

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208903

双通道伪随机编码超宽带探地雷达主控机设计*

贺靖^{1,2,3} 周斌^{1,2} 方广有^{1,2,3}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094; 2. 中国科学院电磁辐射与探测技术重点实验室 北京 100190;
3. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院 北京 100049)

摘要: 为实现探地雷达小型化和数字化的设计,对伪随机编码探地雷达的系统设计方案进行了研究。研制了一款双通道伪随机编码超宽带探地雷达主控机。研究基于FPGA芯片Virtex-5和宇航级ADC芯片ADS5463-SP,采用码元平衡直发的信号源设计方案,配合混合采样实现了中心频率60 MHz和800 MHz的双通道格雷互补码编码信号的发射和接收。进行了信号源测试实验和主控机的闭环测试实验,双通道脉冲压缩结果峰值旁瓣比均大于25 dB,并达到了低频1.875 m和800 MHz的高频11.72 cm的距离分辨率。将主控机接入雷达系统,在沙坑中进行雷达整机的高频通道测试实验,测得埋藏大理石板厚度约17 cm。结果表明本文设计的雷达主控机性能可靠,可以广泛应用于伪随机编码体制超宽带探地雷达系统。

关键词: 超宽带;探地雷达;FPGA;伪随机编码;格雷互补码;脉冲压缩

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

Design of a pseudo-random coded ultra-wideband dual-channel ground penetrating radar controller

He Jing^{1,2,3} Zhou Bin^{1,2} Fang Guangyou^{1,2,3}

(1. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Key Laboratory of Electromagnetic Radiation and Detection Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. School of Electronics, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to realize the miniaturization and digitization design of ground penetrating radar (GPR), this paper studies the design of pseudo-random (PRN) coded GPR system. A dual-channel pseudo-random coded ultra-wideband (UWB) GPR controller is presented in this paper. A dual-channel golay complementary pairs coded signal with a center frequency of 60 MHz and 800 MHz is transmitted and received by using the symbol balanced direct transmission signal source design based on the Virtex-5 and space-level ADC chip ADS5463-SP. The signal source test and the closed-loop test of the controller are carried out. The peak sidelobe ratios of the two-channel pulse compression results are greater than 25 dB, and the distance resolution of 1.875 m in low frequency and 11.72 cm in high frequency is achieved. The controller is connected to the radar system, and the high frequency channel test is carried out in a sand pit. The thickness of the buried marble slab is measured to be about 17 cm. The results show the performance of the radar controller designed in this paper is reliable, and it can be widely used in the PRN UWB GPR system.

Keywords: ultra-wideband; ground-penetrating radar; FPGA; pseudo random noise; golay complementary pairs; pulse compression

0 引言

探地雷达(ground penetrating radar, GPR)是一种无损探测技术。由于其优异的穿透能力和距离分辨率,GPR已广泛应用于地下目标探测的诸多领域,如反恐维稳^[1]、生

命探测^[2-3]、地质勘探^[4-5]、土木工程与建筑^[6-7]、土壤检测^[8-9]等。根据雷达理论,距离分辨率取决于信号的带宽,探测深度取决于信号的总功率(时宽),因此理想的雷达信号应具有较大的时间带宽积(time bandwidth product, TBP)^[10]。然而传统无载频脉冲体制GPR的TBP是固定

收稿日期:2022-01-20

* 基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1522200)、国家重点研发计划项目(2020YFC1522202-4)、国家自然科学基金(41941002)项目资助

的,在探测深度和距离分辨率之间存在矛盾,因此难以满足强干扰场景下的超深探测需求^[11]。新体制的超宽带雷达采用脉冲压缩的方式,发射端发射幅度相对小但具有大时宽带宽积的脉冲压缩信号,接收端先进行脉冲压缩或傅里叶变换才得到雷达的脉冲响应,可有效解决雷达探测距离和分辨率的问题^[12-13]。常用的脉冲压缩信号有线性调频信号(linear frequency modulation, LFM)、频率步进信号(steped frequency continuous waveform, SFCW)和伪随机编码信号(pseudo-random noise, PRN)^[14-16]。线性调频信号和频率步进信号目前已被广泛应用于对空探测雷达中,但其信号脉冲压缩后存在较高旁瓣。而在探地雷达应用中,由于地下介质的指数衰减特性,深层目标回波较浅层目标回波能量相差可达上百 dB,因此理论上对空雷达中的线性调频信号和频率步进信号难以适应超深探地雷达的应用需求。另外由于低频信号存在高次谐波,具有大相对带宽的线性调频信号信源设计复杂,系统线性度难以保证。伪随机编码体制雷达通过对发射信号进行伪随机编码调制,使其在保持超宽带特性的同时具有大的时宽,以获得大时宽带宽积的发射信号。雷达发射机发射具有大时宽带宽积的伪随机编码信号,在接收端通过相关处理完成脉冲压缩,压缩后的脉冲宽度等于发射信号编码码元的宽度^[17-18]。一方面,通过增大编码信号的长度(时宽),可以在不提高发射信号峰值功率的同时有效增大雷达系统的总辐射能量,保证接收端不因饱和而形成探测盲区;另一方面,通过接收端对回波信号进行脉冲压缩处理获得窄脉冲,有效增大了雷达系统的距离分辨率和探测深度^[19-20]。

