

doi: 10.11720/wtyht.2024.1030

尹达, 辛国亮, 孙学超, 等. 实时三维探地雷达关键技术的设计与实现[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 194-200. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1030>Yin D, Xin G L, Sun X C, et al. Design and implementation of key technologies for real-time three-dimensional ground-penetrating radar[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 194-200. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1030>

# 实时三维探地雷达关键技术的设计与实现

尹达, 辛国亮, 孙学超, 张友源, 张其道

(中国电子科技集团公司 第二十二研究所, 山东 青岛 266107)

**摘要:** 为了提高市政道路检测水平, 快速有效地解决市政道路塌陷灾害预警、市政管网分布查找等问题, 设计研发了一款实时三维探地雷达。实时三维探地雷达基于 FPGA&DSP 架构, 完成了多通道高速采集系统多个关键技术的设计与实现, 丰富了道路检测领域的探测技术和方法。实时三维探地雷达天线采用五发六收模式的水平极化方式, 实现了十通道雷达数据高速采集, 通道间通过高速开关实现切换, 所有通道以交互内插方式进行工作; 雷达最大可支持扩展到 32 通道工作, 用开关切换天线阵列, 满足 60 km/h (2cm 道间隔) 以上的探测速度。通过对空洞实验场和金属板实验场的实验数据进行对比, 验证了最佳的天线极化方式设计, 最终确定了天线的最优方案。实测结果表明, 相比于通用的 LTD-2600 型雷达, 实时三维探地雷达具有更高速的采集速度以及良好幅度与相位性能, 有利于改进道路灾害的检测技术, 具有较大的市场需求。

**关键词:** 三维探地雷达; 开关切换天线阵列; 多通道; 高速采集; 道路检测

**中图分类号:** TN98

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-8918(2024)01-0194-07

## 0 引言

当前城市道路塌陷隐患的无损检测主要依靠探地雷达技术。传统的二维探地雷达覆盖面积小, 只能获取测线下方地下结构的二维剖面图, 实际工程中地下介质的分布是具有三维空间性的, 单纯的二维剖面具有局限性, 无法对地下介质的情况进行全面、准确的分析<sup>[1]</sup>。三维探地雷达相较于传统的二维探地雷达能获取地下介质的详细空间分布情况并生成更加直观的水平切片图, 并能基于此对数据进行更精确的解释<sup>[2]</sup>, 是检测道路最为有效的技术手段。本文介绍了实时三维探地雷达一些关键技术的设计与实现, 正是基于这些技术实现了设备的高检测速度和高分辨率等性能, 能在快速完成道路检测工作的同时提供高密度的探地雷达数据, 帮助解释地下介质分布情况并辨认出塌陷隐患<sup>[3]</sup>。

## 1 三维探地雷达设计原理

### 1.1 实时采集设计

实时三维探地雷达在设计原理上仍然采用超宽带冲激脉冲体制, 其收发天线阵列按照一定空间布局进行组合, 通过时序控制交替工作, 最后通过数据合成算法实现大覆盖、高分辨率的三维探测效果。单次收发天线工作原理同二维探地雷达工作原理一致: 通过发射天线向目标检测物发射电磁波, 电磁波穿透检测目标后, 遇到不同的物体发生折射与反射; 通过接收天线将反射回来的回波信号放大、滤波、采集、处理, 最终通过探地雷达自带软件进行处理形成雷达图像。实时三维探地雷达舍弃了传统等效采样的采集模式, 解放了雷达的扫描速度和工作效率。而它对实时全波形采样的要求尤其重要, 需要在单个脉冲发射后, 在回波脉冲的时段进行瞬时采样, 相较于传统等效采样体制的接收机, 省去了雷达天线取样门电路, 系统更为简洁稳定<sup>[4]</sup>。图 1 所示为冲击脉冲雷达实时采样结构, 在工作时控制单元通过

收稿日期: 2023-01-30; 修回日期: 2023-10-18

基金项目: 基础性军工科研院所稳定支持项目(A132303219)

第一作者: 尹达(1988-), 男, 山东人, 高级工程师, 研究方向为地下目标探测识别、探地雷达信号研究与处理。Email: yindabox@126.com

时序控制模块来控制发射电路发出雷达脉冲信号  $P(t)$ ,  $P(t)$  与天线传递函数卷积后输出雷达发射信号, ADC 的高速时钟频率为  $1/T_d$ , 高速 A/D 在同步脉冲信号触发下对目标反射波  $r(t)$  进行高速采样, 得到数字信号  $V(n)$ , 完成实时采集。

