



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2401052

引用格式:郝婉瑞,谢跃雷.基于射频直采技术的步进频雷达收发系统设计[J].科学技术与工程,2025,25(3):1117-1124.

Hao Wannui, Xie Yuelei. Design of stepped-frequency radar transceiver system based on RF direct sampling technology[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1117-1124.

基于射频直采技术的步进频雷达收发系统设计

郝婉瑞¹, 谢跃雷^{1,2*}

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

摘要 针对步进频体制雷达发射信号子脉冲切换速度慢,收发信号相位不相干的问题,设计了一种基于射频直采技术的步进频雷达收发系统。该系统对 C 波段雷达信号进行射频直采,所有信号处理过程均在数字域进行,系统集成度高且功耗小;采用快速跳频方式产生步进频信号,在 6 ms 之内实现 1.8 GHz 带宽的扫频,系统工作频段为 200 ~ 2 000 MHz,频率步长 2 MHz,同时本系统中步进频信号参数可根据探测要求更改。实验测试结果表明,该步进频雷达系统可以实现一维测距功能。

关键词 射频直采; 步进频脉冲信号; 雷达; 快速跳频技术

中图分类号 TN957; **文献标志码** A

Design of Stepped-frequency Radar Transceiver System Based on RF Direct Sampling Technology

HAO Wan-rui¹, XIE Yue-lei^{1,2*}

(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] A stepped-frequency radar transmission and reception system based on RF direct sampling technology was designed to address the issues of slow switching speed of sub pulses and incoherent phase of transmission and reception signals in stepped-frequency radar. This system performs RF direct acquisition of C-band radar signals, and all signal processing processes were carried out in the digital domain. It also had high integration and low power consumption. It was generated stepped-frequency signals by fast frequency hopping, frequency sweep of 1.8 GHz bandwidth within 7 ms was gotten. The system operates in the frequency range of 200 ~ 2 000 MHz with a frequency step of 2 MHz. At the same time, the parameters of the stepped-frequency signal in this system can be changed according to detection requirements. The test results show that the stepped-frequency radar system can achieve one-dimensional ranging function.

[Keywords] RF direct acquisition; stepped-frequency pulse signal; radar; fast frequency hopping technology

步进频体制雷达可以在损失一定信号时长代价下,在频域中合成频率步进脉冲回波,以获得更宽的信号带宽,从而提高雷达分辨率,已广泛应用于国防、航空航天、商业等领域。步进频雷达优势在于:①降低雷达硬件实现的难度,步进频信号子脉冲的瞬时带宽非常窄,可以大大降低系统采样速率;②具有良好的数字可控性,可以通过软件更改步进频信号参数,满足不同的探测需求^[1];③对信号处理要求低,对回波信号进行多脉冲相参合成处理,即可获得探测目标的高分辨一维距离像^[2]。

文献[3]对步进频雷达的回波信号进行建模仿真,分析了步进频雷达的距离维和速度维的分辨能力,建立了扩展目标合成模型,验证了步进频雷达的可行性。文献[4]基于矢量网络分析仪,搭建了 Ku 波频段的步进频连续波干涉雷达,用于高铁车桥耦合振动监测,在 20 Hz 的采样频率下,对桥梁的自振频率和强振频率的频谱测量精度达 0.1 Hz。文献[5]利用太赫兹矢量网络分析仪,构建了 0.215 ~ 0.33 THz 步进频雷达近场成像系统,完成了对实验目标的三维成像,横向分辨率 2 mm × 2 mm,距离分辨

收稿日期:2024-02-11 修订日期:2024-06-05

基金项目:南宁市科学研究与技术开发计划(中央引导地方科技发展资金项目)(20231011)

第一作者:郝婉瑞(1998—),女,汉族,山西运城人,硕士研究生。研究方向:探地雷达。E-mail:hwr19816@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:ylx@guet.edu.cn。

率 ≤ 3 mm。文献[6]利用 AD9910 作为频谱源基带信号,通过 2 次混频和时域拼接,实现了 0.5 ~ 2.5 GHz 频段超宽带步进频雷达信号源,具有分辨率高、频率切换速度快的优点。文献[7]基于 FPGA (field programmable gate array) 和 DDS (direct digital synthesizer) 芯片设计了 VHF (very high frequency) 频段步进频探地雷达系统的收发电路,频段范围 60 ~ 180 MHz,频率步进长度 2 MHz,实现了基本的测距功能。文献[8]通过 FPGA 控制 PLL (phase-locked loop) 芯片 ADF4154,构成快速步进频信号,实现了 0.5 ~ 2.5 GHz 步进频雷达系统,通过实测的一维距离像验证了系统的整体性能。这些文献说明可以使用 FPGA + 射频芯片作为雷达硬件,发射和接收超宽带步进频信号,对空间中的目标进行有效探测。

1 步进频雷达工作原理

步进频信号是一组工作频率以固定的频率步进量增加的子脉冲构成的脉冲串,如图 1 所示。令步进频信号子脉冲的脉冲发射时间为 T_p ,脉冲重复周期为 T_r ;步进频信号的起始频率为 f_0 ,子脉冲个数为 N ,频率步进量为 Δf ,则步进频信号表达式为

$$x(t) = Au(t - nT_r) \exp[-j2\pi(f_0 + n\Delta f)t], \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