近年来,随着科技水平的提升,伪随机编码超宽带 GPR 技术日趋完善,也对地下浅表层目标和深层地质结构的探测提出了更高要求。而其中基于 ASIC(application specific integrated circuit)或 FPGA(field-programmable gate array)的高度数字化雷达系统由于系统设计简单、小型化、复用性高等优点备受关注。在传统的伪随机编码超宽带 GPR 中,编码信号的生成是一大难点,往往需要配合模拟器件完成调制、滤波等过程,复杂的系统使得设计难度增大且稳定性较差^[21]。2017 年,中国科学院的苏海等^[22]研制出一套伪随机编码超宽带 MIMO 雷达系统,采用射频开关切换的方法来实现多发多收,并且调用 FPGA 内部的 DSP 硬核进行实时脉冲压缩,以缓解上位机数据处理的运算压力。该设计基于 FPGA 和高速 DAC 器件,通过数字方法直接合成伪随机编码信号,虽然避免了复杂的发射信号模拟调制过程,但发射端仍需外接 DAC 芯片并为其提供高速时钟信号。2020 年,斯坦福大学和凯斯西储大学的研究人员基于 Intel 公司的 FPGA 芯片 Arria-10,采用高速串化解串器(serializer/deserializer, SerDes)直接生成 m 序列编码的发射信号,实现了探地雷达发射机的高度数字化^[23]。该设计可实现地下 1~2 m 的探测距离,但为避免接收机饱和,发射信号编码序列长度被限制为 63 bit;且由

于采用的 m 序列编码方式脉冲压缩结果存在旁瓣,导致微弱目标回波易被淹没于脉压旁瓣中,无法适应更大的探测深度要求。

本文提出一种基于 FPGA 的双通道的伪随机编码超宽带探地雷达主控机设计方案。为简化电路结构,发射机采用高度数字化设计,通过 FPGA 生成 127 位格雷互补码编码序列,经曼彻斯特编码改善低频成分后,在同步时钟控制下由高速 IO 收发器(RocketIO GTP)生成发射信号,最后通过平衡-非平衡转换器(balance-unbalance, BALUN)和带通滤波送往射频前端进行发射,配合 FPGA 的可重复编程特性,不需提供任何外部时钟即可实现不同频段发射信号的切换。双通道设计为低频通道 60 MHz 中心频率、高频通道 800 MHz 中心频率,发射信号频率范围覆盖 10~1 500 MHz,可同时实现对地下表层土壤探深超过 40 m、分辨率优于 15 cm,以及对次表层岩石分层结构探深超过 400 m、分辨率优于 2 m 的探测要求,系统复用性提高。该设计采用理论零旁瓣的格雷互补码编码方式并对接收回波进行自动增益控制(automatic gain control, AGC),避免了脉压旁瓣对深层目标回波的影响及接收机饱和,突破了 m 序列编码方式对最大探测距离的限制。接收机采用具有大模拟输入带宽的 ADC 芯片和混合采样的设计方案,使用 320 MHz 的基础采样率,通过改变混合采样次数即可实现对不同频段发射信号的采样要求。另外由于 FPGA 丰富的接口资源,可将其轻松拓展为多发多收形式,雷达系统整体探测性能进一步增强。

1 相关原理

1.1 脉冲压缩技术

脉冲压缩是指发射经调制(或编码)的大时宽信号,并在接收机对回波信号进行处理以得到窄脉冲的过程。为实现这一目的,需要在接收端设置脉冲压缩网络,其相频特性应与发射信号实现相位共轭匹配,经过该压缩网络后,信号各频率分量的相位均为 0,以实现时域的相干叠加获得窄脉冲。而这一要求恰好与最佳接收理论中的匹配滤波器相同^[24-25]。

图 1 为脉冲压缩过程示意图。雷达发射信号为实信号,具有较大的时宽。压缩后的峰值功率由脉冲压缩比(compression ratio, CR)决定。脉冲压缩比定义为:

$$CR = B \cdot T = \frac{T}{\tau} \quad (1)$$

其中, T 为发射信号时宽, τ 为有效(压缩)脉冲时宽, B 为系统的有效带宽。这个比值也被称作时间带宽积(time bandwidth product, TBP),是衡量脉冲压缩程度的标准。对于脉冲压缩信号,CR 的值大于 1,通常为 5~10⁵ 之间^[26]。

假设经过天线以及地下介质传播,信号没有失真,则回波信号为多个发射信号样本的放缩、时延和线性叠加。根

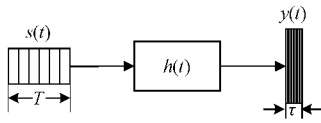


图 1 脉冲压缩原理

据最佳接收理论,接收端的匹配滤波器网络函数应为:

$$h(t) = s(-t) \quad (2)$$

则对发射信号的脉冲压缩结果为:

$$y(t) = s(t) \cdot h(t) = s(t) \cdot s(-t) = R_{ss} \quad (3)$$

即脉冲压缩结果为发射信号的自相关。故对于实际回波信号来说,脉冲压缩结果为:

$$y_0(t) = s_0(t) \cdot h(t) = s_0(t) \cdot s(-t) = R_{s_0s} \quad (4)$$

因此在线性系统中,将接收的回波信号与发射信号做互相关,即可完成回波信号的脉冲压缩。

1.2 格雷互补码

伪随机码又称伪随机噪声(pseudo random noise, PRN)码,属于超宽带信号。其瞬态值服从正态分布,功率谱在宽频带内均匀分布,且具有很好的相关特性。其中 M 序列在伪随机编码体制雷达中应用最为广泛。M 序列是最长线性反馈移位寄存器序列的简称,对于码序列长度为 N 的 M 序列,其非周期自相关函数的峰值旁瓣比(peak side lobe ratio, PSLR)为 $20\lg \sqrt{N}$ dB 且旁瓣值唯一,码长越长,峰值旁瓣比越高^[27]。为实现雷达更高的信噪比和峰值旁瓣比需要增加码序列长度,但序列过长不利于时变增益控制。

