

基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中的应用研究

林健, 闫晓兵, 孙大伟
泰山科技学院, 山东 泰安 271000

摘要： 随着雷达技术的不断进步, 对数字信号处理的要求也越来越高。研究基于 FPGA 的数字信号处理技术, 不仅能够推动雷达系统的发展, 还能为未来更先进的雷达技术打下坚实的基础。针对与本文首先分析了基于 FPGA 的数字信号处理技术原理, 阐述了数字信号处理在雷达系统中应用的意义, 并针对该技术在雷达系统实际应用中存在的问题, 提出了相对应的优化策略, 通过统一接口协议与降低能耗等策略的实施, 期望能为雷达系统的进一步优化提供帮助。

关键词： FPGA; 数字信号处理; 雷达系统

Research on the Application of Digital Signal Processing Based on FPGA in Radar System

Lin Jian, Yan Xiaobing, Sun Dawei
Taishan University of Science and Technology, Tai'an, Shandong 271000

Abstract： With the continuous progress of radar technology, the requirement of digital signal processing is getting higher and higher. The research of digital signal processing technology based on FPGA can not only promote the development of radar system, but also lay a solid foundation for more advanced radar technology in the future. In view of this, this paper first analyzes the principle of digital signal processing technology based on FPGA, expounds the significance of the application of digital signal processing in radar system, and proposes corresponding optimization strategies in view of the problems existing in the practical application of this technology in radar system. It is expected to help the further optimization of the radar system.

Keywords： FPGA; digital signal processing; radar system

引言

在现代雷达系统中, 数字信号处理技术的应用已经成为提升系统性能的关键因素。随着电子技术的飞速发展 FPGA 因其在并行处理、实时性和灵活性方面的优势, 成为实现复杂 DSP 算法的理想平台。FPGA 不仅能够提供高速的数据处理能力, 还能够根据实际需求进行现场编程和优化, 这对于雷达系统中不断变化的信号处理需求来说至关重要。雷达系统在军事、民用航空、气象监测等多个领域发挥着重要作用, 但当前传统的模拟信号处理方法已经难以满足现代雷达系统对速度、精度和灵活性的需求。因此基于 FPGA 的数字信号处理技术成为了研究的热点。通过将 FPGA 应用于雷达信号的采集、处理和分析, 可以实现更高效的信号处理流程, 提高雷达系统的分辨率和抗干扰能力, 同时降低系统的功耗和成本。

一、基于 FPGA 的数字信号处理技术概述

(一) FPGA 技术在数字信号处理中的优势

FPGA 技术在数字信号处理中的优势主要体现在其高度的可编程性、并行处理能力和实时性能上。首先 FPGA 是一种可以通过硬件描述语言进行编程的集成电路, 它允许设计者根据需要定制硬件逻辑功能。这种可编程性使得 FPGA 能够灵活适应不同的数字信号处理算法和应用需求, 从而在产品开发周期中节省时间和成本。其次 FPGA 内部的逻辑单元可以并行工作, 这为实现复杂的数字信号处理算法提供了强大的计算能力^[1]。

(二) FPGA 的基本原理与结构

与传统的 ASIC 相比, FPGA 提供了更高的灵活性和更快的开发周期。FPGA 的基本原理是基于查找表和可编程互连的结构, 这些查找表可以实现任意的逻辑功能, 而可编程互连则允许用户定义不同逻辑块之间的连接关系。FPGA 的结构通常包括可编程逻辑块、可编程互连资源、输入输出模块 (I/O 模块) 和嵌入式存储器或处理器等。逻辑块是 FPGA 的基本单元, 通常包含多个可编程逻辑单元, 它们可以被配置为实现各种组合逻辑和时序逻辑功能。可编程互连资源则负责逻辑块之间的信号传递, 通过编程可以形成复杂的逻辑网络^[2]。