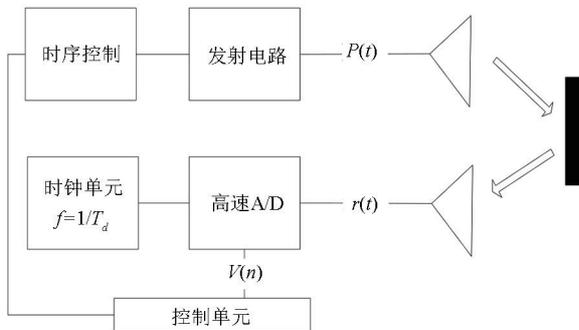


图1 冲击脉冲雷达实时采样结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of real-time sampling structure of impulse radar

传统探地雷达等效采样采集得到的信号  $v_{out}$  的计算公式为

$$v_{out}(T_d) = \int_{T_d}^{T_d+\Delta} r_{in}(t) dt = Cr_{in}(T_d), \quad (1)$$

式中:  $T_d$  为采样步进间隔;  $\Delta$  为采样保持电路高速开关关闭时间;  $r_{in}(t)$  为天线接收的信号;  $C$  为常数。在这种重复采样模式下, 每次发射脉冲过后, 运用可调的精准时延 ( $T_d$ ) 来对回波脉冲进行单次采样。如果  $\Delta$  远小于  $r_{in}(t)$  的变化率, 那么  $v_{out}(T_d)$  就实现了对  $r_{in}(t)$  的有效采样和保持。

等效采样模式下用低速 ADC 进行采样即可, 如此数字化的  $v_{out}(t)$  就转化成了  $V(n)$ , 即在  $T_d$  处的数字采样值。等效采样法需要多次 ( $N_p$  次) 发射冲击脉冲, 以实现回波脉冲的完全采样。将  $N_p$  个回波信号的采集值顺序排列, 就得到了高频雷达回波信号的一个变慢速的等效信号:

$$V(n) = \sum_{i=0}^{N_p-1} \delta(n-i)v_{out}(nT_d), \quad (2)$$

式中:  $\delta(n)$  为单位冲击脉冲;  $N_p$  为发射冲击脉冲次数。

实时三维探地雷达是基于实时采样的全波形数据采集, 经过巴伦的雷达回波信号经过射频前端的信号调理电路的增益放大、带通滤波等调理后, 根据信号频率范围滤除直流信号和低频信号, 将进来的单端信号调理成满足 ADC 输入范围的差分信号进行采集。式(3)为实时三维探地雷达采集得到的数字信号  $V(n)$  的计算公式:

$$V(n) = \sum_{i=0}^{N_p-1} \delta(n-i)r_{in}(nT_d). \quad (3)$$

实时三维探地雷达使用了高速 ADC, 省去了采样器部分, 将延时电路的激励桥式采样门的形式换位为高速时钟产生器, 该高速时钟频率为  $1/T_d$ , 作为 ADC 的输入。实时采样极大解放了等效采样的采集速度, 满足了当前三维阵列探地雷达系统的高速探测需求。

## 1.2 高速探测设计

三维探地雷达使用 GC400MHz 天线, 其最大工作重复频率为 128 kHz, 对于 GC400MHz 天线, 如果要达到较理想的时域探测效果, 采样率就要达到 20 倍左右, 最高采样率应为  $400 \text{ MHz} \times 20$ , 即达到 8 GHz 的采样频率。8 GHz 采样频率的样点之间时间间隔为 0.125 ns, 即采样点时间间隔  $T = 0.125 \text{ ns}$ 。设置时窗为 60 ns 时, 取样点数为:  $N = T_w/\Delta T = 480$  ( $T_w$  为时窗,  $\Delta T$  为采样点时间间隔), 则单通道天线最大扫描速率  $f_R$  为

$$f_R = f_{\text{PRT}}/N, \quad (4)$$

式中:  $f_{\text{PRT}}$  为天线重复频率;  $N$  为等效取样点数。

在实时采样技术体制下, 目前可以实现的高速采样速率可达 2.5 GSPS, 要实现 8 GHz 以上的采样频率, 可以通过延时重复发射 4 次信号来完成, 单通道 GC400MHz 天线的最大扫速可根据  $f_R = f_{\text{PRT}}/4$  得到  $f_R = 128 \text{ kHz}/4 = 32 \text{ kHz}$ <sup>[5]</sup>。考虑多通道分时工作, 按设计 10 通道来计算, 所有通道的最大扫速为  $32 \text{ kHz}/10 = 3.2 \text{ kHz}$ , 在道取样间隔为 2 cm 条件下, 最高行进速度(三维雷达探测速度)可达  $0.02 \text{ m} \times 3200 \times 3600/\text{h} = 230.4 \text{ km/h}$ 。按照极限设计 32 个通道的三维雷达, 所有通道的最大扫速为  $32 \text{ kHz}/32 = 1 \text{ kHz}$ , 在道取样间隔为 2 cm 条件下, 最高行进速度可达到  $0.02 \text{ m} \times 1000 \times 3600/\text{h} = 72 \text{ km/h}$ 。