式(1)中: A 为子脉冲的信号幅度; u 为复包络。

假设探测目标位于均匀无耗介质中,与天线之间的距离为 d ,反射系数为 1,步进频发射信号经过发射天线向外辐射,经过探测目标的反射,被接收天线接收,则回波信号的表达式为

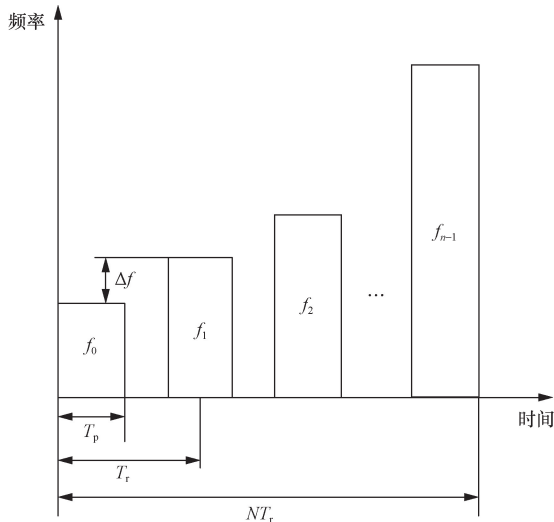


图 1 步进频信号时频关系图

Fig. 1 Time-frequency relationship diagram of stepped-frequency signal

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

式(2)中: τ 为回波信号延迟, $\tau = 2d/c$, c 为光速。

将步进频发射信号作为本振信号与回波信号进行混频、滤波后,得到差拍信号,其表达式为

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

再对式(3)进行逆傅里叶变换和归一化处理,表达式为

$$H_m = \frac{1}{N} \exp(-j2\pi f_0 \tau) \times \exp\left[j\frac{N-1}{2} \frac{2\pi}{N} (1 - N\Delta f \tau)\right] \times \frac{\sin \pi(1 - N\Delta f \tau)}{\sin \frac{\pi}{N}(1 - N\Delta f \tau)} \quad (4)$$

取 H_m 模值为

$$|H_m| = \frac{\sin \pi(1 - N\Delta f \tau)}{N \sin \frac{\pi}{N}(1 - N\Delta f \tau)} \quad (5)$$

脉冲峰值出现在

$$m_k = N\Delta f \tau \pm kN, \quad k \in \mathbf{Z} \quad (6)$$

令 $m_0 = N\Delta f \tau$,则探测目标与天线之间的距离表达式为

$$d = \frac{cm_0}{2N\Delta f}, \frac{c(m_1 \pm N)}{2N\Delta f}, \frac{c(m_2 \pm 2N)}{2N\Delta f}, \dots \quad (7)$$

由此可见,回波信号经过逆傅里叶变换后得到的序列 H_m 的幅度反映了目标物体上强散射中心的雷达散射面积在径向距离轴上的投影分布,即为探测目标的高分辨一维距离像^[3,9],距离分辨率 $\delta_R = c/(2N\Delta f)$ 。

2 步进频信号设计与仿真

2.1 步进频雷达信号参数设计

步进频信号的主要参数有:扫频范围、脉冲发射时间、脉冲重复周期、频率步进量、频率切换时间等,综合雷达的探测要求和选取的硬件参数,设计步进频信号^[10]。

本文中设计的步进频探地雷达收发系统探测要求来自于《面向公路智慧养护的三维探地雷达关键技术研究与示范》项目,雷达的探测要求如表 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}	5 m
距离分辨率 δ_R	0.083 m

根据雷达的最大探测距离 $R_{\max} = (T_r c)/2$, 计算步进频信号的脉冲重复周期 T_r , 即

$$T_r \geq 33.3 \text{ ns} \tag{8}$$

根据雷达的距离分辨率 $\delta_R = \frac{c}{2N\Delta f} = \frac{c}{2B}$, 计算步进频信号的等效带宽 B , 即

$$B = 1.8 \text{ GHz} \tag{9}$$

根据步进频信号相邻两个脉冲的相位差 $\Delta\varphi = 2\pi\Delta f \frac{2R}{c}$, 计算步进频信号的频率步进量 Δf , 在 $\Delta\varphi < 2\pi$ 的前提下, 才不会造成相位模糊, 即

$$\Delta f < 30 \text{ MHz} \tag{10}$$

根据脉冲发射时间计算步进频信号的脉冲发射时间 T_p , 即

$$T_p \leq 1/\Delta f \tag{11}$$

根据步进频信号的等效带宽 B 和频率步进量 Δf 的关系 $B = N\Delta f$, 计算步进频信号的脉冲个数 N , 即

$$N = B/\Delta f \tag{12}$$

结合雷达的探测要求, 兼顾雷达的距离分辨率和对于浅层地表的穿透能力, 最终确定步进频信号的参数如表 2 所示。

表 2 步进频信号参数

Table 2 Stepped-frequency signal parameters

步进频信号参数	数值
扫频范围/MHz	200 ~ 2 000 MHz
初始频率 f_0 /MHz	200 MHz
等效带宽 B /GHz	1.8 GHz
频率步进量 Δf /MHz	2 MHz
脉冲发射时间 T_p / μ s	0.5 μ s
脉冲重复周期 T_r / μ s	6.24 μ s
子脉冲个数 N	901
扫频时间 NT_p /ms	5.62 ms