作者简介: 林健 (1989.08-), 男, 汉族, 山东省泰安市泰山区人, 硕士研究生, 研究方向: 电子信息工程。

（三）数字信号处理在雷达系统中的作用

在雷达系统的应用中，数字信号处理技术发挥着至关重要的作用。数字信号处理技术在雷达系统中的应用主要体现在信号的采集、滤波、变换、检测、估计和识别等方面。据特容易数字信号处理技术在雷达系统中用于提高信号的信噪比。在信号检测方面，还能够执行各种检测算法，如恒虚警率检测，以区分目标信号和背景噪声。

二、基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的意义

（一）提升雷达系统的实时处理能力

随着现代战争与国防环境的日益复杂化，使得国家对雷达系统的性能要求越来越高。基于 FPGA 的数字信号处理技术在雷达系统中的应用，为提升其实时处理能力提供了重要支持。FPGA 具有极高的灵活性和并行处理能力，能够实现复杂的数字信号处理算法，从而大幅提高雷达系统的数据处理速度和精度。具体而言 FPGA 能够实现高速数据采集和处理。在雷达系统中信号的采集速度直接影响到系统的反应速度和目标检测能力。利用 FPGA 的并行处理特性，可以同时处理多个数据通道，显著缩短信号处理时间，从而提升雷达系统的实时性^[3]。

（二）增强信号处理的灵活性和可重构性

FPGA 技术的由来可以追溯到 20 世纪 80 年代中期，当时为了应对日益增长的电子系统复杂性和缩短产品上市时间的需求，Xilinx 公司推出了世界上第一款现场可编程门阵列（FPGA）。FPGA 是一种可以通过编程来配置的集成电路，它允许用户在不更换硬件的情况下，重新配置其逻辑功能。这种灵活性使得 FPGA 在数字信号处理、通信系统、航空航天和军事应用等领域迅速获得了广泛应用。而在当前基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的意义重大。在雷达系统中信号处理算法可能会根据不同的应用场景和目标特性进行调整。FPGA 允许设计者在硬件层面上快速修改和优化算法，而无需更换物理硬件。这种可重构性使得雷达系统能够适应多变的战场环境和任务需求，提高系统的适应性和生存能力^[4]。

（三）降低雷达系统的功耗和成本

基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的意义不仅体现在提高性能和灵活性上，在降低雷达系统的功耗和成本层面，基于 FPGA 的数字信号处理技术的应用同样可以实现。例如 FPGA 可以通过其并行处理能力同时执行多个任务，从而减少对多个专用处理器的需求。这种集成度的提高意味着雷达系统可以使用更少的硬件组件，进而降低整体功耗和制造成本。以一款现代的空中交通控制雷达系统为例，传统设计可能需要多个数字信号处理器芯片来处理不同通道的信号。每个数字信号处理器芯片都需要独立的电源和散热系统，这不仅增加了系统的复杂性，还提高了能耗。而采用 FPGA 后可以将多个数字信号处理器芯片的功能集成到一个芯片上，通过编程实现多通道信号处理。这样不仅减少了硬件数量，还降低了对散热和电源管理的要求，从而大

幅降低功耗。

（四）提高雷达系统的抗干扰能力和检测精度

在现代战争和民用领域中，使得雷达系统在实际应用中往往面临着日益复杂的电磁环境，各种有意或无意的干扰源对雷达的正常工作构成了严重威胁。基于 FPGA 的数字信号处理技术能够有效提高雷达系统的抗干扰能力。通过实施先进的信号处理算法，如自适应滤波、波束形成和频谱分析等，FPGA 可以准确地识别和抑制干扰信号，确保雷达能够准确地检测和跟踪目标。

三、基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用时的难点

（一）高速数据处理与传输的挑战

在当前的雷达系统运行中，应用 FPGA 用于数字信号处理时高速数据处理与传输是一个主要的难点。由于雷达系统通常需要实时处理大量的数据，而这些数据来自于雷达的发射和接收模块，它们需要被迅速地采集、处理和分析。FPGA 虽然在并行处理方面具有优势，但随着数据速率的提高，对 FPGA 内部逻辑和外部接口的带宽要求也随之增加。例如现代雷达系统可能需要处理高达数 Gbps 的数据流^[5]。

