

数 - 模转换器中量化误差校正的高精度设计与实现

High-precision Design and Implementation of Quantization Error Correction in Number-mode Converter

高啊莎

Asha Gao

国营长虹机械厂 中国·广西 桂林 541002

State-owned Changhong Machinery Factory, Guilin, Guangxi, 541002, China

摘要: 论文以“数-模转换器中量化误差校正的高精度设计与实现”为主题, 针对数-模转换器中存在的量化误差问题, 提出了一种高精度的设计与实现方案。通过深入分析量化误差的来源和影响因素, 本研究采用先进的校正算法, 精准修正量化误差, 有效提升了转换器的精度和性能。在设计阶段, 采用了先进的硬件架构和优化算法, 使得校正过程能够在高效且实时的条件下完成。实验结果表明, 所提方案在各种工作负载下均取得了显著的性能提升, 为数-模转换器的高精度应用提供了可行的解决方案。

Abstract: With the theme of “high-precision design and implementation of quantitative error correction in number-mode converter”, this paper puts forward a high-precision design and implementation scheme for the problem of quantitative error in number-mode converter. Through the in-depth analysis of the source and influencing factors of the quantification error, this study adopts the advanced correction algorithm to accurately correct the quantification error, which effectively improves the accuracy and performance of the converter. In the design stage, the advanced hardware architecture and optimization algorithm are adopted to enable the correction process to be completed under efficient and real-time conditions. The experimental results show that the proposed scheme has achieved significant performance improvement under various workloads, and provides a feasible solution for the high-precision application of the number-mode converter.

关键词: 数-模转换器; 量化误差校正; 高精度设计; 实现方案; 硬件架构

Keywords: number-mode converter; quantitative error correction; high-precision design; implementation scheme; hardware architecture

DOI: 10.12346/etr.v6i1.8920

1 引言

在当今数字信号处理和通信系统中, 数-模转换器扮演着至关重要的角色, 负责将数字信息转换为模拟信号。然而, 由于硬件资源的有限性以及实际工程中对功耗和面积的严格要求, 数-模转换器通常采用低比特位的量化器。这种低比特位的量化带来了严重的量化误差问题, 限制了转换器的精度和性能。在众多应用场景中, 如通信系统、音频处理和图像传感器等, 对数-模转换器的精度要求越来越高, 因此量化误差的问题亟待解决。过去的研究已经提出了各种量化

误差校正的方法, 然而, 由于量化误差的来源和影响因素的复杂性, 以及对实时性能和硬件资源的挑战, 现有方法在提高数-模转换器精度方面仍存在一定的局限性。

本研究旨在针对数-模转换器中存在的量化误差问题, 提出一种高精度的设计与实现方案, 通过先进的校正算法和优化硬件架构, 精准修正量化误差, 实现数-模转换器的高精度应用。此设计不仅有望在当前数字信号处理系统中提升性能, 还将为未来高精度应用的发展提供有力的技术支持。

【作者简介】高啊莎(1979-), 男, 中国陕西乾县人, 本科, 工程师, 从事制导与控制技术研究。

2 数 - 模转换器概述

2.1 数 - 模转换器的基本原理

数 - 模转换器是一种关键的电子组件，负责将数字信号转换为模拟信号。其基本原理是通过量化器将连续的模拟信号按照一定精度转换为离散的数字信号^[1]。这一过程中，量化误差是不可避免的，由于数字信号的离散性，导致输出信号与原始模拟信号之间存在差异。数 - 模转换器的基本原理涉及采样、量化和编码等环节，其中量化是最为关键的步骤之一。因此，研究和优化量化误差对于提升数 - 模转换器的性能至关重要。

2.2 已有的量化误差校正方法

在过去的研究中，学术界和工业界已经提出了多种量化误差校正方法，以弥补数 - 模转换器中由量化引起的精度损失。一些方法基于统计学原理，如均值修正和方差校正，通过分析量化误差的统计特性来进行校正。这类方法对于某些特定分布情况下的误差修正具有一定效果。一些方法则采用了先进的数学模型，如神经网络和深度学习模型，通过学习和预测量化误差的规律，实现高度精准的校正。这些方法在处理复杂的非线性误差时表现出色。还有一些方法专注于硬件层面的优化，通过改进量化器的结构和增加纠错码等方式来减小误差。这些方法在实际工程中取得了一定的成果，但仍然受到硬件资源和实时性的限制。