格雷互补码两个子码各自的自相关函数旁瓣相互抵消,图 2 为码序列长度为 32 的格雷互补码自相关仿真结果,理论上子码叠加后旁瓣为 0。尽管交替发射两个子码会使雷达扫描率降低 1/2,但相比 M 序列的编码方式可以达到更高的峰值旁瓣比,在地下深层目标探测中可进一步降低脉冲压缩旁瓣对微弱目标回波的影响,有利于最大探测距离的提升^[28-29]。因此本文选用格雷互补码对主控机发射信号进行编码。

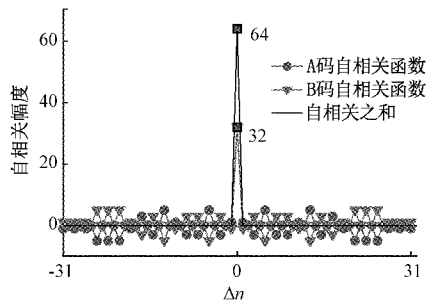


图 2 32-bit 格雷互补码理论自相关函数

1.3 混合采样技术

在超宽带系统中,发射信号往往具有很大的带宽和高分量。根据香农采样定理,对类似的雷达信号进行实时

采样需要采样率高达数 GHz 的 ADC 芯片,但高性能的 ADC 芯片获取困难且售价昂贵^[30]。因此目前雷达系统中通常采用混合采样的接收方法。

混合采样是实时采样和等效时间采样方法的结合,其原理如图 3 所示。通过步进延迟采样时钟,在每个混合采样周期内采集一组数据,经过 n 个周期完成对信号的采样,最后按照相位前后关系将取得数据拼接,从而恢复完整波形并达到 n 倍于单个时钟周期的采样率^[31-32]。本文主控机设计中高频通道基础采样频率为 320 MHz,采样时钟周期为 3 125 ps。通过将延时芯片的延时步长设置 195 ps,进行 16 次混合采样即可达到 5.12 GHz 的等效采样率,满足 800 MHz 高频编码信号的采样要求。

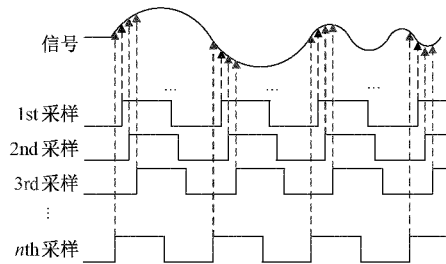


图 3 混合采样原理

2 系统设计

本文设计的伪随机编码超宽带雷达主控机采用格雷互补码的编码方式,可实现高、低频双通道的伪随机编码信号发送和接收。其中低频通道工作频率范围 10~110 MHz,中心频率 60 MHz,相对带宽 167%;高频通道工作频率 100~1 500 MHz,中心频率 800 MHz,相对带宽 175%。该技术应用于测月雷达中,可满足对浅表层月壤探测深度超过 40 m 和对次表层月球岩石分层结构探测深度超过 400 m 的探测需求。同时配合射频开关和 FPGA 丰富的接口资源,可实现时分复用的多极化收发方案。雷达主控机的设计指标如表 1 所示。

表 1 雷达主控机设计指标

参数名称	低频通道	高频通道
信号中心频率	60 MHz	800 MHz
码元形式	格雷互补码	格雷互补码
码序列长度	128 bit	128 bit
码元宽度	16.7 ns	1.25 ns
ADC 采样率	320 MHz	5.12 GHz
脉冲重复周期	15 μ s	2.5 μ s
ADC 采样时窗	12 μ s	2.16 μ s
距离向分辨率	优于 2 m	优于 15 cm

雷达系统主控机由 FPGA、高速 ADC、自动增益控制电路、通信接口和配电模块等部分构成,系统结构如图 4 所

示。主控机控制雷达系统工作时序,检测雷达工作状态,实现码元信号生成与输出、发射通道增益设置、接收通道可变增益控制、回波信号模数转换和脉冲压缩,并完成与上位机的通信。