（二）实时信号处理算法的资源消耗问题

随着雷达技术的快速发展，对实时信号处理的要求越来越高。在是在当前基于 FPGA 的数字信号处理中由于 FPGA 的资源是有限的，这就要求工作人员在设计实时信号处理算法时，必须在性能和资源消耗之间找到一个平衡点。但是在当前的应用中这一平衡的难以把控，使得基于 FPGA 的数字信号处理在雷达监测中的应用效果受到限制。

（三）系统集成与兼容性难题

而在系统集成与兼容性层面，基于 FPGA 的数字信号处理单元的应用往往需要与多种硬件和软件组件协同工作，这带来了新的难题。例如 FPGA 需要与模拟到数字转换器、数字到模拟转换器与存储器以及其他专用集成电路等组件进行无缝连接。这些组件可能来自不同的制造商，具有不同的接口标准和电气特性，这就要求 FPGA 设计必须能够适应这些差异，实现高效的数据交换。

（四）热管理与功耗控制的复杂性

雷达系统应用的重要性在于其在军事、民用和科研领域的广泛应用，如空中交通管制、气象监测、航天探测等领域在雷达系统的应用之下能够提供目标的距离与角度等信息，对于保障飞行安全、灾害预警和科学研究具有不可替代的作用。随着技术的发展，基于 FPGA 的数字信号处理技术在雷达系统中的应用越来越广泛，因其灵活性高等优点，成为现代雷达系统设计的关键技术之一。然而在基于 FPGA 的数字信号处理应用于雷达系统时，热管理和功耗控制的复杂性尤为突出。由于 FPGA 在执行复杂算法时会产生大量热量，若不加以有效管理，将导致设备温度过高，影响其性能甚至损坏硬件^[6]。

四、基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中应用的优化策略

（一）使用高速接口标准

研究人员为了优化高速数据处理与传输的挑战，可以在优化策略中使用高速接口的标准。高速接口标准如 PCI Express (PCIe) 和 Serial ATA (SATA) 提供了比传统并行接口更高的数据传输速率和更低的延迟。通过将高速接口集成到 FPGA 设计中，研究人员能够实现数据的快速读写，从而显著提高了雷达系统的数据处理能力。为了进一步优化性能，研究人员还采用了数据压缩技术。通过在 FPGA 内部实现高效的压缩算法，可以减少需要通过高速接口传输的数据量，从而降低对带宽的需求并减少处理时间^[7]。

（二）加强对信号处理算法的优化

在当前的多个领域雷达系统应用中，其中信号处理算法的效率高低往往直接影响到整个系统的性能。因此加强对信号处理算法的优化是提高基于 FPGA 的数字信号处理能力的关键。在具体的优化中研究人员可以采用快速傅里叶变换算法，来显著提高信号处理速度。在实际应用中雷达系统可以通过优化 FFT 算法的实现来减少计算资源的消耗，提高数据处理的吞吐量。以某型号的空交通管制雷达系统为例，该系统采用了 FPGA 来实现高速的信号处理。在该系统中为了提高雷达信号的处理速度和精度，工程师们对 FFT 算法进行了优化。他们首先对算法进行了并行化处理，将原本顺序执行的 FFT 运算分解为多个子任务，这些子任务可以同时并在 FPGA 的不同处理单元上执行。通过这种方式大大缩短了 FFT 的处理时间^[8]。

（三）使用标准化的接口和协议

21 世纪初，在数字信号处理技术的快速发展背景下，使得在雷达系统中 FPGA 因其出色的并行处理能力和可重配置性得到了广泛应用。雷达系统作为现代军事和民用领域的重要组成部分，其性能的优劣直接关系到目标检测、跟踪和识别的准确性。而为

了提高雷达系统的互操作性和可维护性，采用标准化的接口和协议是至关重要的。标准化的接口可以确保不同模块之间的高效通信，同时降低系统集成的复杂度。例如采用 PCI Express 接口可以实现高速数据传输，满足雷达系统对数据吞吐量的要求。此外利用以太网接口可以实现远程监控和控制，提高系统的灵活性和可扩展性^[9]。