2.2 步进频信号仿真

根据表 2 中的参数仿真步进频信号, 仿真结果如图 2 和图 3 所示, 分别是步进频信号 200 ~ 2 000 MHz 频段的时域、频域仿真图。图 2 中由于频点数太多, 仿真结果不直观, 故截取前十个频点的时域仿真结果如图 4 所示, 可以看到每个频点的发射时间非常短, 在时域上是脉冲体制信号; 如图 3 所示为步进频信号合成后的带宽, 为 1.8 GHz。如图 5 所示为步进频信号前十个频点的放大图, 可以看出, 步进频信号的每个子脉冲的瞬时带宽是非常窄的, 所以对步进频回波信号的处理也是典型的窄带处理, 步进频体制的信号降低了对雷达的发射机、接收机的硬件要求。

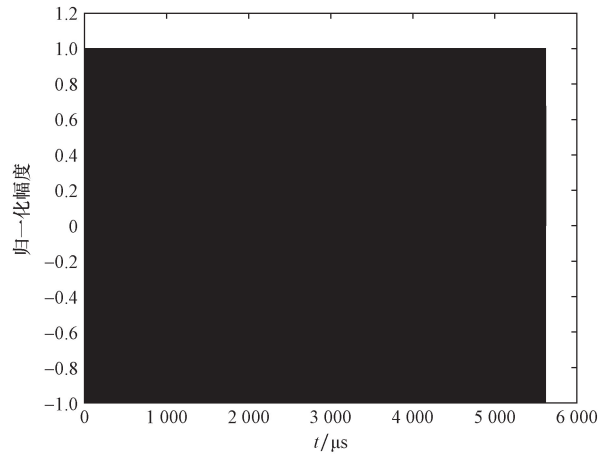


图 2 步进频信号时域波形仿真(200 ~ 2 000 MHz)

Fig. 2 Time domain wave simulation of stepped-frequency signal(200 ~ 2 000 MHz)

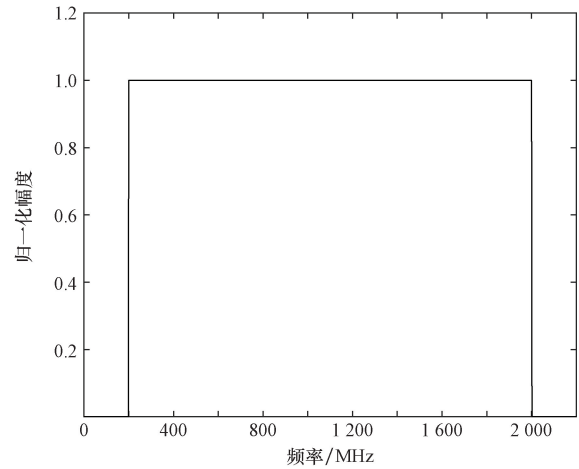


图 3 步进频信号频域仿真(200 ~ 2 000 MHz)

Fig. 3 Frequency domain simulation of stepped-frequency signal(200 ~ 2 000 MHz)

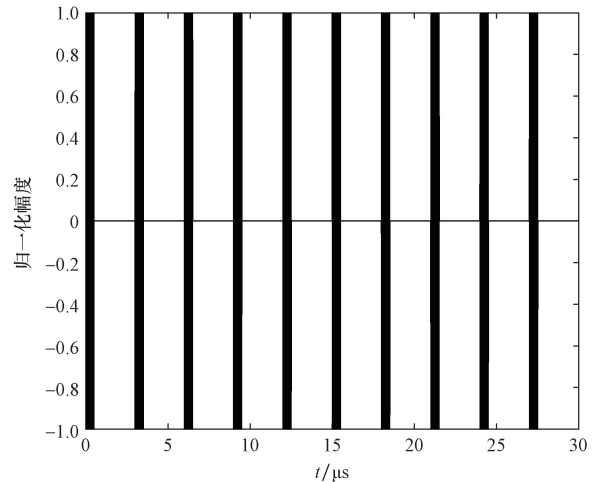


图 4 步进频信号时域波形仿真(200 ~ 218 MHz)

Fig. 4 Time domain wave simulation of stepped-frequency signal(200 ~ 218 MHz)

