

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209028

超深定向钻孔雷达采控系统设计与测试研究*

李涛涛¹ 许献磊² 何宇¹ 王鹏杰¹ 白崇文²

(1.萍乡学院机械电子工程学院 萍乡 337055; 2.中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室 北京 100083)

摘要: 钻孔雷达有效解决了探地雷达探测深度和精度相矛盾的问题。为实现钻孔雷达对异常体的精细化、定向探测,文中对超深定向钻孔雷达的数据采集与控制系统进行设计。首先设计了钻孔雷达定向探测功能模块,由陀螺仪、单片机和步进电机组成闭环控制单元,PID控制算法依据实时角度与设定角度偏差确定电机控制参数,再由电机驱动“双套管”机械结构完成定向;接着围绕STM32F407主控设计了雷达收发脉冲控制电路、雷达反射波信号采集电路等;最后测试分析了系统收发机触发脉冲等关键信号,并利用定向钻孔雷达开展了实地模型和煤矿掌子面探测。结果表明,系统满足定向钻孔雷达功能需求,关键信号实测评价指标与理论值最大偏差仅9.8%;定向钻孔雷达可精确测得目标体的方位、深度等信息,可准确定位煤岩分界面。

关键词: 钻孔雷达;超深定向探测;数据采集与控制系统;STM32F407

中图分类号: TH763 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Data acquisition and control system design and tests of borehole ground penetrating radar for ultra-deep orientated detection

Li Taotao¹ Xu Xianlei² He Yu¹ Wang Pengjie¹ Bai Chongwen²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Pingxiang University, Pingxiang 337055, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: Borehole ground penetrating radar (BGPR) can effectively solve the contradiction between detection depth and accuracy of traditional ground penetrating radar. In order to realize orientated detection and accurate location of geologic anomalous body with BGPR, the data acquisition and control system of BGPR for ultra-deep orientated detection is designed in this paper. Firstly, the orientated detection functional module including control unit, control algorithm and mechanical structure is researched. The closed-loop control unit is composed with gyroscope, one-chip computer and stepper motor. The control algorithm is PID, which can determine the motor control parameters according to the deviation between the real-time angle acquired from gyroscope and the setting detection angle. Then the motor drives the “double tubes” mechanical structure to finally realize orientated detection. Secondly, the radar transmit-receive pulse control circuit, radar reflected wave signal acquisition circuit and communication circuit are designed, whose main control chip is STM32F407. Finally, the key signals of the above system such as the transmit and receive trigger pulses are tested and analyzed, and the field model and coal mine working face detection are carried out using the orientated detection BGPR, which is equipped with the above-designed system. The signal test results and detection results show that the novel system can fully meet the functional requirements of orientated detection BGPR, and the maximum deviation between the measured and theoretical values of key signal evaluation indexes is only 9.8%. In addition, the orientated detection BGPR can accurately detect the positional information such as the depth and orientation of the target, and can also accurately locate the interface between coal seam and rock stratum.

Keywords: borehole ground penetrating radar; ultra-deep orientated detection; data acquisition and control system; STM32F407

0 引言

随着城市地下空间安全检测、地下油气资源勘探以及

煤矿开采超前探测等领域^[1-3]对地质雷达探测深度和精度的要求不断提高,常规地质雷达贴地探测“测深则精度低,测浅则精度高”,显然无法满足深地高精度探测需求。利用

收稿日期:2022-02-17

* 基金项目:江西省自然科学基金(20212BAB214047)、煤炭资源与安全开采国家重点实验室开放课题(SKLCRSM20KFA08)、江西省教育厅科学技术研究项目(202710)资助

超深钻孔开展孔中地质雷达探测的方式,因其在探测深度和精度上均有上佳表现,而被广泛应用于上述领域中。这类孔中探测地质雷达也被叫做钻孔雷达^[4]。

传统的钻孔雷达由于发射和接收天线都是全方位的,因此只能探得地质目标体的深度和离孔轴心距离信息,无法判断目标体具体方位。实际工程中,往往需要精确知道目标体的方位,为此,进一步发展出了定向钻孔雷达。定向钻孔雷达有两种实现方式:1)圆周阵列多个接收天线,通过分析每个天线的波至时间、相位等信息来确定目标体方位^[5];如文献[6-8]构建了一套由1个发射天线和4个圆周阵列接收天线组成的定向钻孔雷达收发系统,对4个接收天线信号的微弱差异,利用反正切法、改进残差法或BS-MUSIC计算目标体的方位角。2)采用定向的发射和接收天线,当出现反射电磁波异常时,电磁波的接收方向即为目标体方位^[9];如赵青等^[10]采用分布介质加载和集中电阻加载宽带小型化技术,设计了一套钻孔雷达四方向的定向天线。两种方式的定位精度分别取决于定位识别算法和收发天线性能。

对于配备有定向收发天线的定向钻孔雷达而言,除了优化天线电磁波指向性之外,天线方向控制是关键,一方面要保证探测方向的稳定性,另一方面要根据需求保证探测方向可调。现有研究多集中在天线指向性优化方面^[11-12],缺少对天线方向控制系统研究,具有控向性能的钻孔雷达数据采集和控制系统较少。王伟等^[13]利用FPGA和高速DAC设计了伪随机编号信号超宽带探地雷达控制系统;许会等^[14]利用FPGA设计了探地雷达的复杂时序控制系统,并由DSP作为主控完成指令控制和数据后处理。华枝发等^[15]基于TCP协议设计了一种高频地波雷达无线数据传输系统,解决了有线传输维护、成本等诸多不足。