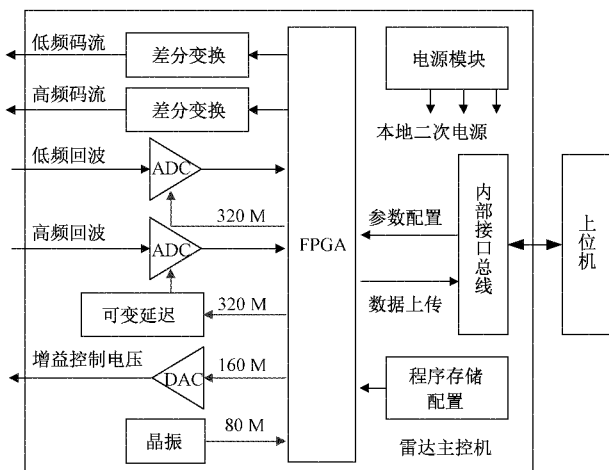


图 4 雷达主控机结构

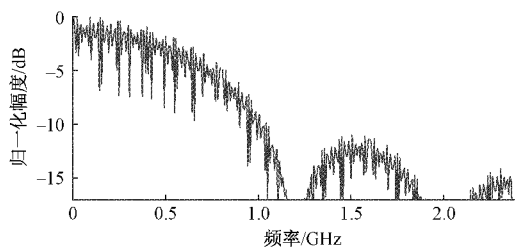
2.1 编码信号生成

传统伪随机编码信号的产生往往需要在高频载波基础上进行调制滤波,再由高速 DAC 输出,这对 DAC 芯片性能和发射机时序控制提出了很高的要求^[33]。近年来随着集成电路的发展,高性能的 FPGA 芯片已配备高速串行接口 (gigabit transceivers, GTX),其中 Xilinx 公司 FPGA 芯片的 GTP 接口最大传输速率为 6.6 Gbps, GTX 接口更是支持最大 12.5 Gbps 的高速数据传输,满足雷达发射信号的频率要求^[34]。

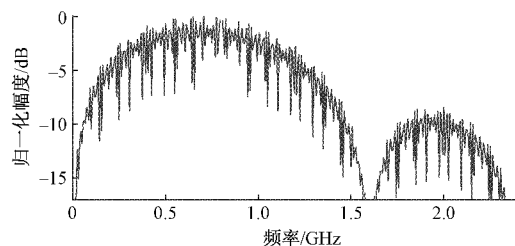
然而由 FPGA 直接生成的格雷互补码编码信号存在连续的相同数字电平,具有大量直流成分,不利于天线辐射。中心频率 $f_c = 800$ MHz 的 127 位格雷编码信号频谱和其经过曼彻斯特二次编码后的频谱 MATLAB 仿真结果如图 5 所示。由图可知由于格雷编码后连续“1”和“0”的存在,其信号中心频率相对 f_c 发生了偏移,能量向直流聚集,这不但影响天线的辐射效率,也会导致信号产生明显的畸变失真。

为改善这一问题,将格雷编码信号中的每一位再次进行曼彻斯特编码,如图 5(b)所示。一位“0”由低至高的阶跃表示,一位“1”由高至低的阶跃表示,这使得原格雷编码信号被频率为的子载波二次调制。因此信号的频谱中心由直流搬移至 800 MHz,绝大部分频率成分落在 100~1 500 MHz 的带宽内,满足系统设计的要求。

在本文的主控机设计中,采用码元平衡直发的信号源设计方案,其流程如图 6 所示。由 FPGA 直接生成格雷码编码序列并储存于寄存器中。高速串行接口读取后,在同步时钟控制下生成格雷编码信号,再经过曼彻斯特编码,最终经差分转单端变换 (Balun) 和带通滤波器 (BPF) 后由天线发射。该方案极大简化了发射机结构,且经由曼彻斯特编码的方式有效降低了发射信号直流成分,使发射信号的



(a) 127-bit 格雷码序列频谱



(b) 127-bit 格雷码经曼彻斯特编码后频谱

图 5 频谱 MATLAB 仿真结果

天线辐射效率大幅提升。

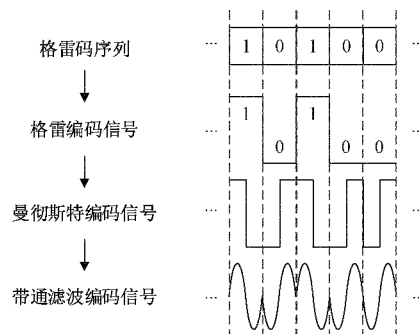


图 6 码元平衡直发信号生成过程

2.2 时钟模块

本文选用了 Xilinx 公司的 FPGA 芯片 Virtex-5。系统时钟由外部 80 MHz 有源晶振提供,下列不同频率的同步时钟均由 FPGA 内部锁相环生成并提供给主控机其他模块使用。

双频段的格雷编码信号分别由 60 和 800 MHz 时钟产生,并在 120 MHz 和 1.6 GHz 同步时钟的控制下进行曼彻斯特编码。双通道的 DAC 芯片由 320 MHz 的时钟驱动并完成对回波数据的采集,另有一个 160 MHz 的时钟提供给增益控制模块使用。

2.3 回波数据采集

接收端选取两片 TI 公司的高速 ADC 芯片 ADS5463-SP 对回波信号进行采集,该芯片具有 12 bit 分辨率、最大 500 MSps 采样率和 2.3 GHz 的模拟输入带宽,满足设计中对双频段回波信号的采样要求。

其中低频通道 ADC 芯片由 FPGA 提供的 320 MHz 时钟信号作为采样时钟对回波信号实时采样;而高频通道采用 Micrel 公司的高分辨率延迟芯片 SY89297 对 FPGA 产生的 320 MHz 时钟进行步进延时,配合 ADC 芯片连续进

行 16 次混合采样以获得最终 5.12 GHz 的等效采样率。SY89297 高分辨率延迟芯片可提供最小 5 ps 的步进长度,满足设计所需的 195 ps 延时步长精度要求;最大延迟变化范围可达 5 ns,大于 320 MHz 基础时钟的采样周期,满足系统设计要求。

