

参考文献

- [1] 蔡迎春,王复明,张蓓,等. 路面雷达厚度测试误差分析[J]. 公路交通科技,2006(4):25-26.
- [2] 焦登文. 混凝土无损检测技术应用及其发展趋势[J]. 商品混凝土,2009(2):58-60,65.
- [3] 潘延平,李庆,杨长城. 地质雷达在 PHC 预应力管桩桩顶锚固钢筋无损检测中的应用[J]. 建筑施工,2008,30(10):880-882.
- [4] 栗榛,叶盛波,高云泽,等. 基于安卓平台的小型化混凝土探测雷达系统[J]. 电子测量技术,2016,39(11):146-150.
- [5] 李仁海,杨磊,许新刚,等. 地质雷达探测技术在岩溶地形勘察中的应用[J]. 物探化探计算技术,2009,31(5):6-7,40-44.
- [6] 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,2015,28(9):1251-1265.
- [7] 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):743-748.

(下转第 57 页)