该文对超深定向钻孔雷达的数据采集和控制系统进行设计,包括钻孔雷达的定向探测单元模块、雷达收发脉冲控制电路和雷达反射波信号采集电路,并对系统关键信号进行了测试分析,开展了实地模型和煤矿掌子面探测,验证系统功能。本系统设计与测试研究为钻孔雷达的超深、定向和精细化探测提供了核心技术支撑。

1 钻孔雷达探测原理与组成

钻孔雷达是地质雷达的一种特殊类型,具有相同的探测原理,继承了传统地质雷达在精度、效率等方面的优点。区别在于前者工作在已有的钻孔中,可满足深部地质体的精细化探测。图1为钻孔雷达工作原理及组成示意图,系统包含钻孔雷达、收放线车、主机以及辅助装置。实际工作时,钻孔雷达放置在钻孔中,通过传输线缆实现与孔外主机之间的数据通信,线车收放线长度可确定钻孔雷达入孔深度(z)。钻孔雷达发射天线向外发射电磁波,当电磁波遇到电性参数差异较大的介质时发生反射,反射信号被接收天线接收,并由地面主机记录,对比接收信号在走时(t)上的

参数差异来判断异常体位置(x),如下:

$$x = \sqrt{v^2 t^2 - w^2} / 2 \approx vt / 2 \quad (1)$$

式中: v 为电磁波在介质中的传播速度; w 为收发天线间距,当 $x \gg w$ 时, w 可忽略。已知钻孔雷达入孔深度(z)和异常体位置(x)信息,在缺少天线探测方向的情况下,只可确定异常体在地下空间的二维环线(f)位置,无法精确到具体的三维坐标,为此文中研究了可确定天线探测方向(θ)的定向钻孔雷达。

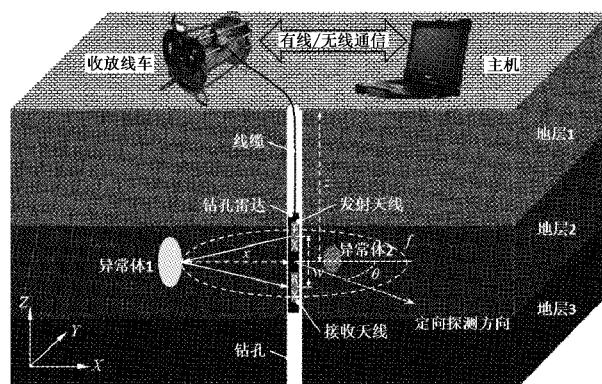


图1 钻孔雷达探测原理及组成

2 钻孔雷达定向探测功能模块设计

由钻孔雷达探测原理可知,一般探测由于无法跟踪或指定天线的探测方向,而无法精确定位异常体的空间位置。为此定向钻孔雷达在普通钻孔雷达的基础上添加了定向探测模块,通过设计定向探测机构,增加天线位姿监测和控制单元、设计定向探测控制算法,最终实现钻孔雷达的定向探测,具体实现流程如图2所示。

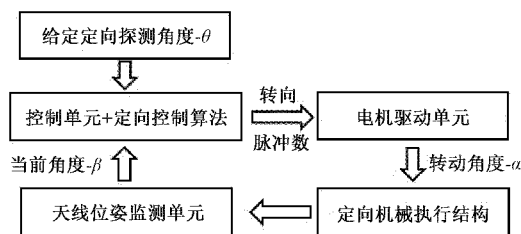


图2 定向探测功能模块实现流程

2.1 定向探测机械结构设计

定向探测的机械结构是实现天线定向的执行机构,当探测方向与指定方向发生偏差时,需要其执行纠偏动作。考虑钻孔雷达原有的管状设计,定向钻孔雷达的定向机构整体设计为同轴的内、外双套管结构,如图3所示,图中对部分结构进行了局部剖视和放大处理。内管中安装了钻孔雷达主要的核心部件,包括控制单元、位姿监测单元、雷达辐射面和驱动电机等。内管两端分别与内管连接件1、2固定连接,其中内管连接件1的管内断面上固定了驱动电机,内管连接件2内装导电滑环、外套轴承。外管上端与前述轴承连接,下端与外管连接件连接,穿过内管连接件1的电