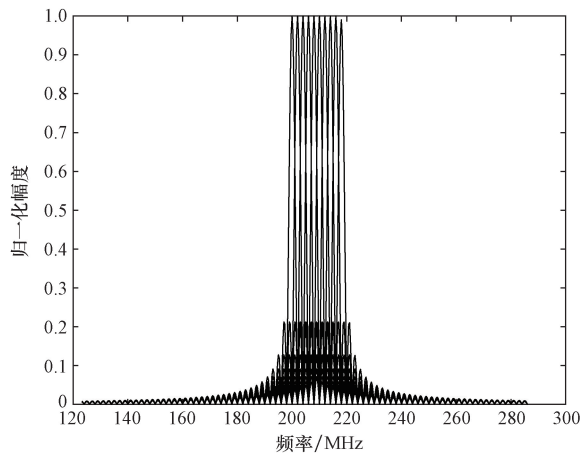


图5 步进频信号频域仿真(200 ~ 218 MHz)

Fig. 5 Frequency domain simulation of step frequency signals(200 ~ 218 MHz)

3 步进频雷达硬件构架

雷达主控部分基于 FPGA 平台实现^[11],使用 Xilinx 公司的 ZC706 板卡,该板卡采用了 Xilinx 的 Zynq-7000 系列芯片,集成了 FPGA 和 ARM Cortex-A9 处理器,支持硬件加速和协同处理;ZC706 还具有丰富的外设和接口,包括第三代双倍速率同步动态随机存储器(double-data-rate 3 synchronous dynamic RAM, DDR3 SDRAM)、FPGA 夹层接口(FPGA mezzanine card, FMC),供给用户存储程序或数据、扩展功能等。

射频模块使用国产射频板卡 CX8242,该芯片是一款集成了 14 bit、12 Gsps DAC 和 14 bit、3 Gsps ADC 的双通道、宽带射频直收发器芯片,支持 10 MHz ~ 6 GHz 射频信号的直接采样和输出;发射通道的输出功率和接收通道的信号能量均可调节;支持快速跳频;集成 JESD 204B 接口,单条链路数据传输速率最高可达 25 Gsps^[12-13]。使用 CX8242 用作

步进频雷达信号的收发,可以满足步进频发射信号不同频点之间的快速切换以及雷达回波数据的实时传输,提高了雷达系统的用户集成度,降低了雷达整机功耗^[14]。

通过 FMC 接口连接 ZC706 与 CX8242,组成步进频雷达硬件。步进频雷达收发系统结构如图 6 所示。系统的工作流程如下:系统上电后,由雷达收发时序控制模块对射频模块初始化单元、基带信号产生单元、跳频控制单元、雷达成像单元进行控制,以保证步进频收发信号的相参^[15]。

雷达收发时序控制单元首先控制其他单元进行复位操作^[16],复位完成后,射频模块初始化单元通过串行外设接口(serial peripheral interface, SPI)对射频芯片的寄存器进行读写操作,产生数字/模拟转换器(digital to analog converter, DAC)、模拟/数字转换器(analog to digital converter, ADC)采样时钟、配置抽值滤波/差值滤波器的参数、产生同步脉冲等;随后基带信号产生单元基于 FPGA 平台产生脉冲基带信号;跳频控制单元通过 SPI 接口对射频芯片发射通道的数控振荡器(numerically controlled oscillator, NCO)NCO0、接收通道的 NCO1 写入频率控制字,具体操作为:在 0 时刻写入步进频信号第一个子脉冲的频率控制字,在此后的脉冲发射间隔写入下一个频点的频率控制字,直至一轮扫频结束后,继续写入步进频信号第一个子脉冲的频率控制字,周而复始;雷达成像单元对射频板卡传输过来的回波数据进行成像处理,再送到计算机进行显示^[17]。

如图 7 所示,是步进频信号产生过程,首先,基带信号产生单元产生发射时间 $T_p = 0.5 \mu\text{s}$,重复周期 $T_r = 6.24 \mu\text{s}$ 的脉冲信号作为基带信号;射频模块发射通道的 NCO0 在同步脉冲上升沿到来时更新,并于基带信号进行混频、滤波后,产生步进频发射信号。