（四）使用低功耗设计技术

对于现代化的雷达系而言，随着对实时处理能力要求的不断提高，以及对便携式和移动式雷达设备的需求增加，低功耗设计技术变得尤为重要。所以研究人员为了实现基于 FPGA 的数字信号处理在雷达系统中的低功耗优化，首先可以采用动态电源管理技术。动态电源管理允许 FPGA 在不同的工作负载下动态调整其电源电压和频率，从而在保证性能的前提下最小化功耗。其次可以利用 FPGA 的模块化设计特性，通过部分重配置技术实现功耗优化。在雷达系统中，某些功能模块可能不需要持续运行，或者在特定时间段内可以暂停工作。通过动态地重配置这些模块，可以在不需要时将其关闭或降低其功耗，从而节省能源^[10]。

五、结语

综上所述，基于 FPGA 的数字信号处理技术在雷达系统中的应用虽然面临诸多挑战，但通过采用高速接口标准、优化信号处理算法、使用标准化的接口和协议以及低功耗设计技术等策略，可以显著提升系统的性能和效率。这些优化措施不仅能够应对资源限制和系统集成的难题，还能有效管理热和功耗问题，确保雷达系统在各种应用场合下的稳定运行和长期可靠性。随着技术的不断进步，未来基于 FPGA 的数字信号处理技术有望在雷达系统中实现更高的数据处理速度、更低的延迟和更优的能效比。这将为雷达技术的发展开辟新的道路，使其在军事防御、民用监测和科学研究等领域发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1] 左磊, 贾豫东. 基于 FPGA 的测风激光雷达功率谱估计系统设计 [J]. 电子制作, 2023, 31(03): 49-51. DOI: 10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2023.03.026.
- [2] 邓翔. 敏捷型电离层高频雷达信号处理若干关键技术研究 [D]. 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2020. DOI: 10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000063.
- [3] 夏扬. 多功能两维周界雷达信号处理系统设计与实现 [D]. 南京理工大学, 2021. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.002438.
- [4] 陈泽宗, 周章凯, 赵晨. 基于分裂基 FFT 的 S 波段雷达信号处理单元设计与实现 [J/OL]. 电子测量技术, 1-10 [2024-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2175.TN.20240929.1316.041.html>.
- [5] 卿国能, 朱正元, 朱康奇, 等. 面向高速多目标测距测速的微波光子雷达系统及算法研究 [J/OL]. 光通信技术, 1-11 [2024-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1160.TN.20240523.1534.002.html>.
- [6] 利才锟, 晋良念, 蒙淑娇. 改进的八波束比幅测向系统校正方法及 FPGA 实现 [J/OL]. 现代防御技术, 1-8 [2024-11-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3019.TJ.20240418.1437.018.html>.
- [7] 周皓秋, 冯珏, 陈洁, 等. 用于黄土地结构与物性探测的无人机载探地雷达 [C] // 中国地球物理学会. 2023 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题十七 电磁地球物理学研究应用及其新进展、专题十八 探地雷达新进展. 吉林大学地球探测科学与技术学院; 大连中睿科技发展有限公司; , 2023: 1. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.115378.
- [8] 周皓秋, 冯珏, 陈洁, 等. 用于黄土地结构与物性探测的地面多极化探地雷达 [C] // 中国地球物理学会. 2023 年中国地球科学联合学术年会论文集——专题十七 电磁地球物理学研究应用及其新进展、专题十八 探地雷达新进展. 吉林大学地球探测科学与技术学院; 大连中睿科技发展有限公司; , 2023: 1. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.115377.
- [9] 周莎莎, 吴侃, 曹先益, 等. 基于 LABS 技术和 FPGA 的固态激光雷达测距系统 [J]. 光通信技术, 2023, 47(05): 71-77. DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2023.05.015.
- [10] 祝判骏, 贾小波, 覃觅觅, 等. 基于扩频方法的谐波雷达目标检测研究 [J]. 火控雷达技术, 2023, 52(03): 10-15. DOI: 10.19472/j.cnki.1008-8652.2023.03.002.