机转轴固定在外管连接件上。实际工作时,当探测方向发生偏离,控制单元驱动电机转动,使得内外管发生相对反向运动,进而实现定向探测角度的纠偏。

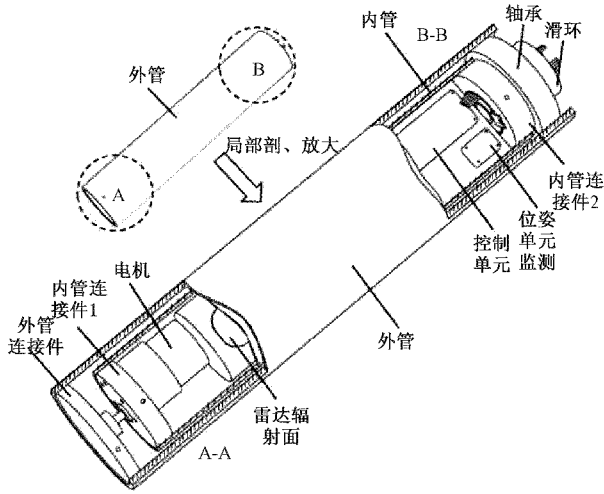


图 3 定向探测机构设计图

2.2 定向探测控制单元设计

定向探测的控制单元实时采集天线位姿数据,根据位姿数据和设定的天线探测角度信息,利用定向探测控制算法解算出驱动电机转动的方向、脉冲等参数,进而实现角度纠偏。控制单元主控选用 STM32F407 芯片,天线位姿数据通过 MPU9250 运动传感器获得,MPU9250 通过 I²C 总线与主控连接。执行电机选用 12 V、30 rpm 的微型可调速正反转直流减速电机,配备 TB6615FNG 电机驱动器。主控的 1 个定时计数器引脚、2 个普通输入输出引脚分别作为电机驱动的方向和速度控制引脚,与 TB6615FNG 驱动器相连接。驱动器的电机输出引脚与所选用的减速电机连接,将包含转向控制、速度调节信息的模拟驱动电压传入电机,控制电机转动。电源驱动模块需要提供 3.3 V、5 V 和 5~12 V 的电压。定向探测控制单元设计如图 4 所示。

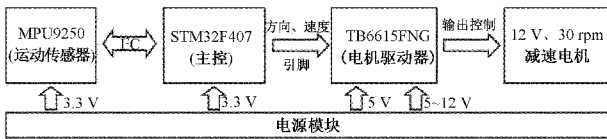


图 4 定向探测控制单元设计

2.3 定向探测控制算法设计

定向探测控制算法目的是解决天线在偏离指定探测方向时,如何“指导”定向机构,快速、准确地纠正角度偏差,以实现钻孔雷达定向、稳定探测。结合图 2 中定向探测功能模块的闭环实现流程,对定向控制算法的设计主要是基于 PID^[16-17] 的控制思想。现有的钻孔雷达探测主要应用于竖直孔和水平孔探测,可通过 MPU9250 控制器实时获取雷达天线在孔内的旋转角度,在竖直孔和水平孔探测时,分别以 MPU9250 中陀螺仪的航向角和圆滚角作为天线的旋转

角 α ,相应的角加速度为 $\varphi(t)$ 。指定探测方向角度为 θ ,则任意 t 时刻, θ 与实时旋转角 $\alpha(t)$ 之间的差值 $e(t)$ 为:

$$e(t) = \theta - \alpha(t) \tag{2}$$

依据 $e(t)$ 的正负取值,确定电机驱动器方向控制引脚的配置。由 PID 控制算法可知,主控输出控制电机转速的 pwm 波占空比值 $p(t)$ 为:

$$p(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(x) dx + K_d \varphi(t) \tag{3}$$

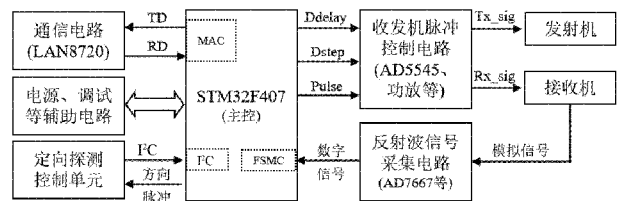
式中: K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例系数、积分系数和微分系数。上式离散化后得到位置式 pwm 波占空比值 $p(k)$ 。相邻两次位置式占空比求差值,得到增量式 pwm 波占空比值 $\Delta p(k)$:

$$\Delta p(k) = (K_p + K_i)e(k) - K_p e(k-1) + K_d(\varphi(k) - \varphi(k-1)) \tag{4}$$

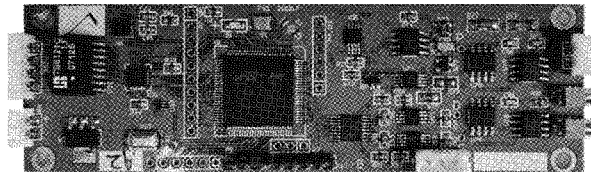
电机调速 pwm 波满载为 500,陀螺仪角速度输出最大值为 1 000,在偏离探测方向正负 180° 范围内,确定定向控制算法的 K_p 、 K_i 、 K_d 取值分别为 1.8、0.2、0.3。

3 定向钻孔雷达数据采集与控制系统设计

数据采集与控制系统是整个定向钻孔雷达的核心,实现了雷达天线发射机和接收机脉冲信号的产生、雷达反射波信号的采集以及钻孔雷达与主机的数据通信等功能。系统与定向探测控制单元共用相同的 STM32F407 主控芯片,收发脉冲产生电路主要由 AD5545 芯片和运放器件组成,实现触发脉冲控制输出;反射波信号采集电路主要由 AD7667 芯片和主控自带的 FSMC 控制器组成,完成雷达反射波信号采集;通信电路选用 LAN8720 网络芯片和主控自带 MAC 组成以太网通信链路,完成雷达数据的上传和采集控制命令的下达。系统设计和实物如图 5 所示。



(a) 系统设计



(b) 系统实物

图 5 数据采集与控制系统

3.1 雷达收发脉冲控制电路设计

雷达收发脉冲控制电路用于产生天线收发机工作所需的触发脉冲对。该脉冲对要求为负尖脉冲,下降沿触发工作,下降时间小于 25 ns,幅度大于 15 V。由于反射波信号

采集选择等效采样的方式,对单个反射波只采集某一时刻的单点信号,经数次采集后还原真实反射波信号,为此收发机触发脉冲对之间需要有周期的、恒定递增的延迟时间。为产生上述脉冲对电路整体设计如图6所示。