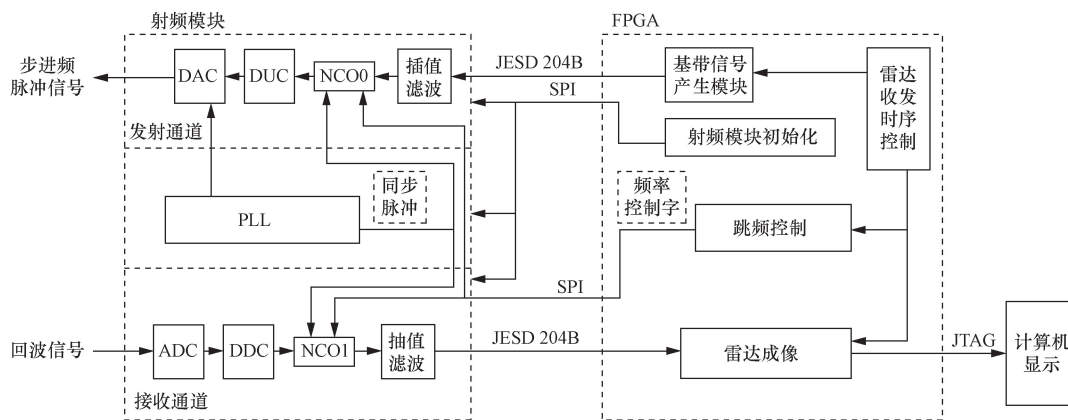


图6 步进频雷达收发系统结构

Fig. 6 Structure of stepped-frequency radar transceiver system

本系统中步进频信号的收发相参通过跳频控制模块实现^[18],基带信号通过 JESD 204B 接口传输到射频芯片的发射通道,在同步脉冲上升沿到来时,发射通道、接收通道的 NCO 同时更新,NCO0 更新的信号作为载波信号与基带信号进行上变频操作后经过天线向外辐射;NCO1 更新的信号作为相参本振,与接收到的回波信号进行下变频操作,再通过 JESD 204B 接口传输到成像模块^[19-20],进行脉冲压缩和快速傅里叶逆变换(inverse fast Fourier transform,IFFT)处理,从而得到探测目标的高分辨一维距离像^[21]。

如图 8 所示为步进频雷达收发系统对于回波信号的处理流程。

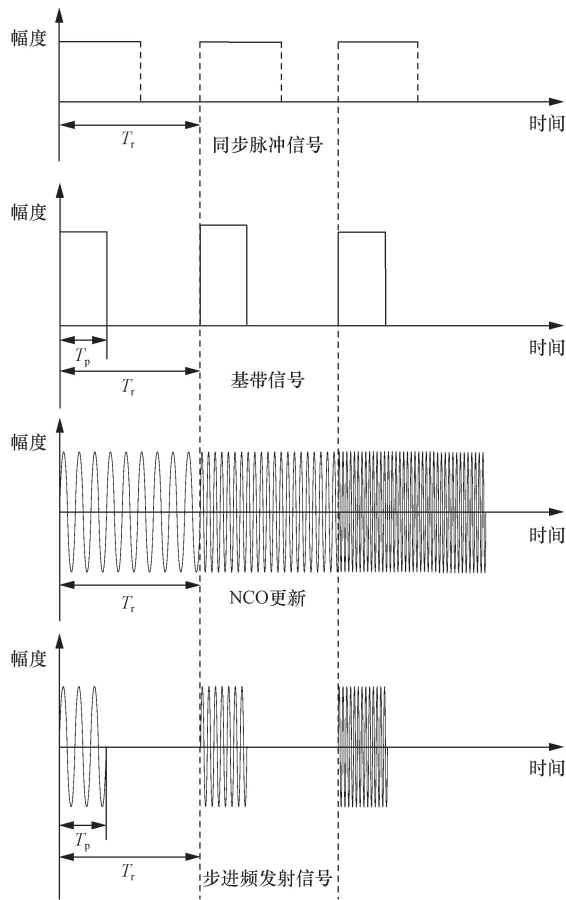


图 7 步进频信号产生过程

Fig. 7 Generation process of stepped-frequency signal

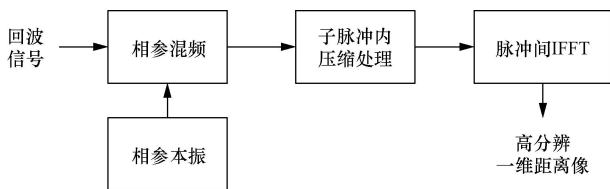


图 8 步进频雷达回波信号处理流程

Fig. 8 The processing flow of stepped-frequency radar echo signal

4 实测结果与分析

4.1 步进频发射信号实测

基于 ZC706 和 CX8242 实现步进频雷达信号的收发,硬件组成如图 9 所示,其中①为 ZC706 硬件电路板、②为 CX8242 射频电路板、③为电磁屏蔽箱。将 ZC706 和 CX8242 之间通过 FMC 接口连接,整体放入屏蔽箱中^[11],屏蔽硬件电路带来的干扰,减少实验误差。屏蔽箱中设有电源接口、USB 转接口和 SMA 转接口,可以外接电源为雷达系统供电、完成计算机和雷达系统之间的数据传输、引出雷达收发信号的接口,连接测量设备和天线。