2.4 配电模块

配电模块采用降压型直流-直流(DC-DC)转换器和低压差线性稳压器(low dropout regulator, LDO),将输入的外部电源转换为本地二次电源,为主控机各模块供电。

2.5 增益控制电路

为进一步减小直耦波、地表反射回波和脉冲压缩旁瓣对深层微弱目标回波信号的影响,接收端采样前对回波信号进行增益控制,抑制直达波并放大深层目标回波以增大接收机动态范围。增益控制电路采用 TI 公司的 DAC 芯片 DAC5675,由 FPGA 生成的 160 MHz 时钟驱动,为接收机提供增益控制电压信号,实现对回波信号的增益控制。

2.6 通信接口

通信接口部分采用 Realtek 公司的千兆以太网芯片 RTL8211FD,最大传输速率可达 1 000 Mbps,将采样数据上传并实现雷达主控机与上位机的信息交互。

2.7 软件设计

上位机软件使用 C# 程序语言在 Visual Studio 2019 集成环境下实现,包括主控机参数配置和回波数据接收及处理两个功能模块。主控机参数配置模块主要负责 FPGA 配置文件的传输和高频、低频通道的选择,并控制雷达系统的启动和停止;回波数据接收及处理模块通过千兆以太网总线接口实时接收雷达主控机上传的回波数据,并将其保存至 BLK 文件中,同时可调用 MATLAB 程序对回波数据进行脉冲压缩并对处理结果进行显示。软件操作简单,具有良好的交互性。

3 实验结果

在本节中,进行了本文设计的雷达主控机的相关测试实验,给出实验结果并进行了讨论。

3.1 信号源波形测试实验

信号源的波形测试流程如图 7 所示。上位机对雷达主控机进行参数配置,并由雷达主控机分别发射低频 60 MHz、高频 800 MHz 的 127-bit 格雷互补码编码信号的 A、B 码,并由高性能示波器分别以与系统接收端采样频率设计值相近的 400 MHz 和 5 GHz 采样率采集,最后通过自相关实现脉冲压缩,以检验主控机信号源生成的发射信号质量。搭建的实验测试平台如图 8 所示。

低频通道 60 MHz 和 高频通道 800 MHz 的编码信号波形测试结果如图 9、10 所示。双频段编码信号的时域波形中均可看到较为清晰的码元序列,且存在明显对应关系,这是因为用于编码的格雷互补码序列相同。由图中频域波形可知,测试结果符合低频编码信号中心频率 60 MHz、高

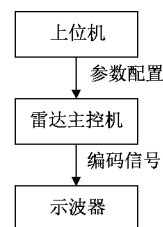


图 7 信号源波形测试流程

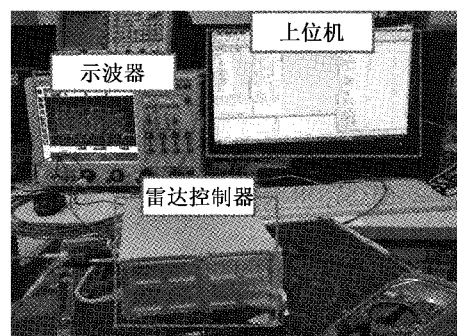


图 8 波形测试实验场景

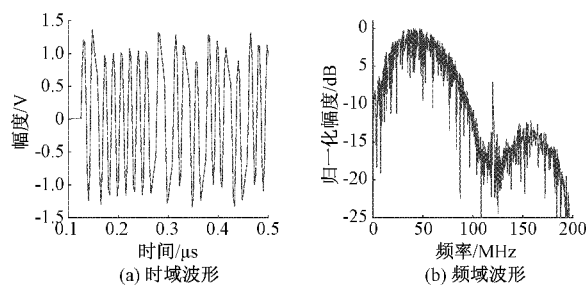


图 9 编码信号时域、频域波形(60 MHz)

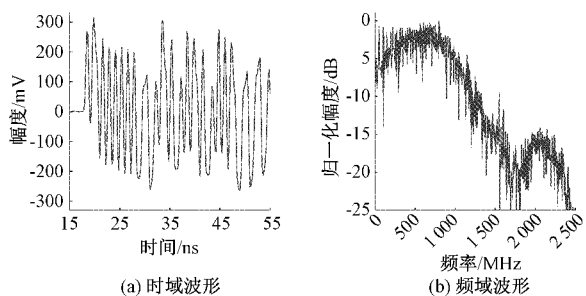


图 10 编码信号时域、频域波形(800 MHz)

频编码信号中心频率 800 MHz 的设计要求,信号的超宽带特性良好。

低频、高频通道的脉冲压缩结果如图 11、12 所示。虽然编码信号的脉冲压缩结果没有达到格雷互补码的理论零旁瓣效果,但通过分时发送格雷互补码的 A、B 码,并在接收端进行脉冲求和的方式,使脉冲压缩结果的旁瓣显著降低。低频通道峰值旁瓣比(peak side lobe ratio, PSLR)超过 40 dB,高频通道也达到了 25 dB,高于 m 序列编码信号的理论计算值 $20\lg \sqrt{127} \approx 21$ dB,体现了采用格雷互补码