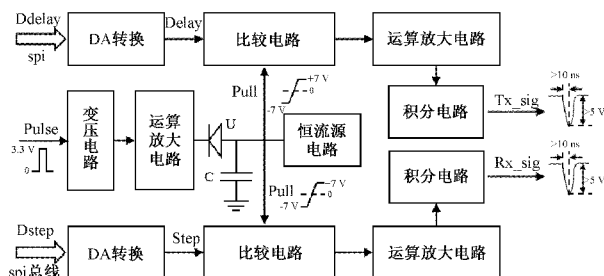


图6 雷达收发脉冲控制电路设计图

主控输出三路信号 Pulse、Ddelay、Dstep。Pulse 为触发脉冲信号,从普通引脚输出,脉宽约 600 ns,脉冲电压从 0 V 上升到 4~5 V,脉冲频率即信号等效采样频率,频率由主控定时器中断控制。Pulse 脉冲信号经变压和运算放大后驱动能力增强,在二极管 U 阴极形成至少 -7~+7 V 的脉冲电压。二极管 U 阳极连接恒流源电路和电容 C,当电容 C 阴极出现脉冲变化的同时恒流源电路对电容 C 进行充电,充电过程形成 Pull 信号。Pull 信号为“快斜坡”周期信号,每个周期内信号电压至少从 -7 V 线性爬升至 +7 V。

Ddelay 和 Dstep 信号为数值信号,通过主控 spi 总线传输到相应的 DA 芯片中,经转换后得到模拟 Delay 和 Step 模拟信号。实际采集时,Ddelay 的数值恒定,为水平信号;而 Dstep 的数值周期性线性增加,为周期性“斜坡”信号,周期大小取决于设定的采集频率和采样精度。两路信号分别与 Pull 信号作用于比较电路,后经运算放大和积分处理后,依次产生发射机触发脉冲和接收机触发脉冲。Ddelay 和 Dstep 信号数值大小分别用于调节电磁波信号采样时间窗和等效采样的步进时间。

设计中的 DA 转换电路、比较电路、运算放大电路和变压电路的核心元器件依次为“16 位-双通道”的 AD5545 芯片、高速比较器 AD790、高速电压反馈放大器 LM7171、电压电平转换器 TXB0101。

3.2 雷达反射波信号采集电路设计

雷达收发脉冲控制电路实现对发射机和接收机的控制,间接控制了高频雷达电磁波的发射和接收。针对接收机从天线辐射面接收回来的电磁波模拟电压信号,雷达反射波信号采集电路对其进行模数转换,得到反射雷达波的数字信息,以便后期的传输、存储、信号处理等。雷达反射波采集电路的设计如图7所示。

由接收机输出的雷达反射波电信号($R_{_asig}$)电压范围过大(-10~+10 V),不能满足 AD 转换要求,因此首先通过反向放大电路对强信号进行衰减,衰减至 0~2.5 V,反



图7 雷达反射波采集电路设计图

向放大器选用 AD8021。衰减的模拟信号经过 AD 转换成数字信号,随后经灵活静态存储控制器(FSMC)总线将转换结果传入主控内存,AD 转换选用精度为 16 位的 AD7667 芯片。本电路巧妙的将 FSMC 总线同 AD7667 的数据总线和控制引脚连接,将其当作挂载到 FSMC 总线上的 SRAM 型存储,空间为 2 Byte。AD 转化结果将存入该空间。这大大提高了主控与 ADC 之间的数据读取速率,以提升信号采样速率。

3.3 通信电路与协议设计

系统完成反射波信号采集后,需要将采集到的数据上传到雷达主机;另外系统采集和控制需要依照雷达主机下发的命令执行,为此需要对系统的通讯电路与协议进行设计。通信方式的选择主要与数据传输速率有关,系统设计最大采样频率为 500 kHz,在 16 位精度采样的情况下,要求带宽应满足 7.6 Mbit/s,为此采用 10 Mbit/s 的以太网作为系统的通信方式。网络硬件链路基于 STM32F407 自带的 MAC 和外扩的 PHY 以太网芯片(LAN8720A)组成;软件设计以 udp 作为数据传输协议,利用嵌入式 lwip 网络协议栈中的 udp 接口实现。网络通信数据包括控制命令和雷达数据两类,为了方便下位机解析命令、上位机提取数据,特约定数据格式如图8所示。

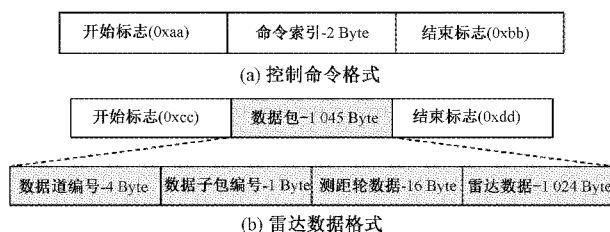


图8 通信数据格式

通信数据格式在头尾均有开始和结束标志,用于区分数据类型和判断数据起始。控制命令格式中间包含 2 Byte 的命令索引,主要用于区分不同的控制命令,如“开始采集”为 0x00、0x01,“结束采集”为 0x00、0x05。雷达数据格式中间包含 1 045 Byte 的数据包,里面包含了数据道信息、测距轮数据和雷达数据等。

4 系统测试与应用

4.1 系统关键信号的测试分析

为验证系统功能,选择采用主机采集软件和示波器对系统的关键信号进行测试分析。所选关键信号包括收发脉冲控制电路中的 Delay、Step、Pulse、Pull、Tx_sig 和 Rx_sig 信号,以及信号采集电路中反射波模拟强信号 $R_{_asig}$ 。

