

# 基于FPGA的LFM雷达系统的多目标检测实现

刘洪帅, 刘影, 张美娜, 杜军\*

哈尔滨师范大学计算机科学与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2023年12月15日; 录用日期: 2024年1月11日; 发布日期: 2024年1月22日

## 摘要

通过硬件设计和信号处理算法的有效结合, 利用FPGA实现频域上的脉冲压缩, 根据实际需求设计雷达参数, 实现对多目标的检测。与传统的电路作比较, FPGA在信号处理和复杂算法加速等方面的优势, 在高速的同时也解决了灵活性不足的问题。对线性调频信号以及脉冲压缩基本原理的研究, 通过使用MATLAB产生回波信号, 将其传输到设计好的FPGA电路中, 最后将处理后的数据传回MATLAB画出距离-速度二维图, 与仿真结果进行对比。实验结果验证了FPGA实现的频域匹配滤波能够拥有较好的测距和测速能力, 硬件加速在提高雷达系统性能方面有出色的性能和广泛的应用前景。

## 关键词

FPGA, LFM信号, MATLAB, 脉冲压缩, 多目标检测

# Implementation of Multi-Target Detection of LFM Radar System Based on FPGA

Hongshuai Liu, Ying Liu, Meina Zhang, Jun Du\*

School of Computer Science and Information Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Dec. 15<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jan. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2024

## Abstract

By effectively combining hardware design and signal processing algorithms, utilizing FPGA to achieve pulse compression in the frequency domain, designing radar parameters according to actual needs, and achieving detection of multiple targets. Compared with traditional circuits, FPGA has advantages in signal processing and complex algorithm acceleration, solving the problem of insufficient flexibility while maintaining high speed. Research on the basic principles of linear fre-

\*通讯作者。

quency modulation signals and pulse compression, using MATLAB to generate echo signals, transmitting them to the designed FPGA circuit, and finally sending the processed data back to MATLAB to draw a distance velocity two-dimensional graph for comparison with simulation results. The experimental results have verified that the frequency domain matched filtering implemented by FPGA can have good ranging and speed measurement capabilities, and hardware acceleration has excellent performance and broad application prospects in improving radar system performance.

## Keywords

FPGA, LFM Signal, MATLAB, Pulse Compression, Multi Target Detection

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着现代战场环境的日益多变，需要对雷达性能提出更高的要求。雷达系统不仅要求具有高效的目标探测和抗干扰能力，还需要提高信号的处理和计算速度，以应对快速变化的战术需求。同时，实现方式的灵活性和简易性也至关重要，这些要求共同推动着作战雷达技术的创新与进步，以确保其在现代军事行动中发挥更为关键的作用[1] [2]。

传统的单片机或 DSP 芯片来实现数据的采集和处理灵活性较低且成本较高容易受到干扰。线性调频 (LFM) [3] [4] [5] [6] [7] 脉冲压缩雷达通常需要对回波信号进行匹配滤波，以完成脉冲压缩并获取距离和速度等信息。匹配滤波处理一般分为两种方法，一种是时域上的卷积法，另一种是频域上的 FFT 法[8]。已知的 FPGA 实现脉冲压缩的方式都是在时域上实现的，时域法虽然电路结构简单，但是无法提供足够的频率分辨率，无法有效的区分目标。

对于宽带信号、多目标检测和高分辨率雷达，频域匹配滤波的信噪比损失会很小，因此在测距、测速以及多目标测量当中具有较大的优势。FPGA (Field Programmable Gate Array) 具备高度可编程性和并行处理的能力[8] [9]，既可以提高硬件系统的灵活性，也可以更高速地进行处理和计算信号数据，提高了雷达系统数据处理的能力，广泛应用于数字信号处理领域。利用 FPGA 实现频域上的脉冲压缩可以更有效地针对宽带信号进行处理，也更能满足高分辨率、多目标检测的场景需求[10]。

## 2. 基本原理

### 2.1. LFM 波形

脉冲压缩是指发射宽码脉冲并对回波进行处理获得窄脉冲的技术[11] [12] [13]。LFM 信号的复数形式表达式为：

$$s(t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c t + \frac{K}{2}t^2\right)\right] \quad \#(1)$$