3 设计与实现方案

3.1 量化误差来源和影响因素的深入分析

量化误差的来源和影响因素是影响数 - 模转换器性能的核心因素。量化器的非线性特性的零点漂移和增益不一致是主要问题。零点漂移源于电路元件的非理想性，它引起了模拟输入与数字输出之间的静态偏移。增益不一致则涉及电荷注入和工作电流等因素，导致不同输入水平下的放大倍数差异。通过对这些非线性特性的详细分析，能够准确定位量化误差的根本原因。

高频信号受到采样速率和信号响应时间的制约，导致了在高频率下量化误差的显著增加。在此方面，需要详细考察量化器的时域特性和频域特性，以更好地理解模拟在不同频率下量化误差的表现。还要分析了量化器的精度和位宽对误差的影响，以及在硬件资源和性能要求之间进行的权衡。深入分析外部因素如电源噪声和温度变化对量化误差的干扰，使我们对误差的生成机制有了更全面的认识。

3.2 先进的校正算法的选择和原理

为了解决数 - 模转换器中的量化误差问题，我们选用了神经网络和深度学习模型。

深度神经网络 (Deep Neural Network, DNN) 用于进行量化误差的校正。DNN 是一种多层次的神经网络，具有多个隐藏层，可以更好地捕捉非线性的量化误差特征。在训练阶段，能将大量的真实量化误差数据输入网络，通过反向传

播算法调整网络参数，以最小化校正输出与实际值之间的误差。研究精心设计了损失函数，考虑了不同量化条件下的误差权重，以确保网络能够对各种情况进行准确的校正。在应用阶段，DNN 嵌入在数 - 模转换器系统中，实时接收量化误差信号，通过前向传播生成校正值，最终提升数 - 模转换器的输出精度^[2]。

为了应对时序相关性较强的量化误差，引入了长短时记忆网络 (Long Short-Term Memory, LSTM)。LSTM 是一种特殊的循环神经网络 (Recurrent Neural Network, RNN)，专门用于处理时序数据^[3]。在训练过程中，LSTM 网络学习量化误差的时序模式，捕捉不同时间上的误差演变规律。我们调整网络的门控结构，以平衡对短时和长时相关性的建模。在实际应用中，LSTM 网络能够更好地应对量化误差在不同时间尺度上的变化，进一步提高数 - 模转换器的校正效果。

这两种算法的选择基于它们在处理非线性、时序相关性等方面的卓越表现。在实际应用中，充分利用深度学习框架 (如 TensorFlow 或 PyTorch) 进行模型的训练和部署。为了获得高质量的训练数据，采用真实量化误差数据集，包括各种输入信号和不同量化条件下的误差情况。在训练过程中，仔细选择学习率、正则化参数等超参数，以平衡模型的学习能力和泛化能力。

在数 - 模转换器中的具体应用过程中，这两种算法能够实时接收量化误差信号，进行复杂的数学计算，最终生成校正值。这些校正值被直接应用于数 - 模转换器的输出，从而降低量化误差对系统性能的影响。

3.3 高精度设计的硬件架构选择和优化算法的应用

在硬件架构设计方面，选择了流水线架构，这是一种将整个数 - 模转换过程划分为多个阶段并行运行的设计。每个阶段专注于特定的任务，从而提高整体转换速度。同时，我们采用了 Sigma-Delta 调制器作为核心的量化器。Sigma-Delta 调制器通过多级集成反馈回路，能够高效地抑制量化误差，从而显著提升数 - 模转换器的精度。该设计选择的硬件架构不仅能够处理复杂的信号，还能有效减小量化误差的影响，为系统提供更为可靠的性能。

在量化器的设计中，引入了误差传播抑制技术。采用汉明码等纠错码和差分技术，我们为系统添加了冗余信息，实现了对误差的实时检测和修复。这种技术的运用有效地提高了系统的稳定性和鲁棒性。误差传播抑制技术的实施充分考虑了量化误差的传播机制，从而在设计层面上最小化了误差的影响。

4 实验与结果分析

4.1 实验设置和数据收集

为了验证所提出的高精度数 - 模转换器设计的性能，进行了一系列系统性实验。首先，搭建了基于新硬件架构的数 -

模转换器实验平台, 确保其能够准确反映实际应用场景。在实验中, 选用了多种真实信号作为输入源, 涵盖了不同频率、振幅和波形的情况, 以全面测试数-模转换器的性能。同时, 引入了不同的工作负载, 模拟实际使用环境下的各种条件。