1) Delay、Step 信号测试分析

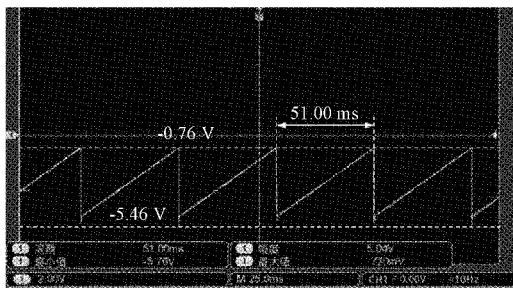
首先对 Delay 和 Step 信号进行测试,通过修改采集软件的延迟时间和时间窗大小,观测它们电压值的变化情况。由上述 3.1 节可知,Delay 为水平信号,其电压大小由设定的采样延迟时间决定。在采样延迟取值范围(0~65 535)内,取代表性延迟时间值,测定对应的 Delay 信号大小,结果如表 1 所示。从表 1 中可知,Delay 信号的实测值与理论值之间最大偏差仅为 8.18%,满足设计要求。

表 1 Delay 信号实测结果统计

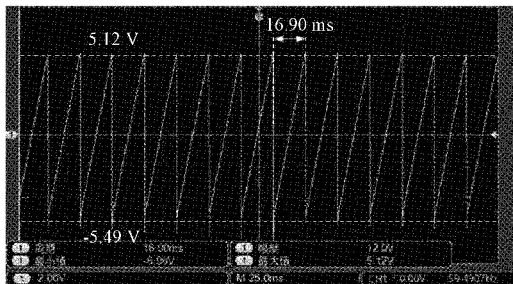
序号	延迟时间/ ns	实测值/ V	理论值/ V	实测值与理论 值偏差/%
1	0	-5.07	-5	1.40
2	20 000	-1.93	-1.95	1.03
3	40 000	1.19	1.10	8.18
4	60 000	4.30	4.16	3.37
5	65 535	5.12	5	2.40

表 2 Step 信号实测结果统计

序号	采样设置参数			测量值			理论值		实测值与理论值偏差			
	f/kHz	p	w/ns	T _r /ms	V _{rmin} /V	V _{rmax} /V	T/ms	V _{min} /V	V _{max} /V	T _r ~T/%	V _{rmin} ~V _{min} /%	V _{rmax} ~V _{max} /%
1	20	512	50	25.60	-5.48	-0.88	25.60	-5	-0.83	0	9.60	6.02
2	20	1 024	50	51.00	-5.46	-0.76	51.20	-5	-0.83	0.39	9.20	8.43
3	20	1 024	120	50.90	-5.32	5.12	51.20	-5	5.00	0.59	6.40	2.40
4	60	512	50	8.40	-5.24	-0.80	8.53	-5	-0.83	1.52	4.80	3.61
5	60	1 024	120	16.90	-5.49	5.12	17.06	-5	5.00	0.94	9.80	2.40



(a) f=20 kHz, p=1 024, w=50 ns



(b) f=60 kHz, p=1 024, w=120 ns

图 9 不同采样参数下 Step 信号实测结果

2) Pulse、Pull 信号测试分析

按照功能需要,3.1 节中设计电路产生的 Pulse 信号

结合等效采样和前述 3.1 节的设计要求,Step 为周期性“斜坡”信号,信号周期性 T、最大值 V_{max}、最小值 V_{min} 等特征指标取决于采样频率 f、精度 p 和时间窗 w 等参数,具体的理论计算关系如下:

$$\begin{cases} T = p/f \\ V_{\max} = \begin{cases} w/12 - 5, w \leq 120 \text{ ns} \\ 5 \text{ V}, w > 120 \text{ ns} \end{cases} \\ V_{\min} = -5 \text{ V} \end{cases} \quad (5)$$

修改采样频率 f、精度 p 和时间窗 w 参数,选取采样频率为 20 kHz、60 kHz,精度为 512、1 024,时间窗为 50 ns、120 ns 情况下,测得实际 Step 信号周期 T_r、最大值 V_{rmax}、最小值 V_{rmin},结果如表 2 所示。从表 2 中可以看出,实测 T_r、V_{rmax}、V_{rmin} 与理论 T、V_{max}、V_{min} 之间最大偏差依次为 1.52%、9.80%、8.43%,误差在容差范围内,因此 Step 信号产生电路满足设计要求。图 9 选取了两个不同采样参数 Step 信号的实测结果。

应为触发脉冲信号,脉宽约 600 ns,脉冲电压从 0 V 上升到 4~5 V;Pull 信号应为“快斜坡”周期信号,单周期内信号电压少从至 -7 V 线性爬升至 +7 V。在采样频率设置为 60 kHz 的情况下,测得 Pulse 信号和 Pull 信号如图 10 所示。由实测结果可以看出,两个信号的频率(61.42 kHz、61.62 kHz)与所设置 60 kHz 采样频率一致;Pulse 脉冲信号是从 -0.24 V 上升到 4.4 V,脉宽为 600 ns,完全满足设计要求;Pull 斜坡信号低电压为 -10.4 V,经线性爬升后高电平为 9.6 V,完全覆盖设计要求的 -7~+7 V。