式中： $T$  为时宽； $f_c$  为载波频率； $K$  是调频斜率， $K = B/T$ ， $B$  为带宽； $\text{rect}(\cdot)$  为矩形函数，满足  $\text{rect}(t/T) = 1, |t/T| \leq 1$ 。信号的瞬时频率为  $f_c + Kt$ ，由此可见，LFM (Linear Frequency Modulated) 波形的形状是一种频率随时间线性变化的连续波信号[14]，且变化速率是恒定的。

经过目标反射回来的线性调频信号的回波信号复数表达式可以表示为：

$$r(t) = \text{rect}\left(\frac{t-t_d}{\tau}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c(t-t_d) + \frac{K}{2}(t-t_d)^2\right)\right] \quad \#(2)$$

## 2.2. 匹配滤波

脉冲压缩在本质上都是采用的匹配滤波器，其主要是对发射脉冲进行编码，同时让接收到的脉冲通过一个时频特性与该编码反褶共轭的滤波器。匹配滤波器的工作原理是将接收到的信号与一个已知的模板信号进行卷积运算，以提高目标信号与噪声之间的信噪比。如果接收到的信号与模板信号完全匹配，卷积结果将产生最大的输出，使滤波器输出信噪比 SNR (Signal to Noise Ratio) 在某一特定时刻达到最大[15]。不论是在时域上还是频域上实现匹配滤波器，两种方式在原理是相同的。通过傅里叶变换的卷积定理可以知道，信号在时域上进行卷积就等价于在频域上进行乘积运算，但相比于时域上的匹配滤波方法，频域乘积的方法运算量要远远小于时域卷积。

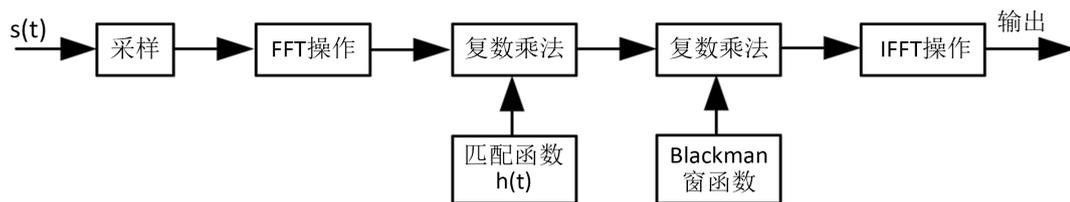


Figure 1. Structure diagram of frequency domain compression method

图 1. 频域压缩法结构图

由图 1 结构图可知，先将采样的回波信号通过傅里叶变换从时域转换到频域，再利用匹配函数与获得的频域序列进行复数乘法运算，然后进行窗函数加权，最后利用逆傅里叶变换将加权后的序列从频域变回时域，获得脉冲压缩后的数字波形。

其中，线性调频信号  $s(t)$  通过傅里叶变换并利用驻点相位原理(POSP)可以获得其频谱表达式为：

$$S(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}\left(\frac{t}{T}\right) \exp(j\pi Kt^2) \cdot \exp(-j2\pi ft) = \text{rect}\left(\frac{f}{KT}\right) \exp\left(-j\pi \frac{f^2}{K}\right) \quad \#(3)$$

LFM 脉冲信号经过匹配滤波器后的输出信号可以表示为：

$$s_0(t) = T \frac{\sin \pi K T \left(1 - \frac{|t|}{T}\right)}{\pi K T t} \text{rect}\left(\frac{t}{2T}\right) e^{j2\pi f_c t} \quad \#(4)$$

这是一个包络近似于辛格(Sinc)函数的固定载频为  $f_c$  的信号。

## 2.3. 匹配滤波

在多目标环境下，一些不适合的副瓣可能会掩盖附近较小的主瓣，导致目标的丢失。为了提高识别多目标的能力，需要采用一些旁瓣的抑制技术，通常会在在脉冲压缩后信号的时域上应用适当的窗函数。经过对比，布莱克曼函数(Blackman Window)在主瓣外副瓣衰减会更快，且可以根据不同需要进行调整主瓣宽度。同时，布莱克曼窗函数的的主瓣非常平滑，这有助于减小频域泄漏和时域振铃效应。其函数表达式为：

$$\text{Blackman}(n) = \begin{cases} 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N} - 1\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N} - 1\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad \#(5)$$