综上所述, 即使考虑高速通道切换开关的影响, 所有通道以内插方式进行工作, 三维探地雷达亦满足 32 通道工作时 60 km/h (2 cm 道间隔) 以上的探测速度。

## 2 三维探地雷达系统的设计实现

三维探地雷达的采控系统为 FPGA&DSP 架构。FPGA 部分可以实现的硬件功能包括: 控制 AD 采集、DDR 数据缓存、上电时序控制、系统复位、串口 GPS 信息读取、电池电量 I2C 读取、编码脉冲信号读取以及温度传感器控制等, DSP 主要完成数

据处理部分。DSP 接收上位机的控制命令参数后,通过 FPGA 控制 ADC 采集触发时序,实现双通道数据采集,FPGA 将采集后的数据传给 DSP,经过 DSP 的预处理,实时上传至上位机;DSP 同时将 FPGA 读取的 GPS 信息、I2C 电池电量和串口编码轮相位信息等传至上位机。

2.1 采控系统基本组成

三维探地雷达采用高性能 ADC 芯片设计来对雷达回波信号直接进行实时采集处理,图 2 给出了其采控系统的基本组成。雷达回波信号经过天线接收机接收,经过巴伦调制后直接进入 AD9689 进行采集,采集的数字信号直接通过支持 JESD204B 协议的高速传输线进入 FPGA 中。FPGA 选用 Altera 公司的 10AX066H3F34I25G 芯片,经过简单的插值、滤波等处理,再由 SRIO 将数据

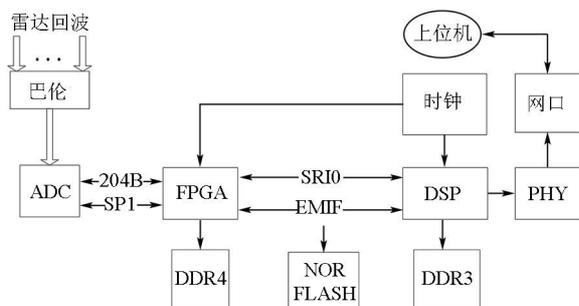


图 2 采控系统组成

Fig. 2 The composition of the system acquisition and control

传输到 DSP 芯片 TMS6678 进行进一步信号处理。FPGA 与 DSP 之间通过 EMIF 进行命令交互。DSP 接收到高速信号后进行信号处理、融合、打包,然后经由千兆以太网传输到上位机进行显示、存储,完成对雷达回波信号的采集与控制。

2.2 电源设计

三维探地雷达为外部输入供电,电源芯片选用 DC/DC 电源模块和 LDO 芯片。9~18 V 外部电源经由凤凰端子输入后,经过凌特的 LTM8049IY 与 LTM8055IY 分别实现 -12 V 和 +12 V 电源的转换输出(图 3)。+12 V 电源通过 LTM4644IY 转换成系统使用的各个电源:0.9、1.0、1.3、1.2、1.5、1.8、2.5、3.3、3.6 V 和 5 V,其中,1.2、1.5、2.5、3.3、3.6 V 和 5 V 电源经过 LDO 转换后给时钟、AD、FPGA、DSP 供电。电源有上电时序的要求,在电路设计中,按照芯片的电源上电次序要求进行设计,以保证系统正常工作。

2.3 时钟设计

板子有 3 个 SMA 口,其中 1 路为时钟输入,2 路为时钟输出。时钟芯片采用 HMC7044 和 SI5391A, HMC7044 主要提供 JESD204B 时钟, SI5391A 主要负责提供除 JESD204B 时钟以外的板内的其他时钟。时钟设计框图如图 4 所示。HMC7044 与 SI5391A 的功能参数由 FPGA 进行寄存器配置来实现。

