



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2408600

引用格式:蒋文岳, 谢跃雷, 罗振维. 基于射频片上系统芯片的步进频探地雷达收发系统设计[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(21): 8955-8965.

Jiang Wenyue, Xie Yuelei, Luo Zhenwei. Design of stepped frequency ground penetrating radar transceiver system based on RFSOC[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(21): 8955-8965.

电子技术、通信技术

基于射频片上系统芯片的步进频探地雷达收发系统设计

蒋文岳¹, 谢跃雷^{1,2*}, 罗振维¹

(1. 桂林电子科技大学信息与通信学院, 桂林 541004; 2. 南宁桂电电子科技研究院有限公司, 桂林 541004)

摘要 步进频探地雷达具有灵敏度高、动态范围大、平均功率大等优点,设计并实现了一种基于射频片上系统芯片(radio frequency system on chip,RFSOC)的步进频探地雷达收发系统。该系统主要包含发射链路、接收链路、时钟单元、可程序化逻辑门阵列(field programmable gate array,FPGA)控制系统以及数据传输单元等模块,通过设置发射端与接收端的数控振荡器(numerically controlled oscillator,NCO)多片同步从而实现载波同频同相,保证雷达收发信号的相位相干性,并在数据传输单元中设计接收时窗。实验测试结果表明,该系统能够实现频率范围 200 MHz~2 GHz、步长 2 MHz 的步进频率信号发射和接收,能够实现对自由空间、沙坑以及沥青路面等多个场景目标的有效探测。

关键词 探地雷达; 步进频; 多片同步; 同频同相

中图分类号 TN957; 文献标志码 A

Design of Stepped Frequency Ground Penetrating Radar Transceiver System Based on RFSOC

JIANG Wen-yue¹, XIE Yue-lei^{1,2*}, LUO Zhen-wei¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;

2. Nanning Guidian Electronic Technology Research Institute Co., Ltd., Guilin 541004, China)

[Abstract] The stepped frequency ground penetrating radar has the advantages of high sensitivity, large dynamic range, and high average power. Radio frequency system on chip(RFSOC) based stepped frequency ground penetrating radar transceiver system design was designed and implemented. The system mainly includes modules such as the transmission link, reception link, clock unit, field programmable gate array(FPGA) control system, and data transmission unit. By setting multiple numerically controlled oscillator(NCO) for synchronization between the transmission and reception ends, the carrier was synchronized on the same frequency and phase, ensuring the phase coherence of radar transmission and reception signals. A receiving time window was also designed in the data transmission unit. The experimental test results show that the system can achieve the transmission and reception of step frequency signals with a frequency range of 200 MHz~2 GHz and a step size of 2 MHz, and can effectively detect multiple scene targets such as free space, sand pits, and asphalt pavements.

[Keywords] GPR; step frequency; multi tiles synchronization; same frequency and same phase

探地雷达(ground penetrating radar,GPR)是一种无损检测技术装置,通过发射高频电磁波并接收其反射信号来探测地下结构和物体。自 20 世纪 70 年代

以来,GPR 在地质勘探以及道路养护方面,探地雷达能够实现对地质结构分界层的精准定位和对于公路病害的检测;在军事方面,探地雷达能够有效地探测

收稿日期: 2024-11-18 修订日期: 2025-04-16

基金项目: 南宁市科学研究与技术开发计划(20231011)

第一作者: 蒋文岳(1998—),男,汉族,广西玉林人,硕士研究生。研究方向:探地雷达。E-mail:jwy982@163.com。

* 通信作者: 谢跃雷(1975—),男,汉族,河北邯郸人,硕士,教授。研究方向:通信信号处理、阵列信号处理及信号处理的 VISL 设计实现。
E-mail:ylxie@guet.edu.cn。

投稿网址:www.stae.com.cn

地下掩埋目标,例如:地雷、陷阱、地下工事等;在考古工作中探地雷达也承担着一定的重要角色,能够帮助考古人员对地下掩埋的建筑和物品进行无损探测,有利于保护文物^[1]。其优势在于能够提供高分辨率的地下成像,并且在探测过程中对环境的破坏最小^[2]。目前 GPR 的体制主要有脉冲、步进频、线性调频等几种,其中步进频探地雷达(steped frequency ground penetrating radar, SFGPR)因其实现原理简单、探测深度深、动态范围大等优点,引起研究人员广泛关注。与传统的冲击体制 GPR 相比,步进频体制的 GPR 可以克服雷达探测距离与目标分辨率之间的矛盾,具有更好的发展前景。

文献[3]使用 Vivadi 天线阵列与矢量网络分析仪搭建了一套全极化探地雷达系统,在该系统中通过 PC 控制单元驱动矢量网络分析仪以及天线开关驱动器,并在系统后端设计适用于系统的数据处理方法,实现对塌陷路面的有效检测。在文献[4]中利用直接数字合成(direct digital synthesis, DDS)数字芯片 AD9914 实现相位连续的快速跳频。在硬件系统中使用 Kintex 评估板和 Spartan 评估板通过多板联调的方式分别进行逻辑控制和处理算法执行,并在后续的公路实验当中取得了较好的探测结果。文献[5]使用分立元件设计步进频探地雷达系统,通过 NI 采集卡和 Labview 平台对信号进行联合采集,并利用 FPGA 编程采集和处理数据,最后在 PC 端显示目标的探测结果,实验结果实现了步进扫频宽带雷达在浅地层探测中的应用。文献[6]以矢量网络分析仪为核心构建的多输入多输出极化步进频率探地雷达系统通过对典型目标体的探测实验通过叠加 CMP 数据压制噪声,对地下目标实现有效检测。在文献[7]中以 TS201 芯片为处理核心搭配 DDS 芯片、AD 采集板以及 DSP 处理板,设计并实现了一种超宽带步进频率连续波探地雷达数字信号接收机,该接收机成功地实现了在载体行进速度小于 40 km/h 的情况下对前方地距 5~20 m 方位 6 m 范围内地表浅埋目标的实时合成孔径成像和目标检测。

综上所述,目前步进频探地雷达主要采用矢量网络分析仪、控制器加 DDS 芯片等方法实现,集成度较低且带宽较窄。现提出一种基于射频片上系统芯片(radio frequency system on chip, RFSoC)的探地雷达系统设计。该设计主要优势在于实现收发两端数控振荡器(numerically controlled oscillator, NCO)载波同步的基础上,仅需 2.5 ms 就能完成 1.8 GHz 带宽的快速步进频扫频。依靠步进频信号体制大时宽、大带宽的特点增加有效探测距离的同时

