用于数模转换器实验的灵活的实验室设置

Alfredo P´erez Vega-Leal, Manuel G. Satu´e

2026年2月3日

arXiv:2602.02312v1 [eess.SP] 2 Feb 2026

摘要

对于现代发射机而言，模拟多路复用似乎是一种很有前景的解决方案，因为速度是其主要限制因素。本文旨在开发一种低成本方案，用于比较不同的数模转换器（DAC）方案。具体而言，本文研究了模拟多路复用技术、高速单数模转换器、Σ-Δ调制和动态元件匹配。本文回顾了这些技术，并展示了一种基于商用现场可编程门阵列系统的时间交织Σ-Δ调制数模转换器原型。

1 引言

数模转换是将数字信号转换为相应模拟信号的过程。在此过程中，具有离散幅度且仅在离散时刻存在的数字信号，会在幅度和时间上都转换为连续信号。

数模转换器目前广泛应用于无数领域。几乎所有电子设备都配备了数模转换器。由于数模转换器在几乎所有应用中都得到广泛使用，人们开展了大量研究，以优化适用于不同应用的数模转换器架构 [1]。

Σ-Δ调制器（SDM）因能够将模拟或多位数字输入信号编码为二电平或多电平信号，同时保持较高的信噪比（SNR） [2]而广为人知。使用二电平量化器虽然能提高数模转换器的线性度，但也会显著增加量化噪声。过采样率（OSR）在限制信噪比方面发挥着重要作用 [3, 4, 5]。

文献中已有许多方案，用于应对影响基于SDM的数模转换器的各种因素。本文预印本综述了其中一些因素，为开发一套成本低廉、可用于实验的完整基于SDM的数模转换器提供背景依据。

2 数模转换器的基础与局限

目前，数模转换器是应用极其广泛的常见组件，几乎所有现代电子设备都包含数模转换器。鉴于其广泛应用，研究人员已开展大量研究，以针对特定运行要求优化数模转换器架构 [6]。

数模转换器的精度从根本上受输出电流或电压电平中的静态误差限制，这种现象称为元件失配。在高精度应用中，这些误差会形成可实现精度和分辨率的上限，并表现为谐波失真、增益误差和失调误差[7]。

为消除这些非理想因素，人们采用了各种线性化方法。这些技术可概括为物理层校准、动态元件匹配（动态元件匹配）、结合数字校准的噪声整形，以及应用大幅度周期性高频抖动或大幅度随机高通噪声抖动。

数模转换器中的噪声和失真源于多个因素：重复频谱、量化、元件失配、热噪声和半导体噪声。具体而言，元件失配会使数模转换器的输出电平偏离理想值，从而产生一种称为积分非线性（INL）的静态误差，它是谐波失真和互调失真的主要来源之一 [8]。

在电力电子领域，不连续同步脉宽调制策略被广泛用于确保电压源逆变器中的相电压持续同步，这是电力驱动高效运行的关键要求 [9, 10]。

此外，脉宽调制是将模拟信号编码为二进制流的一项基本技术。尽管传统实现往往存在谐波失真 [11], ，但先进的三电平脉宽调制方案已被证明能够显著减轻这些失真伪影。这一改进提高了信号保真度，

从而使该架构适用于广泛的信号处理应用。

3 Σ-Δ架构

Σ-Δ调制器（SDM）凭借其固有的线性度和稳健的模拟实现，已成为实现高分辨率数模转换器（DAC）的首选架构 [12]。

通过采用过采样和噪声整形技术，这些转换器能够有效抑制信号带内的量化噪声，因此对于现代通信标准中的发射机和接收机设计都极具吸引力 [13, 14]。

这里存在一个基本的权衡：适中的过采样率（OSR）会限制可实现的动态范围 [15, 16], ，而实现高分辨率所需的高过采样率则会显著限制可用的信号带宽 [17, 2, 18]。

为了解决这些带宽限制而不牺牲分辨率，人们开发了多速率和时间交织（TI）架构 [19, 20]。在多速率结构中，前向路径中的传统多位量化器可以由以更高频率运行的单比特量化器替代 [21, 22]。这是通过提高环路末级积分器的过采样率来实现的 [23, 19]。时间交织Σ-Δ调制器的进一步架构改进包括用并行低速单元替代高速积分器 [24]。这种方法不仅简化了设计，还避免了延迟交叉路径带来的复杂问题 [25, 26, 27]。