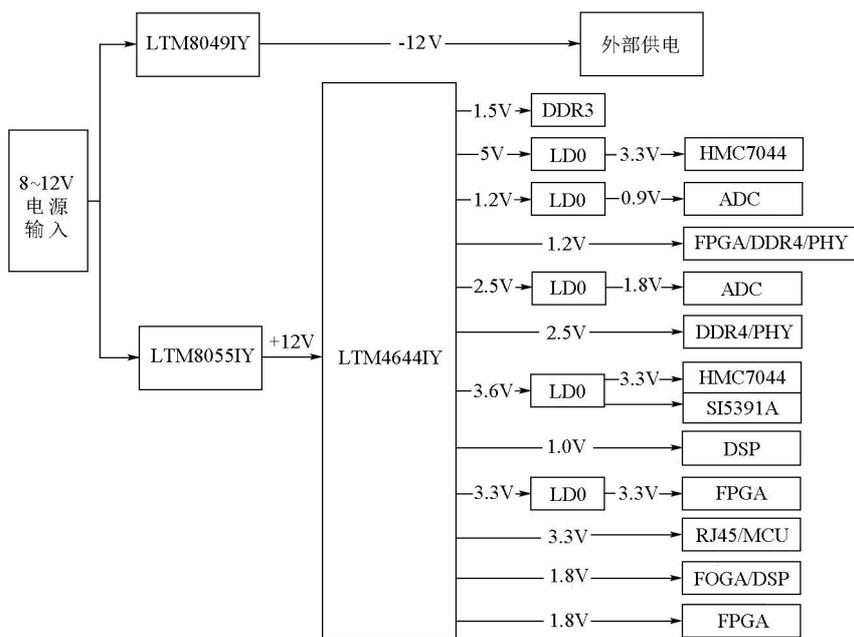


图 3 系统供电设计

Fig. 3 The design of system power supply

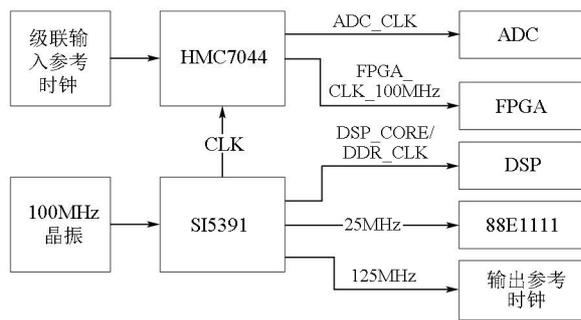


图 4 系统时钟设计

Fig. 4 The design of system clock

## 2.4 天线设计

电磁波的极化其实并不总是确定的,我们接收到的雷达信号在观测期间状态基本不变,可以认为是完全极化波。设雷达波水平方向  $x$  的分量为  $E_x$ ,垂直方向  $y$  的分量为  $E_y$ ,则雷达波沿  $+z$  方向传播时,其电场的复矢量表示为:

$$\mathbf{E}(z) = E_x(z)e_x + E_y(z)e_y, \quad (5)$$

$$E_x = E_{x0}\cos(\omega t - k_z + \varphi_x), \quad (6)$$

$$E_y = E_{y0}\cos(\omega t - k_z + \varphi_y), \quad (7)$$

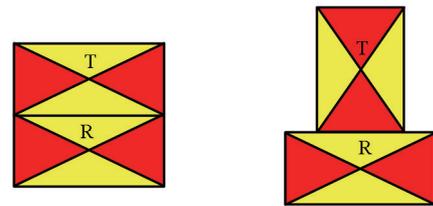
式中:  $E_x$ 、 $E_y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向的单位矢量;  $E_{x0}$ 、 $E_{y0}$  分别为  $x$ 、 $y$  分量信号的幅度值函数;  $k_z$  为传播中的相位延迟值;  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$  为初相。令  $\theta = \omega t - k_z$ , 则:

$$E_x = E_{x0}\cos(\theta + \varphi_x), \quad (8)$$

$$E_y = E_{y0}\cos(\theta + \varphi_y). \quad (9)$$

合理的极化方式可以改善雷达目标的检测性能,也可以完成对杂波信号的抑制,能够在极化域内有效地滤除干扰和杂波信号,增强目标回波信号,从而达到提高目标检测性能的目的。本系统的天线是阵列天线,接收机与发射机适合的天线极化方式为水平极化(HH)和垂直极化(VV)。其中,HH极化方式的发射天线与接收天线的垂直距离是 14 cm,相邻的接收天线之间的距离是 28 cm;VV极化方式的发射天线与接收天线的垂直距离是 28 cm,相邻的接收天线之间的距离是 14 cm。这里的水平极化与垂直极化与空中雷达的定义有一定的区别,天线收发机排布方式如图 5 所示,图中 T 表示发射天线,R 表示接收天线。