提高探地雷达距离分辨率。系统设计中充分利用 FPGA 的系统时钟资源,采用多通道并行数据处理与传输架构,在确保雷达高速运行的同时,实现对探测区域的有效探测,极大地提升了探测效率,可在极短时间内获取丰富的地下信息。

1 步进频探地雷达工作原理

1.1 步进频雷达原理分析

步进频雷达的雷达信号为脉冲间隔以及频率间隔固定且相参的脉冲串信号^[8]。假设步进频雷达的脉冲个数为 N ,起始频率为 f_0 ,频率间隔为 Δf ,脉冲持续时间为 T_p ,脉冲间隔为 T_r ,由此可得信号中的第 n 个脉冲的频率为

$$f_n = f_0 + (N - 1)\Delta f \quad (1)$$

步进频信号的表达式为

$$x(t) = Au(t - nT_r) \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)t] \quad (2)$$

式中: A 为信号幅度; $u(t)$ 为信号的复包络; $n = 1, 2, \dots, N$ 。

步进频信号的时频变化关系图如图 1 所示。

假设发射信号在传播过程中环境的介质均匀且无损耗,目标的距离为 d ,反射系数为 1,则信号在经过目标之后产生回波,并被天线接收,此时回波信号的表达式为

$$y(t) = Au(t - nT_r - \tau) \exp[j2\pi(f_0 + n\Delta f)(t - \tau)] \quad (3)$$

式(3)中: τ 为回波信号时间延迟,且该延迟与天线到目标之间的距离关系为

$$\tau = 2d \sqrt{\epsilon_r}/c \quad (4)$$

式(4)中: c 为光速; ϵ_r 为相对介电常数。

将发射端的本振信号与回波信号进行混频、滤波之后得到回波信号为

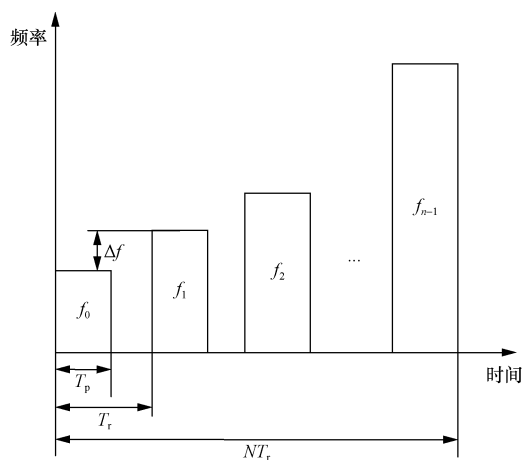


图 1 步进频信号时频关系图

Fig. 1 Step frequency signal time-frequency relationship diagram

$$s(t) = Au(t - nT_r - \tau) \exp(-j2\pi f_n \tau) \quad (5)$$

在 $t = nT_r + \tau$ 时刻,基带回波为

$$S(n) = \exp(-j2\pi f_n \tau) \quad (6)$$

通过离散傅里叶逆变换合成步进频脉冲串信号并进行归一化处理^[9],该信号的表达式为

$$H_m = \frac{1}{N} \exp(-j2\pi f_0 \tau) \times \exp\left[j\frac{N-1}{2} \frac{2\pi}{N} (1 - N\Delta f \tau)\right] \times \frac{\sin\left[\frac{\pi}{N} (1 - N\Delta f \tau)\right]}{\sin\left[\frac{\pi}{N} (1 - N\Delta f \tau)\right]} \quad (7)$$

对 H_m 进行取模,可得

$$|H_m| = \frac{\sin\left[\frac{\pi}{N} (1 - N\Delta f \tau)\right]}{N \sin\left[\frac{\pi}{N} (1 - N\Delta f \tau)\right]} \quad (8)$$

则脉冲的峰值出现位置为

$$m_k = N\Delta f \tau \pm kN, k \in Z \quad (9)$$

令 $m_0 = N\Delta f \tau$, 天线与探测目标之间的距离关系式为

$$d = \left[\frac{cm_0}{2N\Delta f}, \frac{c(m_1 \pm N)}{2N\Delta f}, \frac{c(m_1 \pm 2N)}{2N\Delta f}, \dots \right] \quad (10)$$

由式(9)可以得知,对步进频信号进行脉冲压缩之后,能够得到一个主瓣宽度为 $1/N\Delta f$ 的 sinc 脉冲信号^[10]。

1.2 探地雷达二维成像分析

对于探地雷达而言,地下目标以面的方式呈现,通过距离像和方位像获取目标相对于雷达的位置关系^[11]。在二维平面当中距离像与方位像相互垂直,在探地雷达的成像当中,距离像是地下目标的所处位置,方位像是雷达在地面移动的过程中雷达与目标之间的回波方向变化。

在探地雷达成像的过程中,使用天线阵列或移动天线形成多个孔径,将孔径沿着一个方向进行排列发射宽带电磁波并接收回波。如图2所示。

探地雷达在发射电磁波的过程中会出现天线之

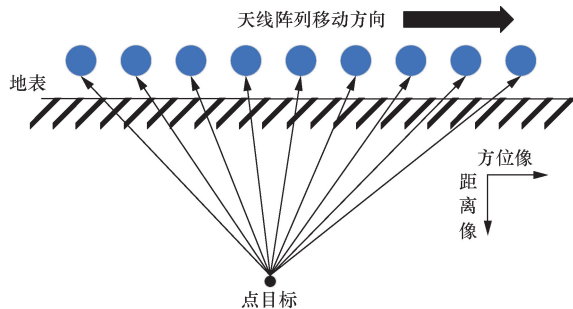


图2 探地雷达原始回波示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the original echo of ground penetrating radar

间的耦合波、地表强反射波以及目标反射波等3个回波信号的叠加^[12]。地下目标的回波信号相较于天线直达波和地表强反射波而言能量较小,因此需要后续信号处理提高信噪比,避免目标回波淹没在天线直达波和地表强反射波当中并最终合成距离像,通过 A-scan 的形式表现^[13]。后续在运动扫频的过程中,将天线阵列或天线移动经过点位置的的回波信号进行频谱合成,实现二维 B-Scan 成像^[14]。