其中， $n$  为窗函数的样本序号， $N$  为窗函数的总样本数。

理想的 Sinc 函数在 Blackman 窗加权后, 分辨率展宽 1.85 倍, 峰值旁瓣比约为  $-58.1$  dB, 积分旁瓣比约为  $-57.2$  dB。图 2 所示为经过布莱克曼窗加权后的压缩信号, 蓝色表示未加窗, 红色为加窗后。可以看出, 经过 Blackman 窗函数加权后, LFM 信号的波形宽度被压缩, 压缩后的信号由主瓣和一系列旁瓣组成。将压缩信号在时域放大后发现第一旁瓣要比主瓣低约  $13.4$  dB。虽然压缩导致主瓣幅度比之前有略微降低, 但是却更好地抑制了旁瓣, 同时也拓宽了主瓣。

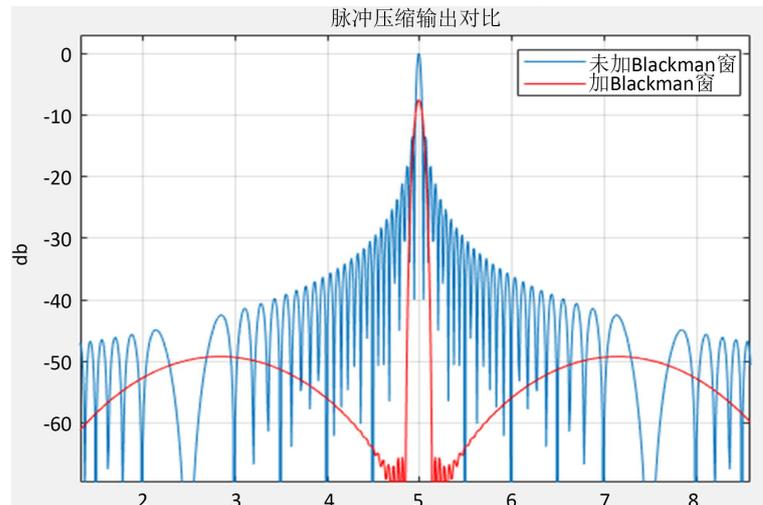


Figure 2. Blackman weighted LFM signal  
图 2. Blackman 加权的 LFM 信号

### 3. 脉冲压缩模拟

对于大时宽的宽带信号, 需要利用采用频域匹配滤波方式。整体的运算流程, 将发射脉冲信号补零后进行快速傅里叶变换(FFT), 获得其频域表示, 随后对频域表示取共轭, 再与原信号补零后 FFT 结果相

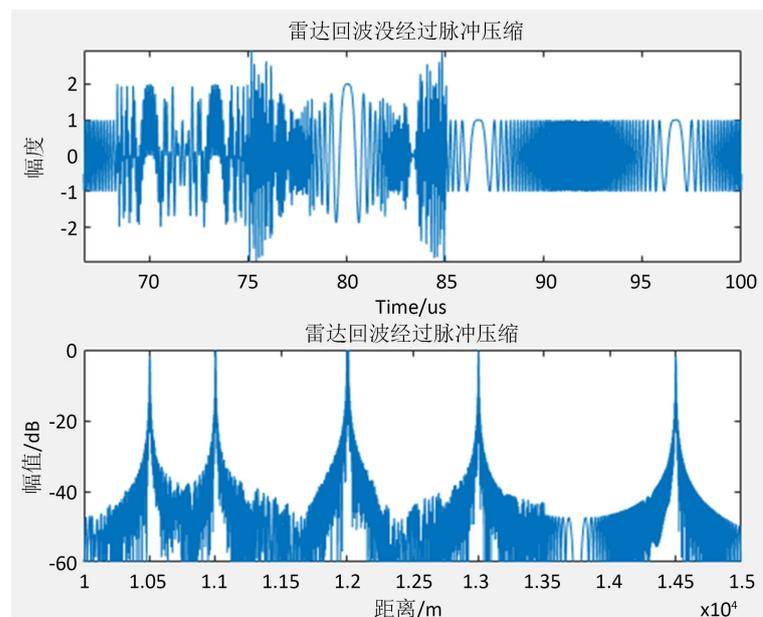


Figure 3. Multi target pulse compression simulation diagram  
图 3. 多目标脉冲压缩模拟图

乘, 最后通过逆傅里叶变换(IFFT)将结果转换回时域。用 MATLAB 作为仿真工具, 编写 MATLAB 程序来模拟脉冲压缩模式。仿真时, 设置信号宽度为  $T = 10 \mu\text{s}$ , 带宽为 30 MHz, 仿真数据采样频率为  $f_s = 60 \text{ MSa/s}$ , 信号幅度为 1。图 3 为回波信号脉冲压缩前后的比较。