3) Tx_sig、Rx_sig 信号测试分析

按雷达发射机和接收机的工作要求,Tx_sig、Rx_sig 触发信号都需要设计为负尖脉冲,脉冲下降沿有效,下降时间应 < 25 ns,幅度应大于 15 V;两个脉冲之间存在周期性稳定递增变化的延迟时间(t)。图 11 为 Tx_sig、Rx_sig 信号在采集频率为 40 kHz,时间窗为 100 ns 时的实测结果,其中图 11(b)~(d)为图 11(a)中局部脉冲对放大结果。从结果可以看出,两个信号的下降时间均严格控制在 25 ns 以内;脉冲幅度约为 24.5 V,满足大于 15 V 的要求;从图 11(b)~(d)可以看出,Tx_sig、Rx_sig 脉冲对下降沿起跳点存在一定的时间差,且时间差呈现出“周期性、恒定递增”的规律(t₁>t₂>t₃),这正好满足等效采样对接收机脉冲的设计要求。

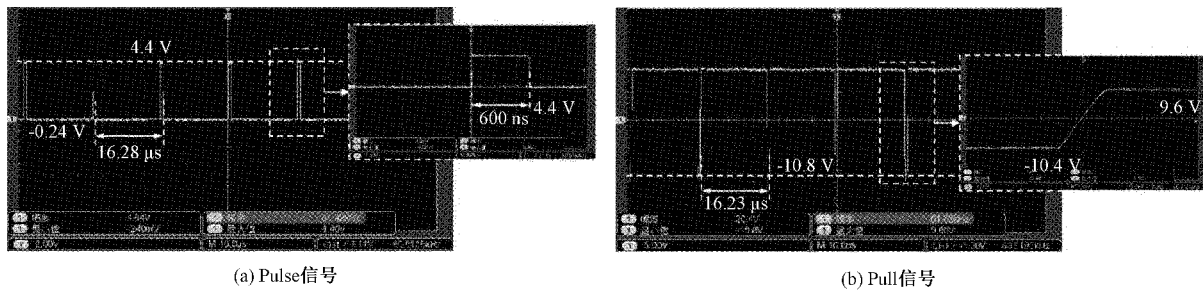


图10 Pulse、Pull 信号实测结果

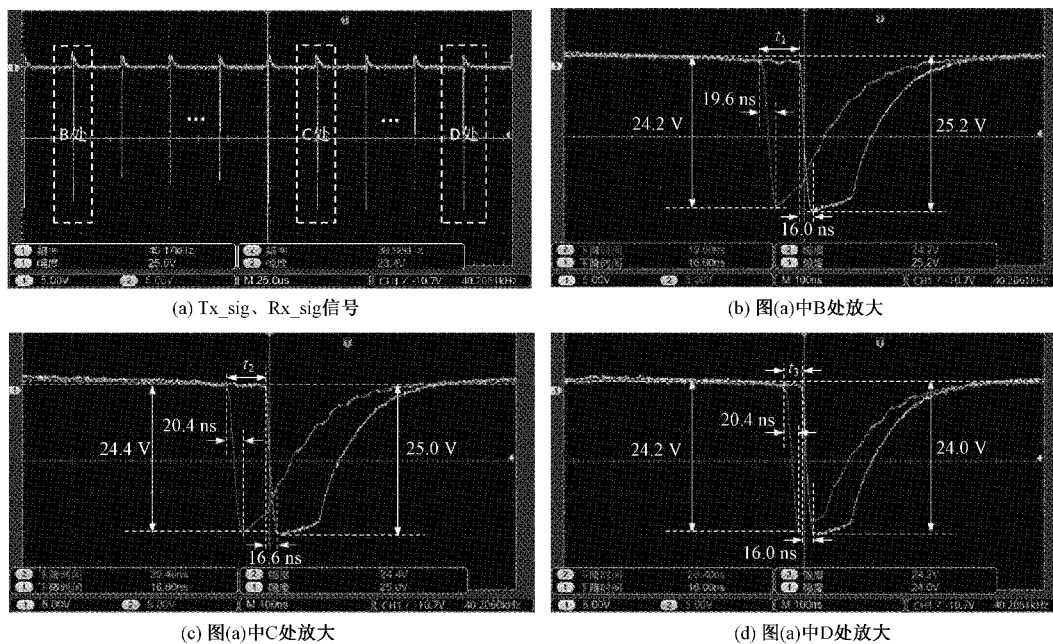


图11 Tx_sig、Rx_sig 信号实测结果

4) R_asig 信号测试分析

将本文设计的采控系统与弧面雷达蝶状天线连接,天线中心频率为 400 MHz。改变采样频率、精度和时间窗等控制参数,在天线辐射前方增加强反射物的情况下,对信号采集电路中反射波模拟强信号 R_asig 进行实测,并通过雷达主机采集软件完成信号采集。结果如图 12 所示,图中信号的采集时间窗和频率分别为 30 ns、40 kHz,图 12(a)、(b)分别为天线辐射前方是否存在强反射物的雷达波反射信号,图 12(c)、(d)分别为上述信号雷达主机端的采集结果。

从结果可以看出,反射波模拟信号的电压范围约为 $-6.2 \sim 5.4$ V,未超出 $-10 \sim 10$ V 的设定要求;数据采集及通讯电路准确实现了反射波信号的数字化采集和传输;图 12(b)、(d)中 $\neq 1$ 、 $\neq 2$ 出现的信号振幅、相位变化为强反射物对雷达波的影响结果。

4.2 定向钻孔雷达实地探测

为进一步对定向探测模块和整个系统功能进行验证,基于该系统研制了超深定向钻孔雷达设备,并利用该设备进行了实地模型和煤矿迎头面的探测实验。

1) 实地模型探测

在实验场地中预先构建出由钻孔和探测目标体组成的实地模型,如图 13 所示。模型中包含 3 处 2 m 深的钻孔、1 处预埋约 1.2 m 深的金属板和 1 处预埋 1 m 深的空桶(水桶)。3 处钻孔呈等腰三角形分布,正中心为预埋金属板。空桶或水桶位于钻孔 1 的正北方,分别模拟地下空洞和富水区域。钻孔雷达依次放入 3 处孔内实验,通过定向系统设置 6 个探测角度(0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300°)进行探测。正南方向探测角度为 0° ,顺时针方向角度递增。