2 步进频信号参数设计

在探地雷达步进频信号的设计中,需要对步进频脉冲宽度 N 、脉冲重复周期 T_r 、步进量 Δf 、扫频等效带宽 B 等参数进行设计。

所设计的步进频探地雷达收发系统的设计要求如表1所示。

表1 步进频雷达探测要求

Table 1 Detection requirements for stepped-frequency radar

步进频雷达探测要求	数值
最大探测距离 R_{\max}/m	5
距离分辨率 δ_R/m	0.083

由设计的探地雷达最大探测距离计算步进频脉冲串重复周期,可以表示为

$$T_r = \frac{2R_{\max}}{c} \quad (11)$$

最终计算的结果为

$$T_r \geq 33.3 \text{ ns} \quad (12)$$

由雷达距离分辨率 δ_R 与光速 c 计算步进频脉冲的等效带宽 B , 计算表达式为

$$B = \frac{c}{2\delta_R \sqrt{\epsilon_r}} \quad (13)$$

式(13)中: ϵ_r 为土壤中的介电常数,假设土壤中的介电常数 $\epsilon_r = 1$ 时,最终计算的理论等效带宽 B 结果为

$$B = 1.8 \text{ GHz} \quad (14)$$

对于步进量 Δf 的设计,主要与雷达的距离分辨率 δ_R 与不模糊距离窗 R_u 的大小相关。根据步进频信号基本原理可以得知等效带宽 $B = \Delta f N$, 其中 N 为子脉冲个数,当子脉冲个数固定时, Δf 的增大会导致等效带宽增大从而提高雷达的距离分辨率^[15]。除此之外, Δf 还决定了不模糊距离窗 R_u 的大小,根据相邻脉冲相位差计算公式 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta f \frac{2R_u}{c}$, 当

$\Delta\varphi < 2\pi$ 时则不会造成相位模糊。由上述分析 Δf 的计算公式可以表示为

$$\Delta f = \frac{c}{2R_u} \quad (15)$$

根据项目的需求,设计 $R_u = R_{\max}$ 时,步进量的计算结果为

$$\Delta f < 30 \text{ MHz} \quad (16)$$

综合上述分析,为使系统分辨率更高,应该使 Δf 在范围内增大,但是为了增大最大模糊距离,又需要 Δf 在范围内减小,由于设计中的系统带宽确定为 1.8 GHz,综合考虑探地雷达系统频率与探深、整体扫频时间和实时性等因素,设计合适的 Δf 确定脉冲子个数 N ^[16]。探地雷达系统的信号起始频率为 200 MHz,频率步进量为 2 MHz,子脉冲个数为 901,终止频率为 2 GHz。

在确定了 Δf 之后,根据雷达的距离分辨 δ_R 与最大不模糊距离窗 R_u 可以确定脉冲宽度 T_p ,其计算公式可以表示为

$$\frac{\delta_R}{R_u} = \frac{cT_p}{2} / \left(\frac{c}{2\Delta f} \right) = T_p \Delta f \quad (17)$$

当 $T_p \Delta f > 1$ 时会导致 R_u 小于 δ_R ,在后续的信号处理中进行逆快速傅里叶变换(inverse fast Fourier transform, IFFT)后,目标在最大不模糊距离窗中出现折叠现象,出现伪目标^[17]。为避免该情况的发生,需要使 $T_p \Delta f < 1$,因此经过计算之后 T_p 的结果为

$$T_p < 500 \text{ ns} \quad (18)$$

3 步进频探地雷达收发系统设计

3.1 硬件架构及参数配置

3.1.1 硬件架构

所设计的探地雷达的硬件主控部分使用 Xilinx 公司的 Zynq-UltraScale + RFSOC 系列芯片,该系列芯片内部包含了 ARM Cortex-A53 处理器、可编程逻辑单元、时钟单元、数模转换器(digital-to-analog converter, DAC)发射单元、模数转换器(analog-to-digital converter, ADC)接收单元、数据传输单元^[18]。所选用的 RFSOC 型号为 XCZU47DR-FFVE1156-2-E,该型号的 RFSOC 在 DAC 发射端的最大采样率为 9.85 GHz,ADC 接收端最大采样率为 5 GHz,最大的 NCO 载波设置能够达到采样率的一半,在数据链路的传输上最大支持 800 MHz 的数据时钟^[19]。相对于传统的 FPGA 板载射频芯片的电路方案,该芯片最大的优势在于将射频收发控制电路以及 FPGA 和 ARM 控制单元集成在同一颗芯片内部,这使得系统在设计的过程当中能够更大程度地提高系统的运行效率,降低了系统设计的复杂性^[20]。

基于 RFSOC 的探地雷达硬件架构如图 3 所示,主要包含发射链路、接收链路、时钟单元、FPGA 系统控制部分、ARM 内核。其中发射链路由基带信号单元、插值滤波器、NCO、混频器及 DAC 构成,接收链路包括 ADC、混频器、NCO、抽取滤波器、回波信号采集单元构成。