的编码方式在减少脉冲压缩旁瓣和超深探测方面的优势。

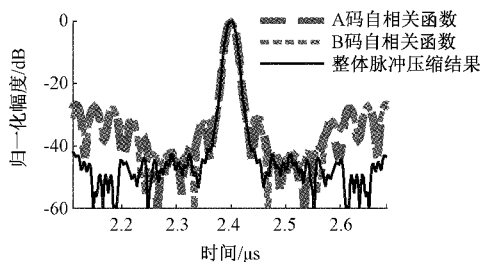


图 11 低频通道脉冲压缩结果(60 MHz)

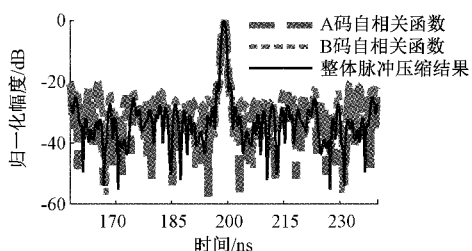


图 12 高频通道脉冲压缩结果(800 MHz)

另外高频编码信号相比低频信号产生了一定程度的失真,在频域表现为频谱能量向低频泄露,这是由于高频通道发射端的隔直电容充放电效应导致的。但由数据处理结果来看信号整体仍保持了良好的自相关特性,可进行有效的脉冲压缩。实验结果表明本文设计的雷达主控机采用码元平衡直发的信号生成方案,生成的编码信号时频特性与脉冲压缩结果良好,符合伪随机编码超宽带雷达系统设计要求。

3.2 雷达主控机闭环测试实验

雷达主控机闭环测试实验的流程如图 13 所示。雷达主控机在上位机的控制下分时发送 60 MHz 和 800 MHz 编码信号,分别通过高频同轴电缆和 10 dB 衰减器环回接至接收端。低频通道由 ADC 进行 320 MHz 的实时采样。高频通道 ADC 以 320 MHz 的基础采样率连续 16 次采集,完成 5.12 GHz 等效采样。最终将回波数据上传至上位机完成脉冲压缩。

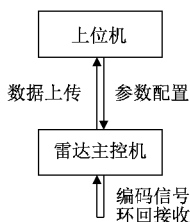


图 13 雷达主控机闭环测试流程

闭环测试实验结果如图 14、15 所示。从图中可以看到发射接收环回测试中低频通道的脉冲压缩结果峰值旁瓣比约为 30 dB,相比示波器的测试结果出现较为明显恶化;高频通道信号峰值旁瓣比大于 25 dB,则与示波器测试结果基本一致。这是由于低频通道环回测试时 ADC 的

320 MHz 采样率低于示波器测试时的 400 MHz 采样率,而高频通道环回测试所用采样率与示波器测试时基本相同导致的。

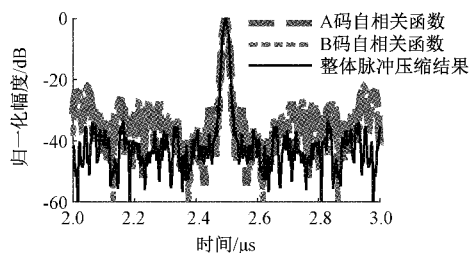


图 14 环回测试脉冲压缩结果(60 MHz)

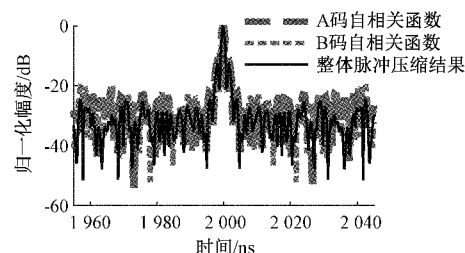


图 15 环回测试脉冲压缩结果(800 MHz)

环回测试中脉冲压缩结果的 3-dB 波束宽度如图 16、17 所示。由图中波束宽度可知双通道的距离向分辨率分别为低频 1.875 m 和高频 11.72 cm,满足距离向分辨率低频通道优于 2 m、高频通道优于 15 cm 的设计要求。

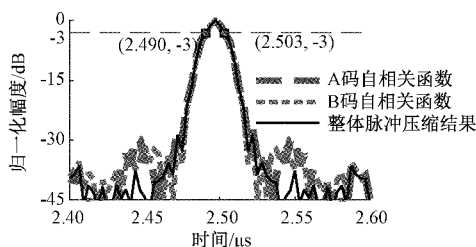


图 16 脉冲压缩结果 3-dB 波束宽度(60 MHz)

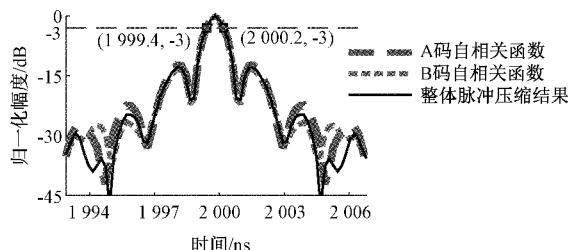


图 17 脉冲压缩结果 3-dB 波束宽度(800 MHz)

该实验验证了本文设计的伪随机编码超宽带雷达主控机能够完成编码信号的生成、发射以及准确接收,配合射频前端低噪声放大和增益控制模块即可实现伪随机编码超宽带探地雷达的主要功能,符合系统设计要求。