探测数据处理后结果如图 14 所示,图中仅展示孔 1 中不同角度和孔 2、3 部分角度的探测结果。从结果中可以看出,在孔深 1 m,距孔心 1 m 左右位置,雷达图谱中有明显异常,且不同探测角度反应强度有所差别。图中 D、E 处雷达波振幅和同相轴情况明显强于 A、B、C、F 处,主要是因为 在 180° 、 240° 探测方向上存在预埋目标体。同样的情况发生在孔 2、3 探测中,孔 2 的 0° 方向上(G 处)和孔 3 的 120° 方向上(J 处)异常反应明显强于其他角度探测结果(H、I 处),G、J 处波谱异常均为预埋金属板的强反射导致。

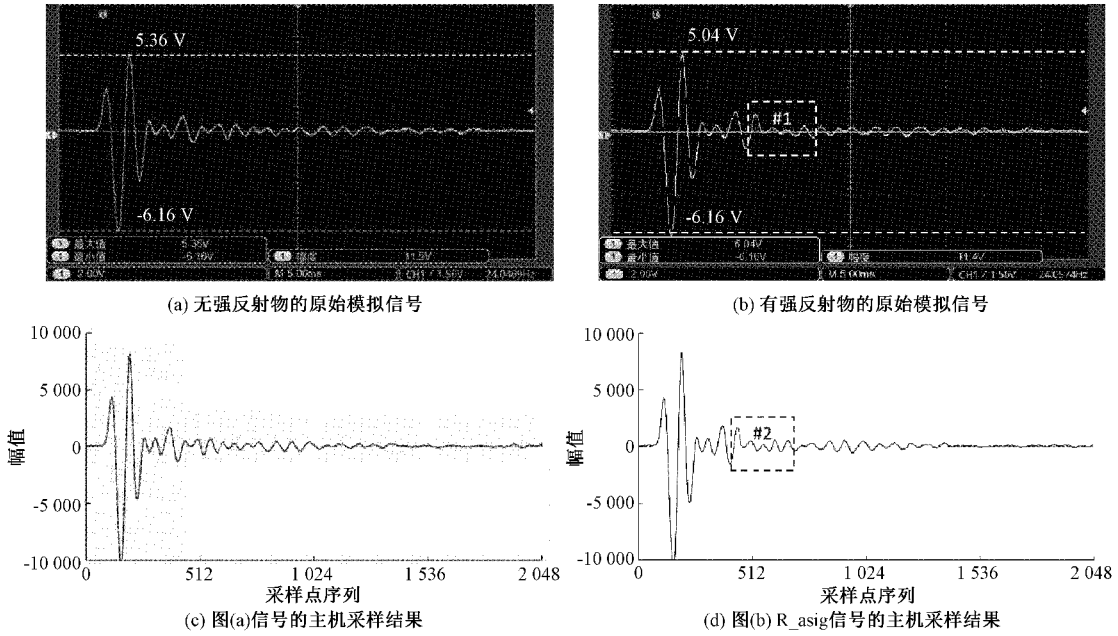


图 12 R_{asig} 信号实测结果

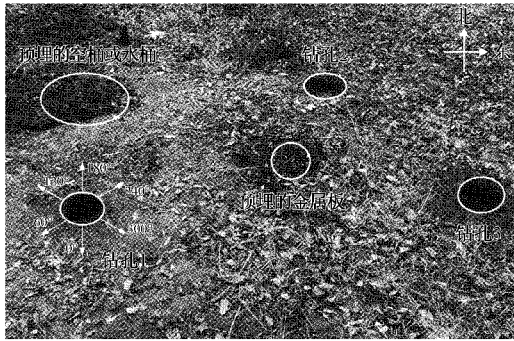


图 13 实地模型

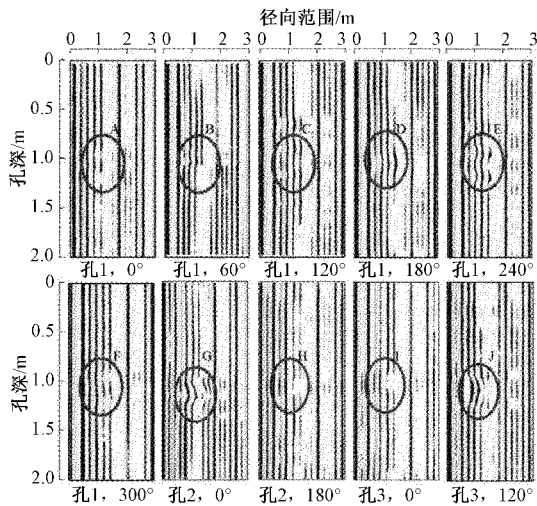


图 14 孔内各角度探测结果

2) 煤矿掌子面探测

为探明煤矿掌子面前方的地质构造及煤岩界面,在完

成超前钻孔局部探测的情况下,利用已有钻孔进一步开展定向钻孔雷达全空间探测,为煤矿开采提供安全保障。本次探测地在贵州省织金县某煤矿,设定 6 个探测角度(0°、45°、135°、180°、225°、315°)。探测结果如图 15 所示,依次