雷达回波信号经过脉冲压缩处理, 窄化了主瓣, 提高了距离分辨率, 很好的分辨出五个目标。

## 4. LFM 脉冲压缩硬件实现

### 4.1. 系统硬件平台

本文验证平台采用的是 XILINX 公司以 Artix-7 XC7Z010-1CLG400C 芯片为核心的 FPGA 开发板, 它具有高达 1GB 的 SDRAM 和约 28,000 个的可编辑逻辑单元(PLU)来实现复杂的信号处理算法。同时集成了双核 ARM Cortex-A9 处理器, 这些处理器以及其集成的 DSP 资源和丰富的外部接口可以用于控制和协调信号处理任务。同时它还提供软件支持和可扩展性, 为实时控制和数据处理提供了更多的灵活性。

首先, 利用 MATLAB 生成 LFM 的回波信号, 将回波信号传输给 FPGA, FPGA 利用 FFT IP 核进行 FFT 运算, 将信号从时域转到频域, 将得到的频域信号进行匹配滤波, 将信号函数与匹配函数相乘, 再次通过 FFT IP 核进行 IFFT 运算, 将运算得到的结果传输到 MATLAB 中, 画出二维图像, 流程图如图 4 所示。

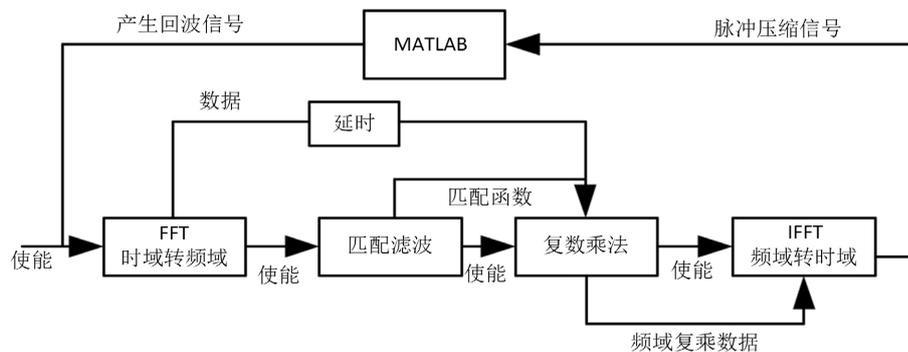


Figure 4. Flow chart  
图 4. 流程图

下面介绍各 IP 核计算模块的配置方法以及数字脉冲压缩的实现结果。

### 4.2. FFT 运算

设计中使用的 FFT IP 核为 Fast Fourier Transform (FFT)的 9.1 版 IP 核, 如图 5 所示, 该 IP 核在 DSP

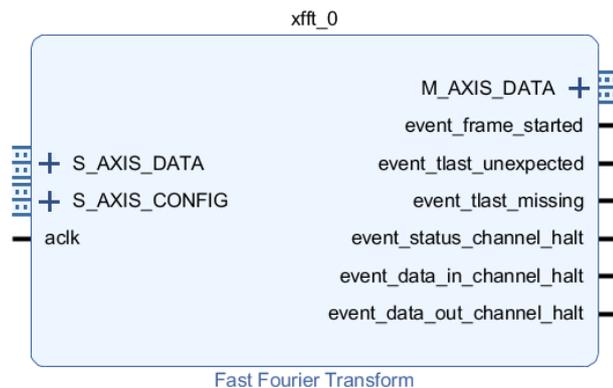


Figure 5. FFT IP diagram  
图 5. FFTIP 图

系统里作为核心组件，主要用于 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 的数字调制解调器。

FFT IP 核提供了四种不同的架构，支持高达 34 位的相位因子宽度，允许数据的灵活增加，并同时支持 IEEE 单精度浮点数据类型。其中，4 种架构的选择可以在内核大小和转换时间之间平衡。这四种 FFT 结构的资源消耗和吞吐量成正比，资源消耗越大的时候吞吐量越高，其中，最高的是 Streaming I/O 模式，其次是 Radix-4, Burst I/O 模式，最低的是 Radix-2 Lite, Burst I/O。在实际设计中，FPGA 需要在短时间内对大量的数据进行 FFT 计算，所以本此时节需要连续加载数据的能力，故选择“Pipelined, Streaming I/O”架构进行相关的 FFT 计算。