3.3 伪随机编码探地雷达系统整机实测

为进一步验证设计的有效性,将本文设计的伪随机编

码探地雷达主控机连接射频模块和收发天线,以雷达系统的角度进行高频通道的整机实测实验。雷达系统整机连接如图 18 所示。

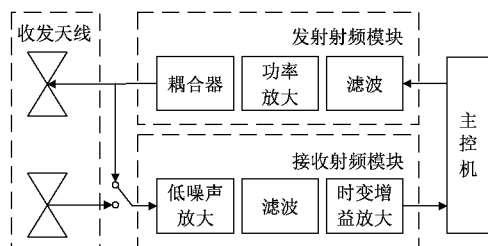


图 18 伪随机编码探地雷达系整机连接示意图

主控机产生的伪随机编码信号经滤波和功率放大后由发射天线发射,回波信号由接收天线接收后先经过低噪声放大、滤波和时变增益放大,再由主控机进行数据的采集。另外,雷达系统设计了内标定功能。通过耦合器将发射信号耦合至接收射频模块,再由射频开关切换至内标定位完成数据的采集,并以此作为脉冲压缩参考信号。

实景测试实验于实验室沙坑中进行,实验场景如图 19 所示。雷达系统采用距离触发工作模式,高频通道发射端功率设置为 27 dBm,接收端设置为固定 30 dB 衰减,收发天线采用 Bowtie 天线。于相对介电常数为 $\epsilon_r \approx 3$ 的火山灰中埋藏大理石板块,并用该雷达系统进行探测,得到 B-scan 探测结果如图 20 所示。

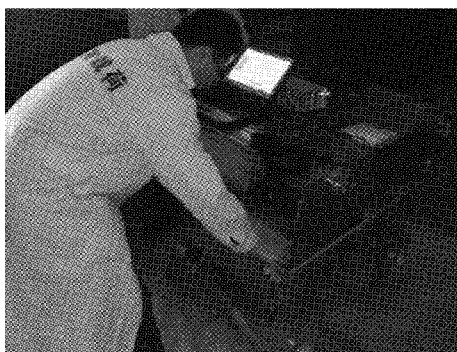


图 19 沙坑测试实验场景

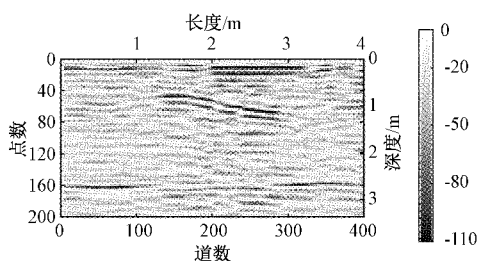


图 20 沙坑 B-scan 探测结果

由图 20 可以看到在最大深度约为 2.7 m 的沙坑中,于 0.6~1.2 m 深处存在实验埋藏的长度约为 1.6 m 大理石板的回波反射。其特征双曲线上间隔约 10 个采样点 (1.9 ns),对应大理石板厚度约为 17 cm,满足系统对高频

通道最小距离分辨率的设计要求。可见本文所设计的伪随机编码探地雷达主控机性能良好,由实景测试验证了本文设计的有效性。

4 结 论

本文提出了一种基于 Xilinx 的 Virtex-5 系列芯片和 TI 的 ADS5463-SP 宇航级采样芯片的双通道探地雷达主控机设计方案,由 FPGA 高效实现了雷达系统的主要功能。与其他雷达系统相比,该主控机具有高度数字化的设计结构,通过 FPGA 直接生成和传输编码信号,使雷达系统整体结构紧凑且成本降低。发射信号采用格雷互补码代替常用的 m 序列进行编码,进一步减小了脉冲压缩旁瓣的干扰,使系统可以满足超深探测需求。系统通过曼彻斯特码对生成的格雷互补码进行二次编码,大幅改善了编码信号的辐射特性,提高了天线辐射效率。此外,数据采集部分使用混合采样的方式,可以保证对双频段信号准确采集。实验结果表明该高度数字化设计方案生成的编码信号性能良好,可广泛应用于伪随机编码超宽带雷达系统中。

本文阐述的高度数字化伪随机编码超宽带雷达主控机设计方案避免了传统伪随机编码信号生成过程的复杂性,可通过 FPGA 调节 GTP 的传输速率和发射信号的编码方式适应多场景任务需求。然而编码信号经 GTP 高速接口发射后,相比原始码元产生了一定程度的畸变,不利于脉冲压缩处理,计划增加内部环路采集发射信号作为参考信号,以减小发射畸变对脉冲压缩结果的影响。另外由于混合采样所需的延迟芯片易受外界温度影响发生漂移且不利于系统结构的简化,后续考虑以 FPGA 锁相环合成固定频差采样时钟的方式代替延迟芯片实现混合采样,以进一步简化接收电路结构并减小由采样时钟带来的误差。

参考文献

- [1] ŠIPOŠ D, GLEICH D. A lightweight and low-power UAV-borne ground penetrating radar design for landmine detection[J]. *Sensors*, 2020, 20(8): 2234.
- [2] 夏正欢, 张群英, 叶盛波, 等. 一种便携式伪随机编码超宽带人体感知雷达设计[J]. *雷达学报*, 2015, 4(5): 11.
- [3] CROCCO L, FERRARA V. A review on ground penetrating radar technology for the detection of buried or trapped victims[C]. 2014 International Conference on Collaboration Technologies and Systems (CTS), IEEE, 2014.
- [4] ZHAO W, TIAN G, FORTE E, et al. Advances in GPR data acquisition and analysis for archaeology[J]. *Geophysical Journal International*, 2015, 202(1): 62-71.
- [5] GOODMAN D, PIRO S. GPR Remote Sensing in