三维探地雷达的天线阵列采用吸波材料进行渐变加载的方式对天线进行加载,使天线加载过度更加平缓,从而达到类似行波天线的性能,减少系统的拖尾震荡和振铃反应。为了增加天线的辐射效率,尽量增加天线的辐射面积,对传统平面偶极子天线进行了变形,对天线进行 Vee 设计,达到 V 行偶极子天线,通过束缚 V 型偶极子的天线夹



(a) 水平极化方式

(b) 垂直极化方式

图 5 天线阵子排布示意

Fig. 5 Antenna array layout with different polarization mode

角,使天线具有更好的方向性和更大的增益。同时,为了拓宽天线频带,该天线较其他该类型天线具有较宽的频带宽度,并且在频带内阻抗变化较小,辐射效率最高。

三维探地雷达 10 个通道的数据由五发六收的天线完成,每个发射天线均带有一个发射机。工作时,每个天线的发射机收到三维雷达主机的控制信号,将信号转换成高幅度脉冲信号,发射机通过发射天线发射超宽带冲击脉冲信号,脉冲幅度不小于 220 V,脉冲电磁波在介质中传播,遇到环境特性不同的界面时产生反射与散射。接收天线接收反射或散射信号,将信号送入采集板卡采集回波信号,通过阵列信号分析,得到地下深层目标的三维信息。发射机的皮秒级脉冲主要通过雪崩三极管和阶跃恢复二极管实现,其中阶跃恢复二极管所产生的脉冲上升时间可以达到几百皮秒到几个纳秒,但其幅度较小,一般为几伏;雪崩三极管的脉冲上升沿时间可达几纳秒且具有上百伏的电压,有利于探地雷达深层目标探测。本系统选用雪崩三极管产生发射机需要的发射脉冲。

关于发射天线与接收天线的极化方式的性能问题,分别在空洞实验场和金属板实验场两个不同的场景下进行分析(图 6、图 7)<sup>[4]</sup>。

空洞实验场土壤的介电常数为 10,空洞目标长为 0.4 m,半径为 30 cm;雷达发射天线中心频率为 400 MHz,三维探地雷达在目标上方中心测线进行探测。分别取 HH 极化左右两侧的 2 个典型单道波形(Rx1,Rx2)与 VV 极化进行波形特性对比,得到如图 6 所示的不同极化下单道波形的回波。

金属板试验场使用长为 1 m,宽为 0.8 m 的金属板,在金属板的中心点正上方 2 m 处进行探测。分别取 HH 极化左右两侧的 2 个典型单道波形(Rx1,Rx2)与 VV 极化进行波形特性对比,得到如图 7 所示的不同极化下单道波形的回波。