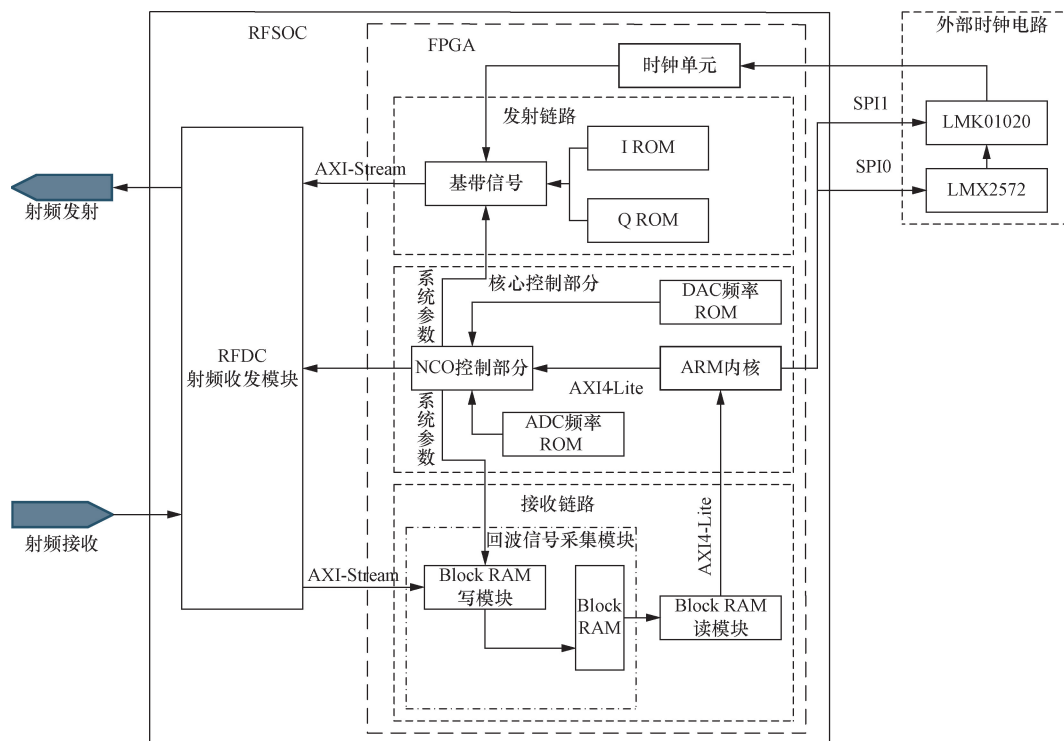


图3 探地雷达硬件架构

Fig.3 Hardware architecture of ground penetrating radar

3.1.2 参数配置

参数配置主要包括 DAC、ADC、滤波器、混频器、同步及时钟芯片等参数的设置。参数配置过程如图 4 所示。

首先将 RFSOC 的 DAC 工作方式配置为 IQ input to Real output,ADC 的工作方式配置为 Real input to IQ output。其次,根据第三部分中的信号参数设计进行采样率配置,将 DAC 与 ADC 的采样率都设置为 4.915 2 GHz。将 DAC 发射通道当中的插值滤波器配置为 10 倍插值,ADC 接收通道中的抽取滤波器配置为 10 倍抽值。根据 RFSOC 采样率、插值倍数(抽值倍数)与数据时钟之间的关系,可以得到 DAC 与 ADC 的数据时钟为 491.52 MHz,设置混频器时钟与数据时钟大小相等同为 491.52 MHz。在 RFDC MTS (multi-tile synchronization) 配置中,需要使能 SYSREF 信号,并开启多片同步组中全部的片上时钟。

通过 ARM 核的完成以下配置。

(1)通过 ARM A-53 内核中的 SPI 接口,分别向时钟芯片 2572 和 01020 内的寄存器写入输出时钟频率和分频倍数,确保时钟芯片生成所需的时钟信号。

(2)配置多片同步。多片同步配置内容包含: NCO 相位累加器清零、配置 NCO 以 SYSREF 动态更新事件触发方式更新、系统由于上电过程产生的延时时间校准。

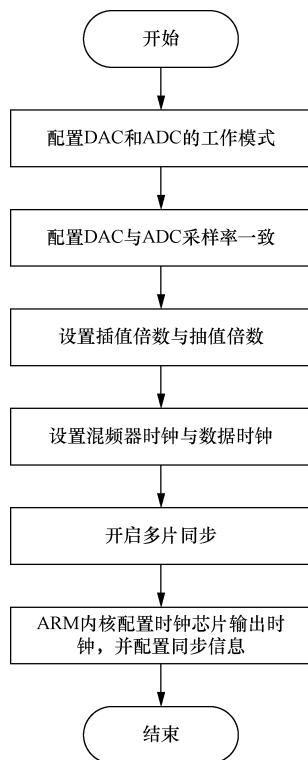


图 4 探地雷达参数配置

Fig. 4 Ground penetrating radar IP configuration

3.2 收发系统逻辑设计

基于 RFSOC 的探地雷达收发系统逻辑设计主要分为:时钟单元设计、基带信号输出模块设计、NCO 跳频单元设计、RAM 读取数据模块设计。

3.2.1 时钟单元

时钟单元作为系统上 PL 端底层驱动的基本时钟来源,在系统上电的初始状态时,在 ARM 内核完成时钟寄存器的写入之后,时钟芯片输出相应的差分时钟信号。在探地雷达系统设计中,FPGA 的基础系统时钟与混频器的时钟分别为 122.88 MHz 和 491.52 MHz。在此基础之上,通过 Verilog 原语对 122.88 MHz 的系统时钟实现差分信号转单端信号,后续通过 clock wiz IP 实现对 122.88 MHz 的 FPGA 系统时钟进行倍频输出,得到 491.52 MHz 的 DAC 与 ADC 的数据流时钟,同时通过自主设计分频器产生同步信号 SYSREF,并将该信号与 RFDC IP 核的同步信号输入端口相连接。时钟单元设计如图 5 所示。

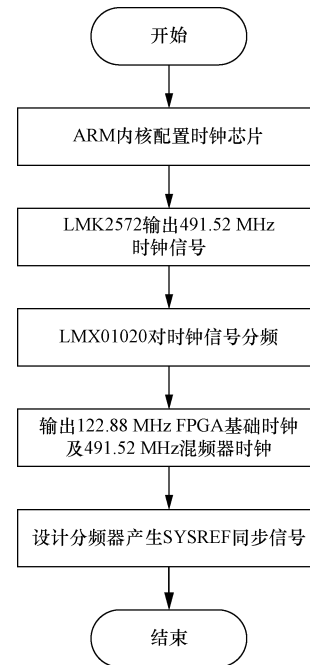


图 5 时钟单元设计

Fig. 5 Clock unit design

3.2.2 基带信号模块

在基带信号的输出设计中,以 RFDC IP 的数据流时钟作为基础,使用两个分布式 ROM IP 分别存储 I、Q 信号,从而在后续的步进频脉冲串生成中持续读取 I、Q 信号。在基带信号单元中设置 AXI4-Stream 数据流信号主端口,通过组合逻辑将 ROM 中的 IQ 值通过位拼接的方式赋值给数据流中的 TDATA 输出。将数据流主端口与 RFDC 的数据流从端口相连接,实现 DAC 基带信号输入。基带信号模块工作流程如图 6 所示。