- Archaeology[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [6] SUN M, PAN J, BASTARD C L, et al. Advanced signal processing methods for ground-penetrating radar: Applications to civil engineering [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(4):74-84.
- [7] BENEDETTO A, PAJEWSKI L. Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar [M]. Springer International Publishing, 2015.
- [8] 王升,陈洪松,付智勇,等. 基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 [J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 1024-1030.
- [9] SZYMCZYK P, SZYMCZYK M. Classification of geological structure using ground penetrating radar and Laplace transform artificial neural networks [J]. Neurocomputing, 2015, 148: 354-362.
- [10] KAKOUCHE I, MAALI A, KORSO M, et al. Fast and cost-effective method for non-contact respiration rate tracking using UWB impulse radar [J]. Sensors and Actuators A Physical, 2021, 329:112814.
- [11] ZHANG Y, MA Y, YU X, et al. A coarse-to-fine detection and localization method for multiple human subjects under through-wall condition using a new telescopic SIMO UWB radar [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2021, 332: 113064.
- [12] SAKKILA L, TATKEU C, RIVENQ A, et al. UWB radar detection theory [C]. 2020 10th International Symposium on Signal, Image, Video and Communications(ISIVC), 2021.
- [13] 屈乐乐,方广有,杨天虹. 压缩感知理论在频率步进探地雷达偏移成像中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1):21-26.
- [14] 宋寿鹏,乔梦丽. 基于 NLFM Barker 编码的板材焊缝缺陷超声检测方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4):246-254.
- [15] KUMAR P K, KUMAR T K. M-sequence UWB radar for three dimensional through-the-wall imaging [C]. International Conference on Signal Processing & Communication, IEEE, 2014.
- [16] YANG Z, CHENG J, QI Q, et al. A method of UWB radar vital detection based on time extraction of strong vital signs [J]. Journal of Sensors, 2021: 1-10.
- [17] 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.
- [18] 张群英,方广有. 伪随机序列编码脉冲信号在探地雷达中的应用研究 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 424-428.
- [19] NG H J, FEGER R, STELZER A. A fully-integrated 77-GHz UWB pseudo-random noise radar transceiver with a programmable sequence generator in SiGe technology [J]. IEEE Transactions on Circuits & Systems I Regular Papers, 2014, 61(8):2444-2455.
- [20] 王伟. 伪随机编码超宽带探地雷达技术研究 [D]. 北京:中国科学院大学, 2012.
- [21] XIA Z, FANG G, YE S, et al. A novel handheld pseudo random coded UWB radar for human sensing applications [J]. IEICE Electronics Express, 2014, 11(23):20140981.
- [22] 苏海,张晓娟,叶盛波,等. 一种基于射频开关切换的伪随机编码超宽带多发多收雷达设计 [J]. 雷达学报, 2017, 6(1):12.
- [23] SRIVASTAV A, NGUYEN P, MCCONNELL M, et al. A highly-digital multi-antenna ground-penetrating radar (GPR) system [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69: 7422-7436.
- [24] 庞娜. MIMO 雷达信号处理技术及实现的研究 [D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [25] 刘燕. 高分辨率及新模式 SAR 成像算法研究 [D]. 西安:西安电子科技大学, 2012.
- [26] MUDUKUTORE A S, CHANDRASEKAR V, KEELER R J. Pulse compression for weather radars [J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 2007, 36(1):125-142.
- [27] PEČOVSKY M, GALAJDA P, SLOVÁK S, et al. M-sequence ground-penetrating radar with novel front-end concept [J]. Acta Electrotechnica et Informatica, 2018, 18(2): 11-18.
- [28] 李超,张宁. 一种新的互补信号在高频地波雷达中的应用 [J]. 电子与信息学报, 2011, 33(8): 1839-1844.
- [29] 杜晓林,苏涛,王旭,等. 基于 Golay 互补序列空时编码的 MIMO 雷达波形设计 [J]. 电子与信息学报, 2014, 36(8): 1966-1971.
- [30] 崔琪,顾金良,刘庆国,等. 基于 DSP+FPGA 的高速数据采集系统的设计 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(1):93-98.
- [31] BALLAL T, AL-NAFFOURI T Y. Low-sampling-rate ultra-wideband channel estimation using equivalent-time sampling [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62: 4882-4895.
- [32] CHEN C, WU S, MENG S, et al. Application of equivalent-time sampling combined with real-time sampling in UWB through-wall imaging radar [C]. International Conference on Instrumentation, IEEE, 2011.
- [33] GALATI G, PAVAN G, PALO F D. Generation of pseudo-random sequences for noise radar applications [C].

2014 15th International Radar Symposium (IRS),
IEEE, 2014.

- [34] 杨云鹏,许波,高媛,等. GTX 接口在宽带自适应传输中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 171-179.

作者简介

贺靖,工程硕士,主要研究方向为伪随机编码超宽带雷达系统设计。

E-mail:hejing19@mails.ucas.ac.cn

周斌,研究员,主要研究方向为超宽带雷达系统设计及信号处理、太赫兹雷达技术、射频电路。

E-mail:zhb@mail.ie.ac.cn

方广有,研究员,主要研究方向为超宽带电磁学理论及其应用、超宽带成像雷达技术、太赫兹成像技术。

E-mail:gyfang@mail.ie.ac.cn