### 4.3. 乘法运算

在 FFT 运算完成后，LFM 信号需要与匹配滤波函数相乘，以实现匹配滤波器的处理。XILINX 提供了乘法 IP 核，可用于执行 2 通道数据的乘法操作，支持最大 64 位的输入数据宽度，并兼容 2 的补码运算。将乘法 IP 核与 FFT 运算 IP 核所结合使用极大地降低了设计的复杂度。

### 4.4. IFFT 运算

再经过频域匹配滤波器处理后，LFM 信号需要变换为输出信号，就需要利用 IFFT 预算将信号从频域转换到时域上来，FFT 和 IFFT 在 FPGA 上通常通过相同的 FFT IP 核模块来实现。这是因为 FFT 和 IFFT 是数学上互逆的操作，它们使用相同的算法和计算内核，只是在参数配置上存在差异，所以在这里就不多做赘述。

## 5. 硬件实现结果分析

### 5.1. 参数设计

理论上最大探测距离  $R_{\max} = cT_p/2$ ，取决于脉冲重复周期  $T_p$ ，其中  $c$  为光速，但是由于采样时间的限制，计算得最大探测距离为 11,250 m。距离分辨率取决于带宽， $\Delta r = c/2B$ ，速度分辨率  $\Delta V = c/2f_0MT_p$ 。根据表 1 的指标以及硬件要求，雷达的载波频率设置为 3 GHz，线性调频信号的带宽  $B$  为 30 MHz。脉冲重复周期为 5 us，脉冲的重复率为 2000。

Table 1. Radar design indicators

表 1. 雷达设计指标

符号	名称	设计指标
$R_{\max}$	最大探测距离	11,250 m
$V_{\max}$	最大探测速度	100 m/s
$\Delta R$	距离分辨率	5 m
$\Delta V$	速度分辨率	2 m/s

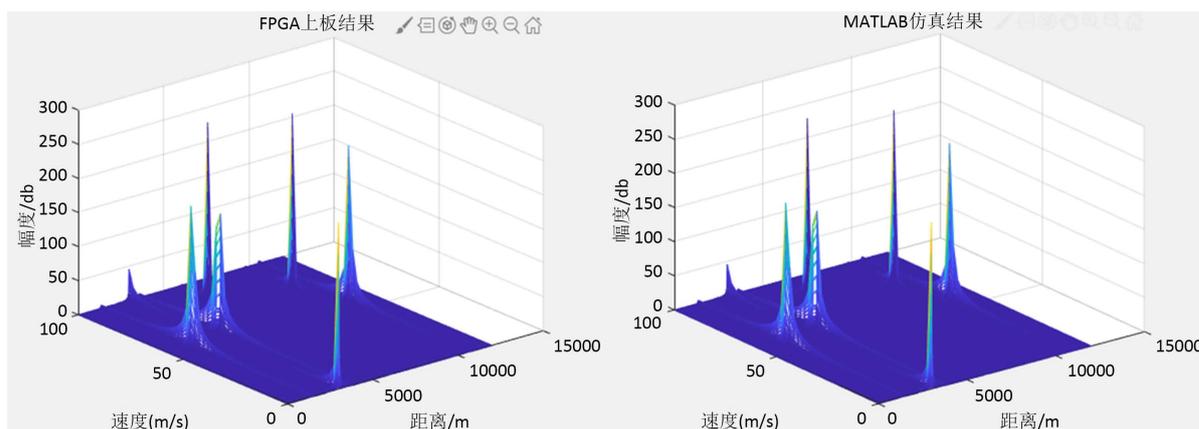
### 5.2. 实验及结果分析

利用 MATLAB 随机生成回波信号，通过回波信号参数计算出目标的距离和速度，表 2 给出了 6 个目标的具体参数。

将 MATLAB 产生的回波信号传输给 FPGA，经过 FGPA 进行脉冲压缩后将数据传回，将传回的数据导入 MATLAB 进行仿真画出二维图像，同时利用 MATLAB 进行对比实验，设置相同的参数。结果如图 6 所示，左图为上板实验结果图，右图为 MATLAB 仿真图。

**Table 2.** Target parameters  
**表 2.** 目标参数

符号	距离	速度
目标 1	1341.3 m	57.6 m/s
目标 2	2978.9 m	1 m/s
目标 3	3600 m	61.3 m/s
目标 4	6081.2 m	87.5 m/s
目标 5	9786 m	77.5 m/s
目标 6	10574.6 m	57.14 m/s