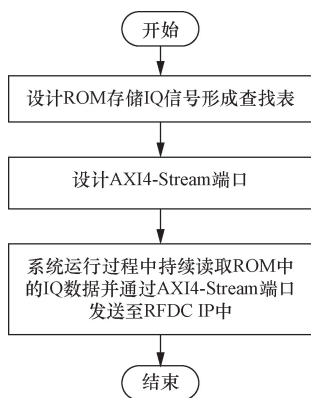


图6 基带信号模块设计

Fig. 6 Baseband signal module design

3.2.3 NCO 跳频单元

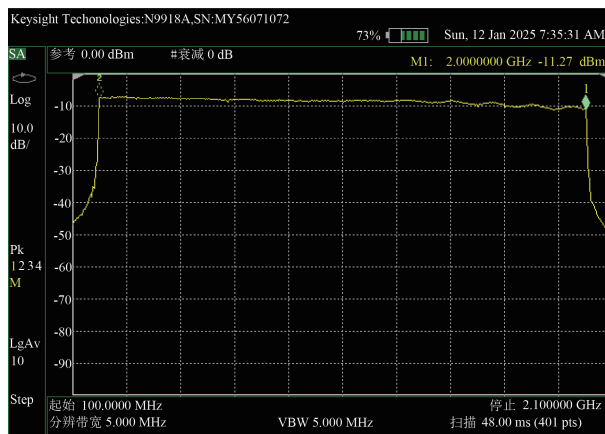
NCO 跳频单元的设计作为本文探地雷达设计中的重点部分,使用 AXI-Lite 总线的数据时钟,以自定义 IP 核的方式进行设计。将 ADC/DAC 的步进频跳频频点数据存放至 ROM 当中形成查找表,并将 IP 核的引脚与 RFDC IP 上的 NCO 配置引脚相连接^[21]。具体实现逻辑为:在 0 时刻对所有通道的 NCO 进行同步门控,通过门控的方式在 RFDC IP 内部选通同步信号,当门控信号为高电平状态时,同步信号 SYSREF 不会对频点的更新产生影响,并在 1 时刻读取 ROM 中所存储的步进频频点数据,在完成数据的获取之后,首先更新 DAC0 通道,在系统反馈信号 BUSY 持续高电平后,控制其余的 DAC 通道以及 ADC 通道进行同步更新信号的触发,这些通道将以 DAC0 通道的更新时序作为基准进行更新,在所有通道都完成更新之后,BUSY 信号变为持续的低电平,在这时解除门控,使得同步信号的第一个上升沿,触发系统中所有收发通道 NCO 的更新设置同时生效^[22]。最终输出信号的时域及频域波形如图 7 所示。图 7(a)为输出信号的时域波形图,其中脉冲重复周期为 2.02 μs ,脉冲持续时间为 500 ns。图 7(b)为输出信号的频谱图,图中显示信号的频率为 200 MHz ~ 2 GHz,等效带宽为 1.8 GHz,并且 200 MHz 时信号的输出功率为 -7.759 dBm,2 GHz 为 -11.27 dBm。

3.2.4 RAM 模块

RAM 读取数据模块设计在设计中主要工作为抓取雷达回波数据,并将雷达回波数据发送至 ARM 端。RAM 读取数据模块的设计需要考虑硬件中的链路传输延时、电磁波传播延时,进行回波接收时间窗的设计。在回波数据接收的过程中,由于不同延迟的回波信号叠加在一起,为确保回波数据中包含被测目标信息,在完成 NCO 同步更新之后延时 200 ns 进行回波数据抓取,并将抓取的数据进行相干积累,并将最终的值写入 Block RAM 当中进行缓存。



(a) 时域波形



(b) 频域波形

图7 输出波形图

Fig. 7 Output waveform

在完成一组 A-Scan 数据的接收之后,将数据通过 AXI-Lite 总线发送至 ARM 内核中。在 ARM 内核中通过串口打印的方式发送至 PC 端完成数据接收。RAM 读取数据模块设计如图 8 所示。

4 实验结果与分析

所设计的探地雷达分别在自由空间、沙坑、两个不同的沥青柏油路面进行分组测试实验。其中自由空间中则是以角铁作为目标,沙坑中以掩埋的金属管为目标,沥青柏油路面实验中则可能存在排水管或其他地下目标。通过对 4 个场景中的不同目标进行探测,验证该探地雷达的性能。

在实验中所使用的天线为空耦天线,为了更好地区分空耦直达波、地面反射波以及目标回波,在系统 PC 端进行数据处理工作,实验的结果图中时间参数均为单程时延。

4.1 自由空间测试

基于 RFSOC 实现步进频探地雷达的实物硬件组成如图 9 所示。

对于自由空间的实验主要分为两个部分,其中第一部分为对目标物角铁进行 A-scan 距离成像测试,第二部分为将目标物角铁在天线前方进行横向运动进行 B-Scan 成像测试。自由空间的实验场景如图 10 所示。

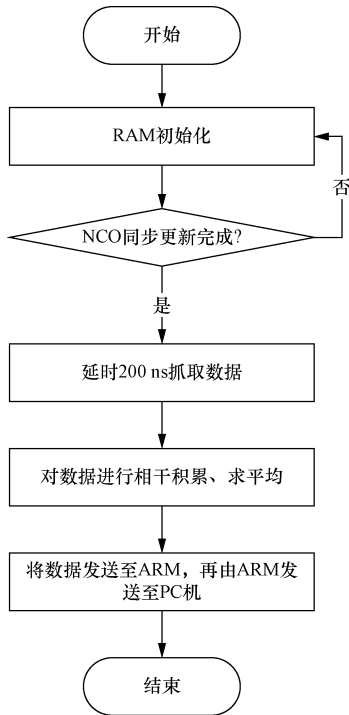
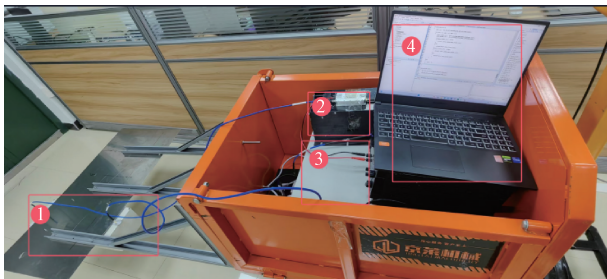


图 8 RAM 抓取数据单元设计

Fig. 8 RAM capture data unit design



①为收发天线;②为信号功放;③为 RFSOC 射频电路板以及电磁屏蔽箱;④为 PC 端部分

图 9 探地雷达实物图

Fig. 9 Ground penetrating radar physical map

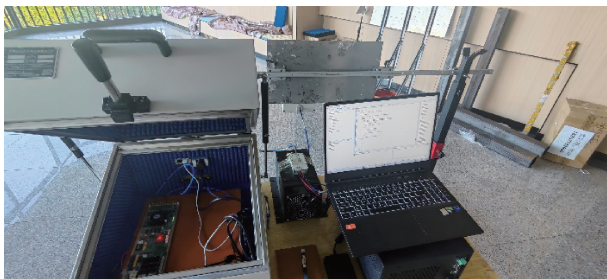


图 10 自由空间实验场景

Fig. 10 Free space experiment scene

在系统的连线完成后,打开功放,保持天线静止,其中收发天线之间间隔大约 20 cm。在自由空间 A-scan 测试过程中,将目标角铁分别放在正对发射天线的 0.5、1、1.5 m 处,分别获取 3 次不同距离的回波,经数据处理去除直达波后,得到的 A-scan 成像如图 11 所示。可见,0.5、1、1.5 m 处目标反射电磁波的到达时间分别为 3.884 57、7.158 71、11.098 8 ns,通过式(4)计算得到最终的测量结果为 0.582、1.073、1.665 m,与实际目标距离基本吻合,误差主要是由摆放目标时的测量误差以及探地雷达系统未校准造成的。