从单道波形对比图可以看出,HH极化方式左

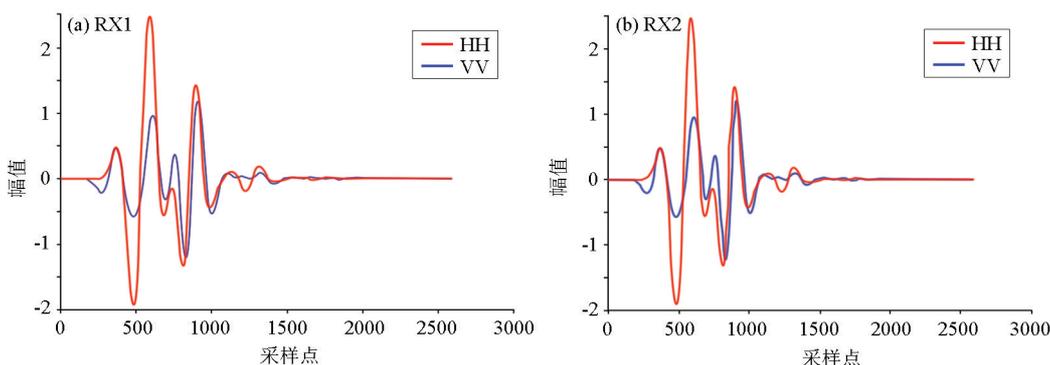


图 6 不同极化方式的空洞波形对比

Fig. 6 The comparison of cavity waveforms in different polarization modes

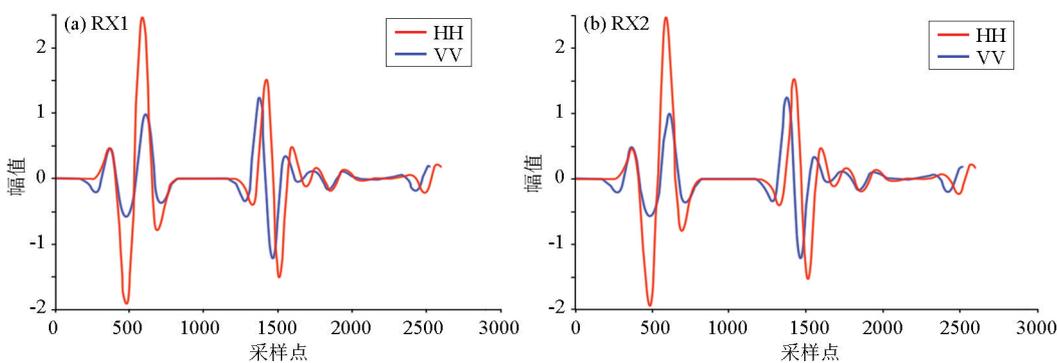


图 7 不同极化方式的金属板波形对比

Fig. 7 The comparison of waveforms of metal plates with different polarization modes

右两侧的直达波和反射波能量均大于 VV 极化方式,性能更好。所以三维探地雷达的天线阵列采用水平极化方式,天线阵列共 10 个通道,为五发六收模式,阵列雷达天线的排布如图 8 所示。

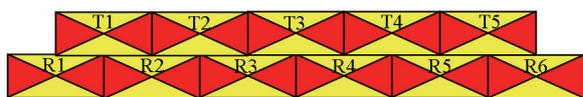


图 8 水平极化方式五发六收天线阵列排布示意

Fig. 8 The antenna array layout of five transmitter and six receiver horizontal polarization method

5 个发射机发射 10 组雷达脉冲信号。然后由 6 组接收机接收反射回来的回波信号,中间 R2、R3、R4、R5 通道 4 个接收机各复用一次,此过程由 FPGA 控制开关切换实现。最终,接收的 10 组回波信号经过高频控制开关分时选择性地进入采集系统,完成模数转换。水平极化的三维探地雷达天线回波信号接收过程如图 9 所示。

2.5 采集传输设计

三维探地雷达的采集主要由 AD9689 完成。AD9689 支持宽泛的输入带宽,具有快速的采样率、卓越的线性度以及较低的功耗,用户可以根据下变

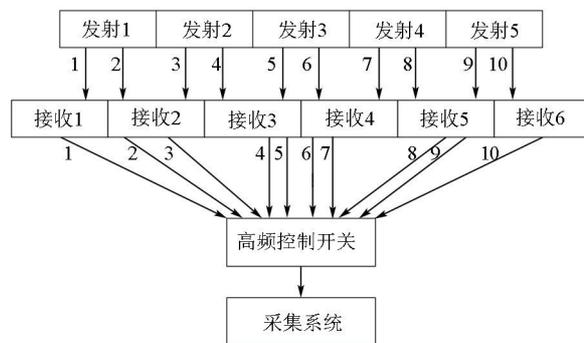


图 9 天线回波信号接收控制流程

Fig. 9 The control process for receiving rcho signals from radar antennas

频器 (DDC) 配置和接收逻辑器件的可接收线速,在各种单线、双线、四线和八线配置中配置基于子类 JESD204B 的高速串行化输出,支持高达 16 Gbps 的通道速率。

数据输出通过交叉复用器从内部连接到 4 个数字 DDC,每个 DDC 包括多级联信号处理级、48 位变频器(数控振荡器,NCO)以及抽取率。NCO 允许在通用输入/输出 (GPIO) 引脚上选择预置频段,最多可以选择 3 个频段。

模拟信号经过 AD9689 采集后,采集的数字信

号直接通过支持高速传输 JESD204B 协议的传输线进入 FPGA。在 FPGA 中拼接完成的数据经 SRIO 传输到 DSP 中,经过必要的数据处理后,经千兆高速网络上传至上位机。

### 3 三维探地雷达系统的性能分析与验证

将三维探地雷达与通用的 LTD-2600 型单通道探地雷达进行性能对比。三维探地雷达与 LTD-2600 型探地雷达设置同样的参数:时窗 85 ns、采样点数 512、扫速 256、天线频率 400 MHz、无滤波,400 MHz 天线对空工作,进行对空直藕波、铜板反射波的采集性能验证实验。在 MATLAB 中显示两种雷达回波的波形比较图,量化运算处理后如图 10 所示,图中曲线为 1 800 道典型数据的叠加结果。因为三维探地雷达的 10 通道数据均由同一片 AD 芯片采集,整个系统在同一时钟域内,所有通道数据幅度与相位高度重合,相位稳定度优于