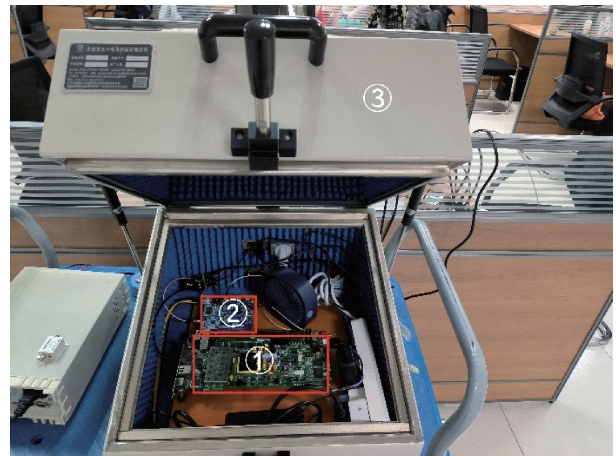


图 9 步进频雷达硬件

Fig. 9 Stepped-frequency radar hardware

在接通电源后,关闭屏蔽箱,通过 SMA 连接线将步进频雷达发射信号分别接入示波器和频谱仪,运行步进频雷达系统,得到如图 10 ~ 图 12 所示的实测图。如图 10、图 11 所示为示波器显示界面,移动示波器的两个光标 a、b,示波器右上角即出现 a、b 处的时间信息及差值 Δ , Δ 即为光标 a、b 之间的时间间隔,以此来测量发射信号的脉冲发射时间、脉冲重复周期。如图 10 所示,光标 a、b 分别处于同一个子脉冲的发射起始处、发射结束处, $\Delta = 500 \text{ ns}$, 为脉冲发射时间,;如图 11 所示,光标 a、b 分别处于相邻子脉冲的发射起始处, $\Delta = 6.240 \mu\text{s}$, 为脉冲重复周期。

如图 12 所示为频谱仪显示界面,选择频谱仪的光标 Marker1、Marker2,移动 Marker1 至频谱图的起始频率、移动 Marker2 至频谱图的终止频率,Marker1、Marker2 处的频率值在图 12 下半部分的表格中显示,分别为 200 MHz、2 GHz,两个数据之差即为发射信号带宽为 1.8 GHz。

根据图 10 ~ 图 12 的测试结果得到结论:以 ZC706 和 CX8242 作为雷达硬件平台发射的步进频

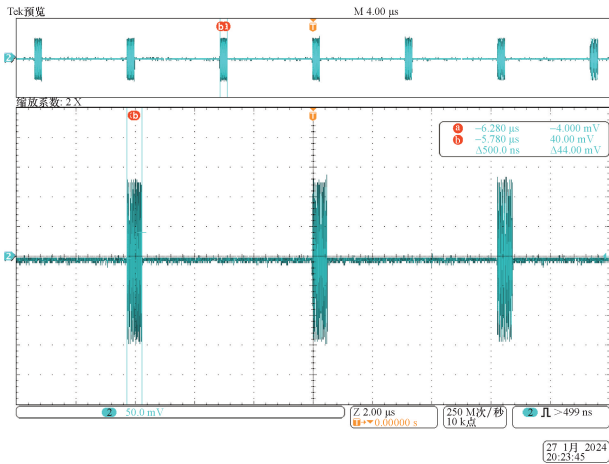


图 10 步进频发射信号脉冲发射时间实测
Fig. 10 Measurement of pulse emission time for stepped-frequency transmission signals

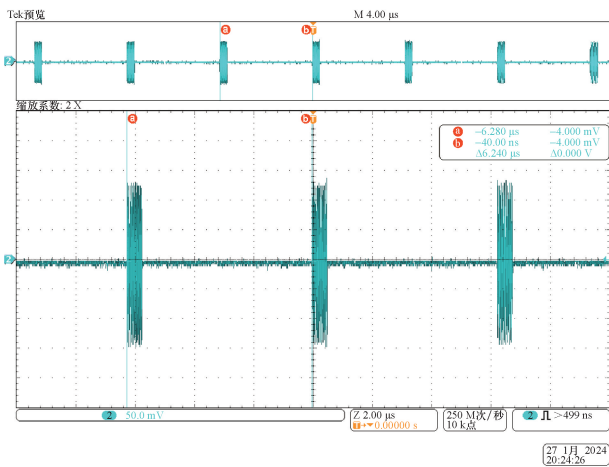


图 11 步进频发射信号脉冲重复周期实测
Fig. 11 Measurement of pulse repetition period of stepped-frequency transmission signal

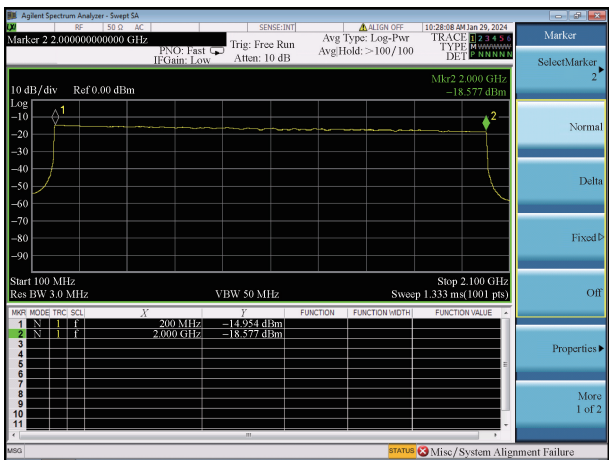


图 12 步进频发射信号频谱图实测
Fig. 12 Measurement of frequency spectrum of stepped-frequency transmission signal

信号,其脉冲发射时间、脉冲重复周期、初始频率、终止频率、完成一轮扫频的等效带宽都符合表 2 中列出的步进频信号参数。

4.2 步进频雷达测距验证

使用 SMA 连接线将射频板卡的发射端和接收端接入 200 ~ 2 000 MHz 频段的的天线上,在空旷地和微波暗室对处于不同距离的目标物进行实测,验证雷达的测距能力。图 13 为微波暗室的实测环境,将天线架在屏蔽箱和锡箔纸板中间,运行雷达系统,将锡箔纸板分别放置在距离天线 0.5、1、1.5 m 处的位置进行多次测量,并保存回波数据,再转移到空旷地进行实测。