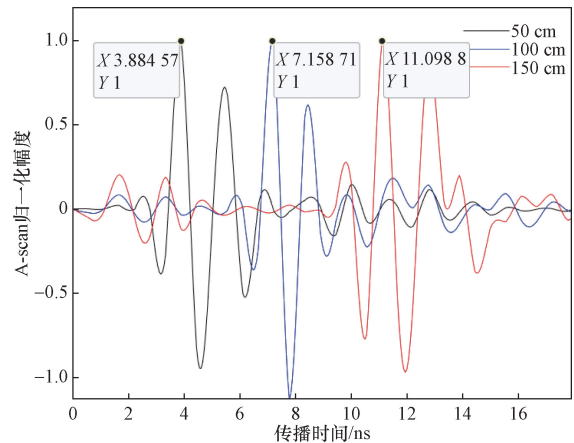


图 11 A-scan 成像效果

Fig. 11 A-scan imaging results

在自由空间 B-Scan 的测试中,在水平直线上移动目标角铁,使用逆合成孔径成像法进行实验,测试结果如图 12 所示。从图 12(a)中能够看出,在对数据进行处理之前,只能明显看出当前自由空间中的天线直达波,目标角铁被淹没在强信号之中。在图 12(b)中经过过去耦合、归一化、加窗等操作之后,得到的 B-Scan 能够明显看到目标在自由空间中的移动轨迹。

4.2 沙地测试

在沙地测试中通过人为在沙坑中埋入已知目标进行检测。沙地测试场景如图 13 所示。

实验分别在沙坑中 5、10、22 cm 处埋入钢管进行已知目标探测对照试验。在实验过程中将试验车沿着钢管的上方进行扫描,其扫描结果如图 14 所示。

根据图 14 所示,在图 14(a)中能够清晰地看到天线的耦合位置且由于耦合波过强,导致目标回波被淹没。在经过后续信号处理之后的图 14(b)~图 14(d)中能明显看到 B-Scan,由于实测环境中沙坑较为湿润且沙子的松软程度不均匀,因此测试的相对介电常数波动较大。沙坑中的相对介电常数为 10~30。为了凸显深层目标,在沙坑实验处理数据中进行距离增益控制[图 14(c)、图 14(d)]。根据图 14 中所示,5 cm 深度的钢管目标探测时延为 2.1 ns,

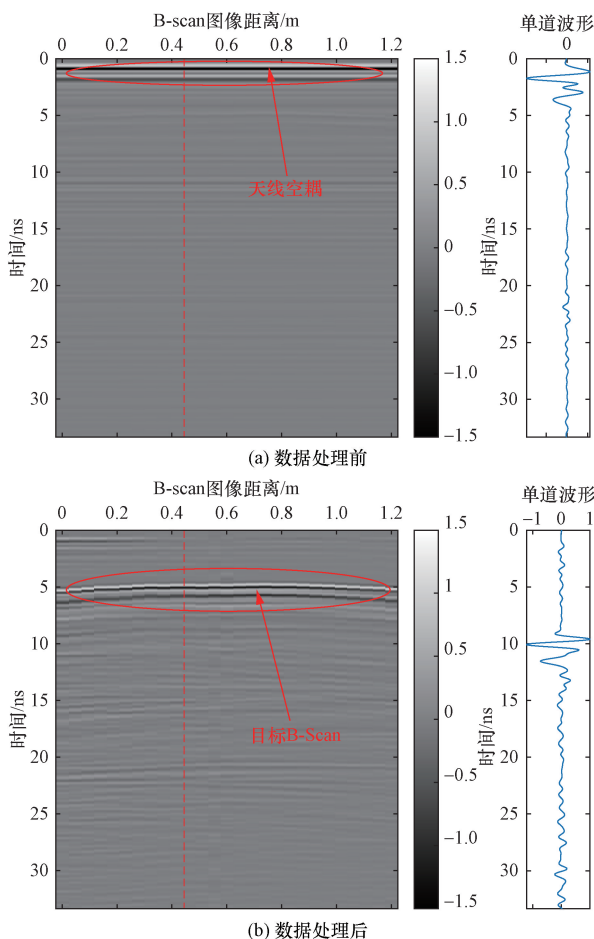


图 12 自由空间测试结果
Fig. 12 Free space test results



红框处为所埋目标位置
图 13 沙地测试场景

Fig. 13 Sand test scenario

10 cm 深度的钢管目标探测时延为 2.5 ns, 22 cm 深度的钢管目标探测时延为 3.16 ns, 从探测结果来看随着确知目标埋入深度不断增加, 目标钢管 B-Scan 呈现趋势距离沙坑表面越来越远。