LTD-2600 型探地雷达的数据。

图 11 为量化后 LTD-2600 型雷达与三维探地雷达 1 800 道数据中最大值、最小值的各自分布,从图中可以清晰看出三维探地雷达的峰值分布更加均匀集中,幅度与相位一致性更好。

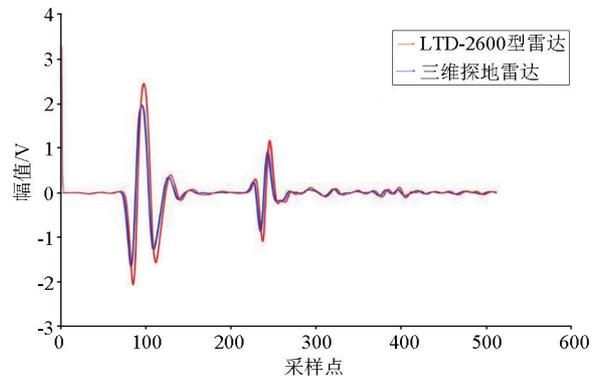


图 10 LTD-2600 型雷达与三维探地雷达波形叠加对比  
Fig. 10 Comparison of waveform superposition between LTD-2600 radar and 3D ground penetrating radar

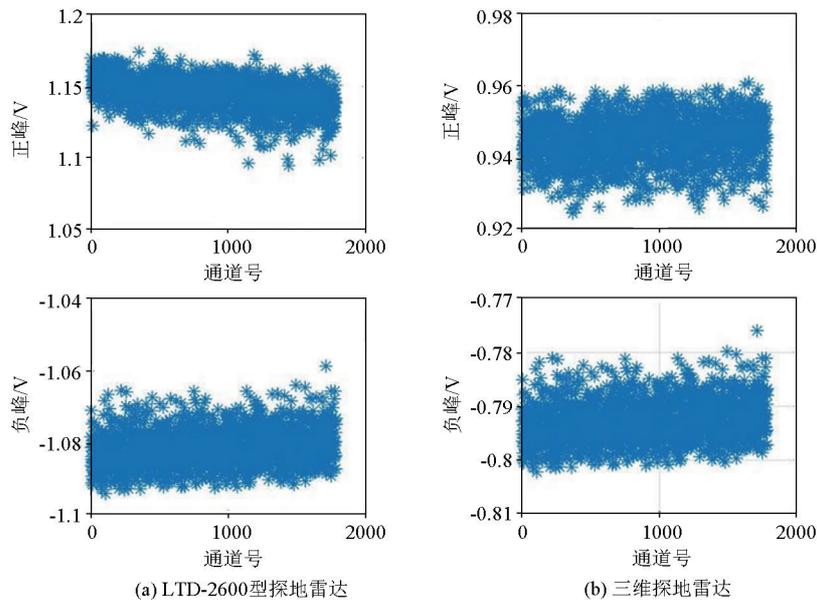


图 11 LTD-2600 型雷达与三维探地雷达反射波正峰、负峰值分布  
Fig. 11 The distribution of positive and negative peaks of reflection waves from LTD-2600 radar and 3D ground penetrating radar

表 1 为 LTD-2600 型雷达和三维探地雷达 1800 道雷达反射波正峰、负峰的振幅抖动与时间抖动的统计运算结果。由表 1 可见:三维探地雷达的正峰时间抖动和负峰时间抖动均为 0%,说明相位一致性较好。三维探地雷达输出的发射触发信号上升沿时间为 1 ns,脉冲宽度 1~1 000 ns 可调,调节精度为 1 ns,抖动标准差为 35 ps,其时钟信号输出幅度  $\pm 1.5$  V,抖动 3 ps,性能较好,实测结果表明同源的时间抖动非常低,几乎没有。故三

表 1 雷达抖动性能对比

Table 1 Comparison of radar jitter performance

设备型号	正峰时间抖动	负峰时间抖动	正峰振幅抖动	负峰振幅抖动
LTD-2600 型雷达	1.17%	1.81%	4.31%	5.92%
三维探地雷达	0	0	4.64%	3.56%

维探地雷达的单通道采集的反射波信号时间抖动性能优于 LTD-2600 型雷达,而其幅度抖动性能与 LTD-2600 型雷达相当<sup>[6]</sup>。

## 4 结论

1) 实时三维探地雷达通过五发六收模式的天线实现十通道雷达数据的高速采集,采用水平极化的天线排列具有更有效的探测效果,具有检测速度快、测量精度高、系统稳定、操作简便等优点<sup>[7]</sup>。