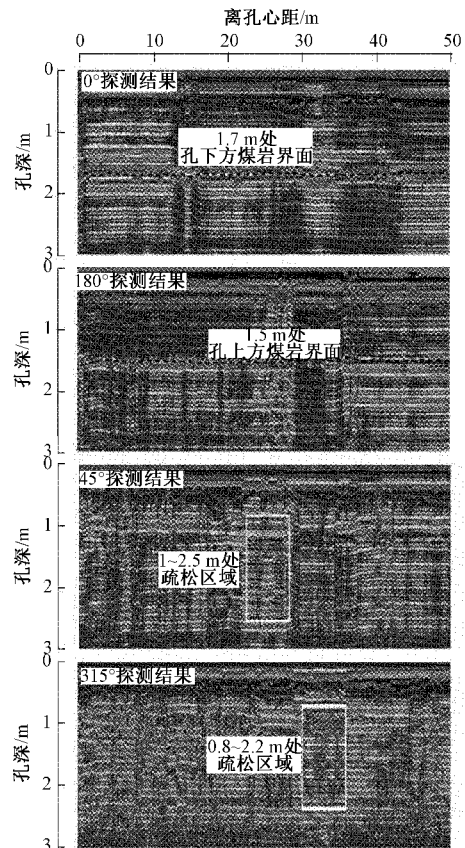


图 15 探测结果

展示了 0° 、 180° 、 45° 、 315° 角度探测的结果。从结果可以看出,钻孔下方、上方煤层厚度分别约为1.7、1.5 m;距离掌子面约25和32 m处,分别在左下方1~2.5 m和右下方0.8~2.2 m内有疏松区域。

5 结 论

为实现钻孔雷达的定向化探测,以便对异常体的精细化定位,本文对超深探测钻孔雷达的数据采集和控制系统进行了设计,具体包括定向探测功能模块的机械结构、控制单元和控制算法设计,雷达收发脉冲控制电路、雷达反射波信号采集电路和通信电路设计等。最后对系统的关键信号进行了测试分析,并利用配备有本文系统的定向钻孔雷达开展了实地模型和煤矿掌子面探测。信号测试和实地探测结果表明,文中系统关键信号质量较高,完全满足定向钻孔雷达的功能需求,为实现钻孔雷达的超深、定向和精细化探测提供了核心技术支撑。但是现有控制系统仍然只是停留在雷达的定向单线测量层面,无法满足孔内全空间的三维探测要求,为此后续可对该方向深入研究。

参考文献

- [1] JAW S W, HASHIM M. Locational accuracy of underground utility mapping using ground penetrating radar [J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2013, 35: 20-29.
- [2] 杨必胜,宗泽亮,陈驰,等. 车载探地雷达地下目标实时探测法[J]. *测绘学报*, 2020, 49(7): 874-882.
- [3] XU X L, PENG S P, YANG F. Development of a ground penetrating radar system for large-depth disaster detection in coal mine[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2018, 158: 41-47.
- [4] 蒋必辞,程建远,李萍,等. 基于钻孔雷达的透明工作面构建方法[J]. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(1): 128-135.
- [5] EBIHARA S, KAWAI H, WADA K. Estimating the 3D position and inclination of a planar interface with a directional borehole radar [J]. *Near Surface Geophysics*, 2013, 11(2): 185-195.
- [6] LIU L B. Virtual multi-offset reflection profiling with interferometric imaging for borehole radar[J]. *Signal Processing*, 2017, 132: 319-326.
- [7] 王文天,刘四新,鹿琪,等. 基于改进残差法的定向

钻孔雷达三维成像算法[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2018, 48(2): 402-410.

- [8] 刘四新,王文天,傅磊,等. 基于BS-MUSIC的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. *地球物理学报*, 2017, 60(12): 4928-4937.
- [9] EBIHARA S, INOUE Y. Analysis of eccentered dipole antenna for borehole radar [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(4): 1073-1088.
- [10] 赵青,邓祥开,常兴浩,等. 钻孔雷达定向天线仿真与设计[J]. *电子科技大学学报*, 2014, 43(5): 691-695.
- [11] 谢雄耀,洪概,唐巨跻,等. 电力排管裂缝检测管道雷达天线研制及模型试验[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(S2): 756-763.
- [12] SEYFRIED D, JANSEN R, SCHOEBEL J. Shielded loaded bowtie antenna incorporating the presence of paving structure for improved GPR pipe detection[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2014, 111: 289-298.
- [13] 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): 1902-1908.
- [14] 许会,牛长富,李邦宇,等. 新型纳秒级探地雷达脉冲源设计[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(11): 2449-2454.
- [15] 华枝发,张兰,岳显昌,等. 高频地波雷达无线数据传输系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(1): 151-158.
- [16] 刘沛,蒋超. 蚁群算法优化PID的机器人位置伺服控制[J]. *国外电子测量技术*, 2021, 40(6): 59-63.
- [17] 阳雨妍,宋爱国,沈书馨,等. 基于CNN-GRU的遥操作机器人操作者识别与自适应速度控制方法[J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(3): 123-131.

作者简介

李涛涛(通信作者),工学博士,副教授,主要研究方向为地质雷达与三维视觉综合探测技术。

E-mail: 305210390@qq.com

许献磊,教授,博士生导师,主要研究方向为探地雷达仪器开发、城市道路及地下空间安全检测装备及技术等。

E-mail: xuxl@cumtb.edu.cn

何宇,硕士研究生,讲师,主要研究方向为探地雷达检测装备及技术。

E-mail: 258931134@qq.com