**Figure 6.** Comparison chart of experimental results  
**图 6.** 实验结果对比图

如图 6 所示，可以清楚的显示有 6 个峰值，并且可以看到具体的距离 - 速度值，同时，通过与仿真结果的对比显示，得到的结果显示距离误差和速度误差都在可接受范围之内，六个目标都可以被准确识别，说明该结构能够满足之前的设计需求。

## 6. 总结

首先介绍了 LFM 脉冲压缩雷达的原理，利用 FPGA 实现了频域匹配滤波的方式，利用 MATLAB 和 FPGA 实现了线性调频的脉冲雷达对多目标距离和速度的检测。证明了利用 FPGA 实现频域的匹配滤波是可行，并且利用该结构能够具备多目标的探测能力，并且简易了开发难度，对未来的作战雷达有一定的积极作用。

## 参考文献

- [1] 何明. 现代雷达信号处理技术的发展趋势[J]. 电子世界, 2021(15): 17-18. <https://doi.org/10.19353/j.cnki.dzsj.2021.15.007>
- [2] 张雅萌. 现代雷达信号处理及发展趋势研究[J]. 科技风, 2019(36): 66. <https://doi.org/10.19392/j.cnki.1671-7341.201936057>
- [3] 吴嘉伟, 刘爱兵, 姜淑杨, 缪明榕, 鲍磊磊. LFM 脉压技术在天气雷达信号处理中的运用体现[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(1): 85-89. <https://doi.org/10.19695/j.cnki.cn12-1369.2023.01.27>
- [4] 马博. 脉冲噪声背景下线性调频信号测距方法研究[D]. [硕士学位论文]. 西安: 西安工业大学, 2023. <https://doi.org/10.27391/d.cnki.gxagu.2023.000897>.

- 
- [5] Wu, F., Han, Z., He, Q., Wang, Z. and Han, N. (2010) Simulation Testing of LFM Compression Performances Based on Identification. 2010 *International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application*, Changsha, China, 13-14 October 2010, 383-386. <https://doi.org/10.1109/ISDEA.2010.193>
- [6] Samy, T.M., Abdel-Latif, M.S., Elgamel, S.A. and Ahmed, F.M. (2017) FPGA Implementation of Pulsed Noise Interference against LFM Radar. 2017 *12th International Conference on Computer Engineering and Systems (ICCES)*, Cairo, Egypt, 19-20 December 2017, 695-700. <https://doi.org/10.1109/ICCES.2017.8275395>
- [7] 杨会军, 程啟华, 蒋妹. 线性调频脉冲压缩雷达干扰调制技术研究[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(12): 35-38+47.
- [8] 张唯, 杨维明, 沈怡彦等. 基于 FPGA 的 LFM 信号匹配滤波的时域实现[J]. 电子器件, 2017, 40(1): 66-70.
- [9] 杨敏. 基于 FPGA 的运动补偿实现方法[J]. 舰船电子对抗, 2023, 46(4): 76-79. <https://doi.org/10.16426/j.cnki.jcdzdk.2023.04.017>
- [10] 宋俊辰, 李跃华, 张宗毅. 基于 LFM 的雷达多目标检测研究[J]. 微波学报, 2021, 37(S1): 130-133.
- [11] 杨雪, 朱楠. 基于脉冲压缩的远距离目标探测技术研究[J]. 通信与信息技术, 2022(6): 52-57.
- [12] 王冬华, 孙雪涛. 一种基于 FPGA 的基-8 并行脉压实现方法[J]. 火控雷达技术, 2021, 50(2): 62-67. <https://doi.org/10.19472/j.cnki.1008-8652.2021.02.013>
- [13] 段维俊. 基于 FPGA 的双通道数字脉冲压缩系统实现[J]. 中国战略新兴产业, 2018(24): 198-199. <https://doi.org/10.19474/j.cnki.10-1156/f.005133>
- [14] 刘利民, 李豪欣, 李琦等. 基于分数阶傅里叶变换的低信噪比线性调频信号参数快速估计算法[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(10): 2798-2804.
- [15] 付苗苗, 刘娜. 激光雷达信号检测系统的最佳匹配滤波方法[J]. 激光杂志, 2023, 44(10): 194-199. <https://doi.org/10.14016/j.cnki.jgzz.2023.10.194>