4.3 沥青路面测试

沥青路面测试是所设计的探地雷达对于未知路面下所包含的地下设施或地下结构进行探测。沥青柏油路面测试场景如图 15 所示。

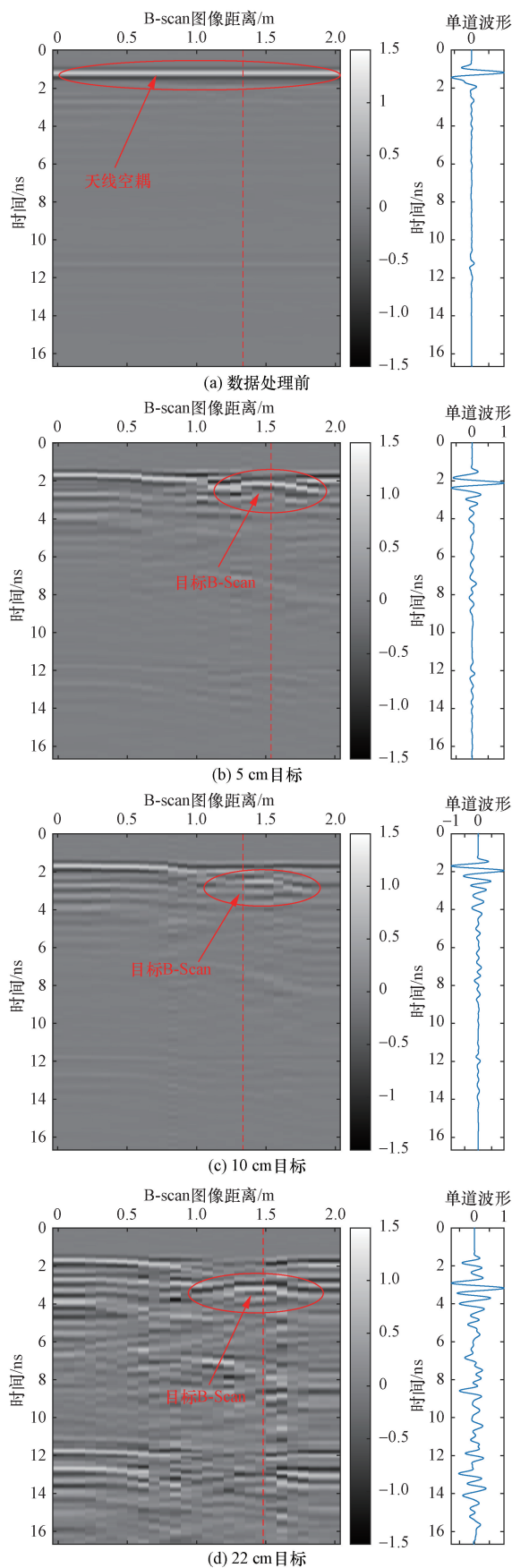


图 14 沙坑扫描结果
Fig. 14 The results of the bunker scan



(a) 沥青柏油路测试场景1



(b) 沥青柏油路测试场景2

红框处为可能存在地下目标的位置

图 15 沥青柏油路测试场景

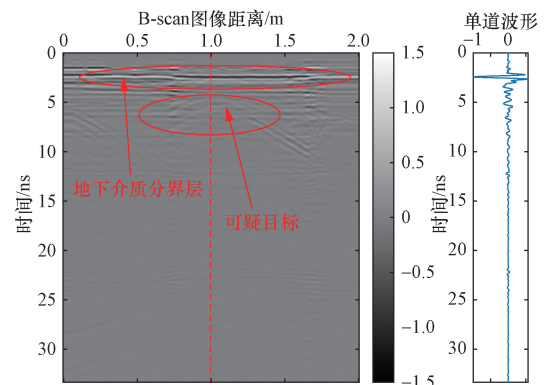
Fig. 15 Asphalt road test scenario

在实验过程中,实验车沿着路面进行直线运动,在天线移动的过程当中,系统持续向地表发射步进频信号并接收回波。根据实验环境可以知道,沥青柏油路面的表层为沥青,但是其地下介质处于未知状态,其中未知目标可能包含了水泥混凝土路面层、地下石块、含土壤和地下管道等。图 15(a)是沥青路面实测实验场景 1,在该场景中天线水平移动距离为 2 m;图 15(b)是沥青路面实测实验场景 2,该场景下天线水平移动距离为 20 m。沥青柏油路场景 1 探地结果如图 16 所示,沥青柏油路场景 2 探地结果如图 17 所示。

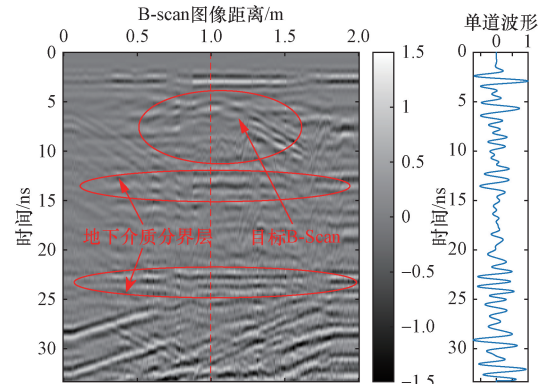
经过对实验结果图进行分析,图 16(a)是经过数据处理之后所呈现的 B-Scan 结果,能够清晰地看到地表下沥青和水泥的介质分界层。为了使深层目标得到凸显,在数据处理中采用距离增益控制,处理结果如图 16(b)所示。在水平方位 1~1.5 m,距离像 5.5~6.2 ns 处出现明显的目标 B-Scan,并且在探测时延的 13.1 ns 和 23.3 ns 处出现更深的地下介质分界层。在图 17 中,在 5~10 ns 的探测时延之间出现了多个目标 B-Scan,并且在 13.5 ns 和 22.1 ns 处出现地下介质分界层。

5 结论

通过步进频信号大时宽和超大等效带宽的特点,设计了基于 RFSOC 的步进频探地雷达系统。使用步进频信号的体制以及 RFSOC 射频直采硬件使得探地雷达系统设计相对于传统的探地雷达系统而



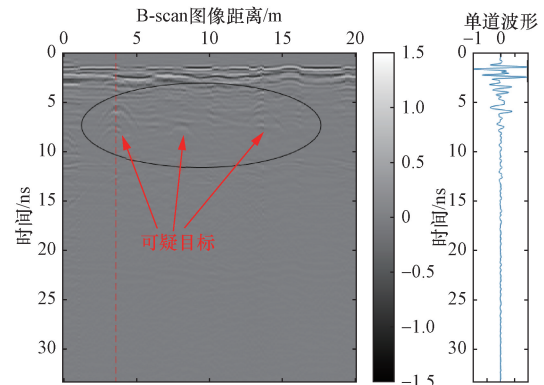
(a) 处理结果1



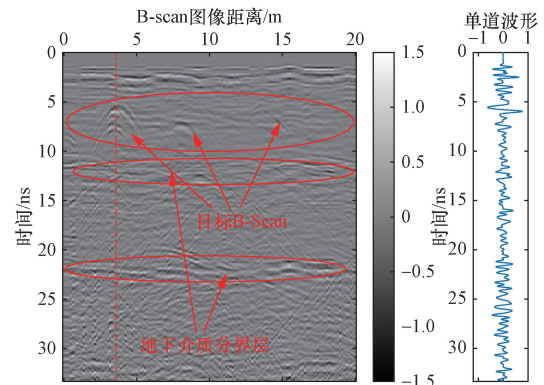
(b) 处理结果2

图 16 沥青柏油路场景 1 探地结果

Fig. 16 Ground exploration results of asphalt road scene 1



(a) 处理结果1



(b) 处理结果2

图 17 沥青柏油路场景 2 探地结果

Fig. 17 Ground exploration results of asphalt road scene 2

言得到了极大的简化,提高了雷达系统的运行效率。同时,所设计的探地雷达系统包含灵活性高、性能强大、体积小、功耗低等优点。从地下目标的探测结果分析中可以清晰地看到所设计的探地雷达无论是浅层目标还是深层目标都能够实现有效探测,该款雷达对于中国高速公路无损探测、文物考古和军事方面都具有巨大的用途和发展前景。后续工作将进一步完善系统的数据处理方法,如探地雷达的系统校准,进一步提高成像的效果和距离分辨率。