雷达回波信号经过校准及去耦合波后^[22],得到的目标物一维距离像如图 14、图 15 所示。如图 14 所示,在空旷地对距离天线 0.5、1、1.5 m 处锡箔纸板的探测结果分别为 0.670 9、1.165、1.661 m;如图 15 所示,在微波暗室的探测结果分别为 0.671 8、1.152、1.661 m。从这两个一维距离像可以看到,此

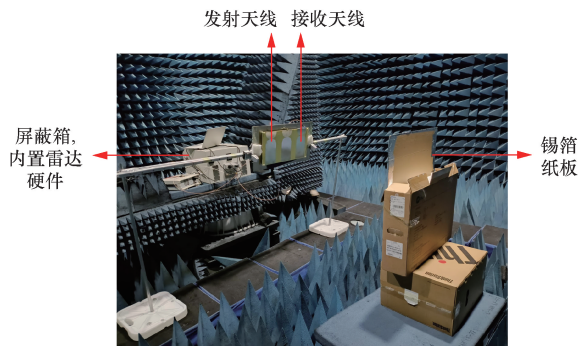


图 13 在微波暗室对锡箔纸板的实测环境
Fig. 13 Measurement environment of tinfoil paperboard in microwave darkroom

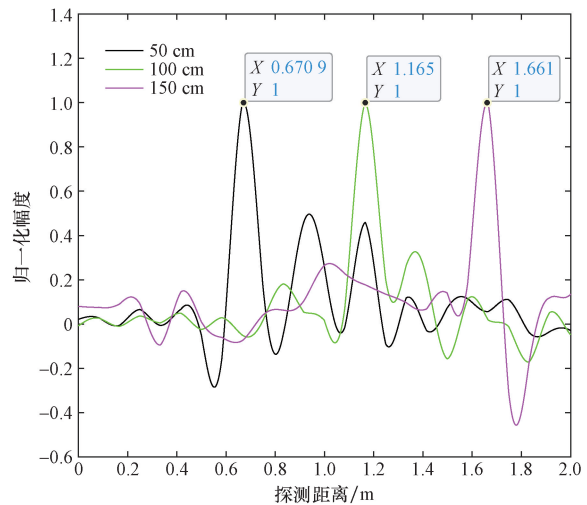


图 14 在空旷地对锡箔纸板进行一维测距实验
Fig. 14 One-dimensional ranging experiments on tinfoil panels in open space

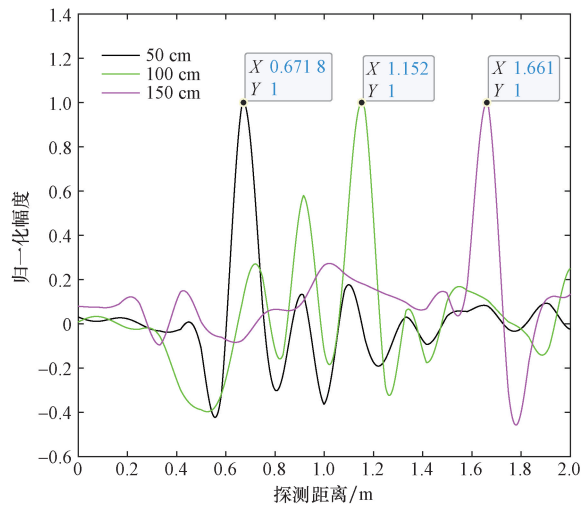


图 15 在微波暗室对锡箔纸板进行一维测距实验

Fig. 15 One-dimensional ranging experiments on tinfoil panels in a microwave darkroom

系统对目标物的探测存在 0.15 ~ 0.17 m 左右的误差,误差成因可能为:①未消除干净的环境噪声;②对锡箔纸板和天线之间距离的测量误差;③锡箔纸板的面积较大,雷达信号的反射点不唯一等。

5 结论

利用步进频信号大时宽带宽积的特点,在降低了对雷达硬件要求的条件下,选用射频直采芯片和 FPGA 平台作为雷达硬件,整个系统的可编程性强、灵活性高,可以通过编程更改步进频信号参数。基于射频直采技术对高频电磁波信号进行收发,信号处理过程快,系统集成度高且功耗小。测试结果表明本文设计的步进频雷达收发系统对目标有一定的识别能力,但是由于一些外部原因,仍然存在误差。