为了获取准确的性能数据, 设计了精密的数据采集方案。采用高精度示波器和信号分析仪, 对数-模转换器的输出信号进行实时监测和记录。通过精心选择采样点和采样频率, 确保了对量化误差的细致观察。在实验中, 还引入了多组对照实验, 比较了采用高精度设计和传统设计的数-模转换器在不同场景下的性能表现。这样的对比分析有助于准确评估提出设计的优越性和实用性。

4.2 校正方案在不同工作负载下的性能表现

通过实验得到表 1 实验结果。

表 1 实验数据表格

工作负载	量化器输出误差 (未校正)	量化器输出误差 (校正前)	量化器输出误差 (校正后—神经网络)	量化器输出误差 (校正后—深度学习模型)
负载 100mA	0.005	0.003	0.001	0.0005
负载 200mA	0.008	0.005	0.002	0.001
负载 300mA	0.012	0.008	0.004	0.002
负载 400mA	0.015	0.01	0.005	0.0025

从表 1 中可以明显观察到, 在不同工作负载下, 采用不同校正方案的数-模转换器输出误差的变化。首先, 在未进行任何校正时, 量化器的输出误差相对较高。随后, 经过常规校正处理后, 输出误差有所减小。然而, 采用神经网络和深度学习模型的高级校正方案后, 输出误差得到了更为显著的改善。

在负载 100mA 至负载 400mA 的不同工作负载下, 校正前后的输出误差明显减小。尤其是在采用深度学习模型进行校正的情况下, 输出误差的降低更为明显。这表明所提出的深度学习模型在不同工作负载条件下具有更强大的校正能力, 能够更有效地提高数-模转换器的输出精度。

4.3 与现有方法的比较分析

通过实验数据表格, 对提出的校正方法与传统方法以及优化方法在具体负载条件下的性能进行了比较分析。具体结果如表 2 所示。

表 2 对比实验数据表格

方法	负载 100mA	负载 200mA	负载 300mA	负载 400mA
校正前输出误差	0.002	0.004	0.006	0.008
校正后—提出方法	0.001	0.002	0.003	0.004
校正后—传统方法	0.001	0.003	0.005	0.007
校正后—优化方法	0.001	0.002	0.004	0.006

校正前输出误差: 在校正前, 不同负载条件下的输出误差分别为 0.002、0.004、0.006、0.008。这反映了在不同负载下, 数-模转换器的初始性能。

校正后输出误差: 在提出的方法下, 校正后输出误差在不同负载下分别为 0.001、0.002、0.003、0.004。相比之下, 传统方法和优化方法的输出误差略高, 分别为 0.001、0.003、0.005、0.007 和 0.001、0.002、0.004、0.006。这突显了提出方法在各个工作负载下均能够更有效地降低输出误差。

对比不同负载下的校正效果: 在提出的方法下, 不同负载下的校正效果相对一致, 都表现为显著的输出误差降低。这说明提出的深度学习模型对于不同工作负载具有良好的适应性, 能够在各种负载条件下保持高精度性能。

5 结语

通过对数-模转换器中量化误差校正的高精度设计与实现的研究, 本研究提出的校正方法在各个负载条件下均显著优于传统方法和优化方法。校正前后的输出误差明显降低, 尤其在提出的方法下, 输出误差相对较低。实验结果验证了所提出深度学习模型在实际应用中的卓越性能, 不仅在初始状态下表现出较好的性能, 而且在不同负载条件下都能有效校正量化误差, 提高数-模转换器的输出精度。这一研究为未来高精度数-模转换器的设计与应用奠定了坚实的基础。该工作强调了深度学习在校正领域的潜力, 并为进一步优化和拓展数-模转换器的性能提供了有益的启示。

参考文献

- [1] 孔瀛,王宗民,许军.一种16位高速数模转换器(DAC)的设计与实现[J].电子产品世界,2014(1):71-74.
- [2] 刘湘君,唐升,刘玉洁,等.高精度模数转换器通道之间的时间误差校准算法研究[J].重庆科技学院学报:自然科学版,2023,25(1):99-104.
- [3] 陆鹏,王晶,臧越.多模数转换器并行接口的FPGA设计与实现[J].电子设计工程,2021,29(15):5.