参 考 文 献

- [1] 何缘. 频率步进探地雷达信号源及信号处理研究与仿真设计[D]. 南昌: 南昌大学, 2023.
He Yuan. Research and simulation design of signal source and signal processing for frequency stepping ground penetrating radar [D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [2] 张明昊. 基于探地雷达的地下管线智能辨识技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Zhang Minghao. Research on intelligent identification technology of underground pipeline based on ground penetrating radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [3] 李晓天, 冯晖, 薛策文, 等. 基于VAA的全极化探地雷达系统及其在路面塌陷勘探中的应用[J]. 现代雷达, 2021, 43(4): 1-8.
Li Xiaotian, Feng Xuan, Xue Cewen, et al. VAA based fully polarized ground penetrating radar system and its application in road collapse exploration[J]. Modern Radar, 2021, 43(4): 1-8.
- [4] 苗永菲. 步进频率探地雷达SAR成像技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
Miao Yongfei. Research on SAR imaging technology of stepping-frequency ground penetrating radar [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [5] 陶春康, 汪海勇, 瞿诗华. 步进扫频宽带探地雷达信号处理[J]. 微波学报, 2020, 36(2): 67-70, 78.
Tao Chunkang, Wang Haiyong, Qu Shihua. Signal processing of step-sweep broadband ground-penetrating radar[J]. Journal of Microwave, 2019, 36(2): 67-70, 78.
- [6] 梁文婧, 冯晖, 刘财, 等. 多输入多输出极化步进频率探地雷达硬件系统开发[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(2): 483-490.
Liang Wenjing, Feng Xuan, Liu Cai, et al. Development of hardware system of Multi-input multi-output polarimetric stepped frequency ground penetrating radar [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2018, 48(2): 483-490.
- [7] 彭建, 杨泽帆, 白洁, 等. 基于探地雷达的地下管线埋深估计方法[J]. 雷达科学与技术, 2022, 20(1): 79-86.
Peng Jian, Yang Zefan, Bai Jie, et al. Underground pipeline depth estimation method based on ground-penetrating radar [J]. Radar Science and Technology, 2022, 20(1): 79-86.
- [8] 林禹全, 周斌, 方广有. 频率步进探地雷达的校准研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(11): 34-38.
Lin Yuquan, Zhou Bin, Fang Guangyou. Research on calibration of frequency stepper ground penetrating radar [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(11): 34-38.
- [9] 梁飞. 频率步进SAR雷达系统方案设计与信号处理实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
Liang Fei. Scheme design and signal processing implementation of frequency-stepping SAR radar system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [10] 张宝伟, 朱国富, 陆必应. 高帧率步进频穿墙成像雷达扫频方法[J]. 电讯技术, 2015, 55(9): 1031-1035.
Zhang Baowei, Zhu Guofu, Lu Biying. Frequency sweep method of high frame rate stepping frequency through-wall imaging radar [J]. Telecommunication Technology, 2015, 55(9): 1031-1035.
- [11] 王兆宇, 王军福. 高分辨步进频雷达回波信号模拟方法设计及实现[J]. 现代电子技术, 2015, 38(7): 7-11.
Wang Zhaoyu, Wang Junfu. Design and implementation of simulation method for echo signal of high resolution stepper radar [J]. Modern Electronic Technique, 2015, 38(7): 7-11.
- [12] 帅晓飞, 詹旭. 用于步进频连续波雷达旁瓣抑制的自适应CLEAN技术[J]. 电讯技术, 2015, 55(2): 163-167.
Shuai Xiaofei, Zhan Xu. Adaptive CLEAN technique for sidelobe suppression in stepper frequency CW radar [J]. Telecommunication Technology, 2015, 55(2): 163-167.
- [13] 曾祥桂. 基于APC算法的旁瓣抑制技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
Zeng Xianggui. Research on sidelobe suppression technology based on APC algorithm [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2014.
- [14] 乔旭, 杨峰, 齐振洪, 等. 矿井探地雷达背景杂波抑制方法综述[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(24): 10145-10158.
Qiao Xu, Yang Feng, Qi Zhenhong, et al. Overview of background clutter suppression methods for mine ground penetrating radar [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(24): 10145-10158.
- [15] 覃紫馨, 姜彦南, 徐立, 等. 基于YOLO算法的探地雷达道路图像异常自动检测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(27): 11505-11512.
Qin Zixin, Jiang Yannan, Xu Li, et al. Automatic anomaly detection of ground penetrating radar road images based on YOLO algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(27): 11505-11512.
- [16] 张汉华, 梁福来, 宋千. 低频超宽带步进频率收发系统的设计与实现[J]. 现代雷达, 2014, 36(5): 82-87.
Zhang Hanhua, Liang Fulai, Song Qian. Design and implementation of low frequency UWB stepping frequency transceiver system [J]. Modern Radar, 2014, 36(5): 82-87.
- [17] 龚杨春. VHF频段步进频探地雷达收发电路的设计及实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2021.
Gong Yangchun. Design and implementation of transceiver circuit of stepping-frequency ground penetrating radar in VHF band [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021.

- [18] 万相宏. 基于 RFSoc 的宽带 DBF 技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2024.
Wan Xianghong. Research on broadband DBF technology based on RFSoc [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2024.
- [19] 师浪, 张瑞安, 张宾. 基于 RFSoc 的小型化侦察干扰系统实现[J]. 电子设计工程, 2024, 32(19): 135-139.
Shi Lang, Zhang Rui'an, Zhang Bin. Implementation of a miniaturized reconnaissance and jamming system based on RFSoc[J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(19): 135-139.
- [20] 商林峰, 李彭飞, 张玉华. 基于 RFSoc 的超宽带数字接收机设计[J]. 现代雷达, 2024, 46(6): 115-118.
Shang Linfeng, Li Pengfei, Zhang Yuhua. Design of ultra-wide-band digital receiver based on RFSoc[J]. Modern Radar, 2019, 46(6): 115-118.
- [21] 查文韬. 基于 Zynq RFSoc 的通信信号模拟器设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
Zha Wentao. Design and implementation of communication signal simulator based on Zynq RFSoc [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.
- [22] 李光辉. 基于 RFSoc 的通信感知一体化实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
Li Guanghui. Integrated realization of communication perception based on RFSoc [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.