参 考 文 献

- [1] 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. Calibration study of frequency stepping ground-penetrating radar[J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(11): 34-38.
- [2] 王玮. 毫米波步进频雷达一维成像及目标检测算法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2009.
Wang Wei. Research on one-dimensional imaging and target detection algorithm of millimetre wave stepper frequency radar [D]. Changsha: National University of Defence Technology, 2009.
- [3] 孙鹏,余建宇,郝万兵. 步进频雷达的目标回波建模方法与仿真[J]. 火控雷达技术, 2022, 51(1): 45-49, 64.
Sun Peng, Yu Jianyu, Hao Wanbing. Target echo modelling method and simulation of stepper frequency radar[J]. Fire Control Radar Technology, 2022, 51(1): 45-49, 64.
- [4] 高卓妍,贾岩,刘淑一,等. SFCW 干涉雷达用于高铁车桥耦合振动监测的实验研究[J]. 中国测试, 2023, 49(3): 135-141.
Gao Zhuoyan, Jia Yan, Liu Shuyi, et al. Experimental study of SFCW interferometric radar for coupled vibration monitoring of high-speed railway axles[J]. China Test, 2023, 49(3): 135-141.
- [5] 黄建,裴乃昌,王志辉,等. 0.33 THz 雷达三维近场成像系统设计及成像试验[J]. 电讯技术, 2019, 59(6): 621-626.
Huang Jian, Pei Naichang, Wang Zhihui, et al. Design of 0.33 THz radar 3D near-field imaging system and imaging test[J]. Telecommunications Technology, 2019, 59(6): 621-626.
- [6] 刘晓飞,张群英,叶盛波,等. 超宽带频率步进雷达收发系统设计[J]. 电子测量技术, 2018, 41(15): 138-144.
Liu Xiaofei, Zhang Qunying, Ye Shengbo, et al. Design of ultra-wideband frequency stepping radar transceiver system [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(15): 138-144.
- [7] 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 VHF frequency stepping frequency ground-penetrating radar transceiver circuit [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [8] 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 realisation of low-frequency ultra-wideband stepping frequency transceiver system [J]. Modern Radar, 2014, 36(5): 82-87.
- [9] 范国浩. 基于FPGA的雷达回波采集存储系统设计[D]. 太原:中北大学, 2017.
Fan Guohao. Design of radar echo acquisition and storage system based on FPGA [D]. Taiyuan: North Central University, 2017.
- [10] 刘帅,赵文生,高思伟. 超宽带探地雷达煤层厚度探测试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 207-212.
Liu Shuai, Zhao Wensheng, Gao Siwei. Experimental study on coal seam thickness detection by ultra-wideband ground-penetrating radar[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 207-212.
- [11] 崔翔. 探地雷达硬件系统的优化设计[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
Cui Xiang. Optimisation design of ground-penetrating radar hardware system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.
- [12] 徐潇迪,郭轩,周磊,等. 基于JESD204B的多通道数据同步传输设计与验证[J]. 固体电子学研究进展, 2021, 41(4): 304-308.
Xu Xiaodi, Guo Xuan, Zhou Lei, et al. Design and verification of multi-channel data synchronous transmission based on JESD204B [J]. Research and Progress in Solid State Electronics, 2021, 41(4): 304-308.
- [13] Escabal I B, Raffian E, Hora J A. Development of framer/del framer for 5Gbps JESD204B soft IP[J]. International Journal of Engineering & Technology, 2018, 7: 21-26.
- [14] 和爽,王红亮. 基于JESD204B的射频信号高速采集系统设计[J]. 电子器件, 2020, 43(1): 124-127.
He Shuang, Wang Hongliang. Design of a high-speed acquisition system for RF signals based on JESD204B [J]. Electronic Devices, 2020, 43(1): 124-127.
- [15] 熊淳,张荣福. 基于FPGA的雷达信号采集系统设计[J]. 光

- 学仪器, 2021, 43(4): 78-85.
- Xiong Chun, Zhang Rongfu. Design of FPGA-based radar signal acquisition system [J]. Optical Instruments, 2021, 43(4): 78-85.
- [16] 李邦. 基于FPGA的雷达定时控制和预处理模块设计[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- Li Bang. Design of FPGA-based radar timing control and preprocessing module [D]. Xi'an: Xi'an Electronic Science and Technology University, 2018.
- [17] 冯温雅, 刘贤麟, 王成浩, 等. 一种多通道探地雷达数据实时融合方法[J]. 现代雷达, 2017, 39(2): 66-68, 86.
- Feng Wenya, Liu Xianlin, Wang Chenghao, et al. A real-time fusion method for multi-channel ground-penetrating radar data [J]. Modern Radar, 2017, 39(2): 66-68, 86.
- [18] 尹小芳. 基于JESD204B的高速跳频实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- Yin Xiaofang. High-speed frequency hopping implementation based on JESD204B [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2020.
- [19] Li J, Yue S, Chen M, et al. Single event effect characterization of high speed serial JESD204B data receiver [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1345(2): 022016.
- [20] Han X, Yang B, Wang X, et al. A test system design for JESD204B transmitter controller chip [C] // Advances in Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery: Proceedings of the ICNC-FSKD. Berlin: Springer, 2022: 1045-1054.
- [21] 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.
- [22] 吴学礼, 王壮壮, 习炳权, 等. 基于小波自适应阈值方法的探地雷达去噪 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23(11): 4686-4692.
- Wu Xueli, Wang Zhuangzhuang, Xi Bingquan, et al. Ground-penetrating radar denoising based on wavelet adaptive thresholding method [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(11): 4686-4692.