2) 与传统的探地雷达相比,实时三维探地雷达的回波时间抖动效果更好,波形一致性更佳,探测速度更快。

3) 数据显示可以以三维体数据的形式以及时间/深度切片的形式进行显示,更加直观高效。根据这个三维数据体就能给出地层的立体图像。在利用不同方向、位置剖面解释的同时,也可利用由浅至深,一层层的水平切片图进行解释,还可以利用三维数据进行属性解释。

### 参考文献 (References) :

- [1] 王方力,张群英,叶盛波,等.一种基于SAA的三维探地雷达系统[J].现代雷达,2020,42(9):21-27.  
Wang F L, Zhang Q Y, Ye S B, et al. A three-dimensional imaging ground penetrating radar system based on SAA[J]. Modern Radar, 2020, 42(9): 21-27.
- [2] 许泽善,周江涛,刘四新,等.三维步进频率探地雷达在沥青层厚度检测中的应用[J].物探与化探,2019,43(5):1145-1150.  
Xu Z S, Zhou J T, Liu S X, et al. The realization of applying 3D frequency stepped ground penetrating to the detection of asphalt layer thickness [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(5): 1145-1150.
- [3] Harry M Jol. 探地雷达理论与应用[M].雷文太,童孝忠,周畅,等译.北京:电子工业出版社,2011.  
Harry M Jol. Ground penetrating radar: Theory and applications [M]. Lei W T, Tong X Z, Zhou Y, et al translate. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011.
- [4] 贺靖,周斌,方广有.双通道伪随机编码超宽带探地雷达主机设计[J].电子测量技术,2022,45(11):1-9.  
He J, Zhou B, Fang G Y. Design of a pseudo-random coded ultra-wideband dual-channel ground penetrating radar controller [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(11): 1-9.
- [5] 程江洲,陈秋航,卞九洲,等.探地雷达技术在变电站地层隐蔽管线探测中的应用[J].现代雷达,2021,43(2):82-88.  
Cheng J Z, Chen Q H, Bian J Z, et al. Application of ground penetrating radar to substation concealed pipeline detection [J]. Modern Radar, 2021, 43(2): 82-88.
- [6] 罗传熙,张肖宁,虞将苗,等.基于三维探地雷达对沥青路面厚度检测影响因素分析[J].公路,2021,66(1):95-99.  
Luo C X, Zhang X N, Yu J M, et al. Analysis on influencing factors of asphalt pavement thickness detection based on 3D ground penetrating radar [J]. Highway, 2021, 66(1): 95-99.
- [7] 薛策文,冯晖,李晓天,等.全极化探地雷达多极化数据融合分析研究[J].雷达学报,2021,10(1):74-85.  
Xue C W, Feng X, Li X T, et al. Multi-polarization data fusion analysis of full-polarimetric ground penetrating radar [J]. Journal of Radars, 2021, 10(1): 74-85.

## Design and implementation of key technologies for real-time three-dimensional ground-penetrating radar

YIN Da, XIN Guo-Liang, SUN Xue-Chao, ZHANG You-Yuan, ZHANG Qi-Dao  
(nd22 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Qingdao 266107, China)

**Abstract:** To improve the detection level of municipal roads for rapid and effective municipal road collapse warning and rapid search for municipal pipe network distribution, the 22<sup>nd</sup> Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation designed and developed real-time three-dimensional ground-penetrating radar (3D GPR). With the real-time 3D GPR, which is based on the architecture of field programmable gate array and digital signal processor (FPGA&DSP), the institute achieved the design and implementation of several key technologies for the multi-channel high-speed acquisition system, enriching the road detection techniques and methods. The real-time 3D GPR enables high-speed acquisition of ten-channel radar data using the horizontally polarized antennae equipped with five transmitters and six receivers. The channels can be switched using high-speed switches, which operate in an interactive interpolation manner. The 3D GPR allows for up to 32 channels and detection speeds of above 60 km/h (channel interval: 2 cm). This is attributed to the switching of the antenna array using switches. The optimum antenna polarization design was verified by the comparison of experimental data from cavity- and metal-plate-based experimental sites. As a result, the optimal antenna scheme was determined. The measured results show that, compared to general LTD-2600 radar, the real-time 3D GPR boasts a higher acquisition speed and higher performance in terms of amplitude and phase, conducive to the improvement of road disaster detection technologies. Therefore, there is high market demand for the real-time 3D GPR.

**Key words:** three-dimensional ground-penetrating radar; antenna array switching using switches; multichannel; high-speed acquisition; horizontal polarization mode