此外，通过使用以高频时钟驱动的量化器跟踪环路来尽量减少比较器单元的数量，可以降低硬件复杂度 [28, 29, 30]。除了标准的线性转换之外，基于压控振荡器（VCO）的量化器在实现时还会面临一些具体挑战，因为压控振荡器具有非线性的电压-频率特性 [31, 32]。为此，人们提出了线性度增强技术：从压控振荡器输出中粗略估计信号，并将其从输入中减去 [33]。这样可以确保压控振荡器仅处理小信号分量，从而保持线性度 [28, 34, 35]。

最后，在现场可编程门阵列（现场可编程门阵列）和模拟集成电路领域，数据转换器对于连接数字和模拟领域至关重要 [36, 37, 38]。模拟集成电路技术持续提供可靠、灵活的

复杂系统解决方案 [39, 40, 41]。

过采样数模转换器的实现主要依赖于Σ-Δ调制器（SDM） [42]。与奈奎斯特速率架构不同，Σ-Δ调制器具有更高的线性度和分辨率；然而，采用非线性内部量化器使稳定性分析更加复杂 [43]。这与确定稳定输入幅度范围有关。随着调制器阶数增加，该范围通常会缩小，这一限制促使人们为高阶拓扑结构开发了多种稳定化技术。

为突破标准Σ-Δ调制器固有的带宽限制，人们提出了多速率和时间交织（TI）等先进架构[44, 45]。多速率策略通过调整末级积分级的过采样率，使多位量化器能够由高速单比特对应器件取代 [46]。

时间交织并行化通过分摊处理负载进一步提升了吞吐量 [47]。该领域值得关注的实现方式包括：采用并行低速率积分器来减轻交叉路径延迟，以及通过快速跟踪量化环路减少比较器数量，从而优化硬件资源 [48, 49]。近期的创新还引入了模拟域复用，以增强对路径失配的鲁棒性 [50]。

Σ-Δ调制原理的通用性已超越传统数模转换，在专门的模拟处理任务中获得了关键应用。例如，在锁相环设计中，噪声整形技术已被成功改造，用于实现频率数字转换 [51]。通过在反馈之前对压控振荡器的输出进行采样，采样误差可经由三阶传递函数进行整形，这类似于Σ-Δ调制器中的量化误差整形 [52]。

4 动态元件匹配

尽管过采样具有诸多优势，多位Σ-Δ数据转换器仍因静态元件失配而面临显著的性能限制。为解决这一问题，动态元件匹配已成为一种标准解决方案。

基于动态元件匹配的数模转换器已用于过采样Δ-Σ数据转换器、流水线模数转换器和高分辨率奈奎斯特速率数模转换器 [53]中。事实证明，它们能够

消除元件失配带来的负面影响。若不采用动态元件匹配，这些失配会导致非线性失真。动态元件匹配会打乱元件的使用模式，从而使误差表现为与输入序列不相关的伪随机噪声。

动态元件匹配的有效性依赖于硬件冗余。通过采用多个单位元件，系统可以利用这些元件的不同组合产生特定的输出电平。动态元件匹配算法利用这种冗余，对每个样本所用的元件进行随机化或循环选择。该过程调制静态失配误差，将其转化为与信号不相关的宽带噪声，随后可被滤除，从而保持数模转换器的线性度 [54]。

在此背景下，本工作的主要目标是介绍一种经济高效、功能全面的基于ΣΔ调制器的数模转换器平台的开发。该系统经过专门设计，以便于对多种动态元件匹配策略进行实验验证和比较分析 [55]。特别是数据加权平均法，其中任意一个数模转换器的平均使用次数与其余数模转换器相等。通过这种方式，元件失配所产生的误差可由一阶高通传递函数进行频谱整形 [56, 57]。

5 背景知识

5.1 Σ-Δ调制器

在 Z域中，模数转换器的输出可表示为

$$Y(z) = X(z)H_x(z) + E(z)H_e(z)$$

其中， H_x 表示信号的传递函数， H_e 表示噪声的传递函数。在许多应用中， H_x 是单位传递函数，而 H_e 可以对噪声的频率分布进行整形，以获得更高的输出分辨率。这是大多数Σ-Δ调制器的特性，噪声整形可降低信号带内的噪声水平。

一阶Σ-Δ调制器数模转换器使用模拟ΣΔ调制器，后接数字抽取器[12]。从信号 $x[n]$中，通过减去量化输出 $y[n]$的模拟表示 $y_a[n]$ ，得到另一个信号；随后使用

$z^{-1}/(1-z^{-1})$。

对于理想数模转换器，其传递函数为单位增益。因此，调制器的输出为

$$Y(z) = X(z)z^{-1} + E(z)(1-z^{-1})$$

其中，$H_e(z) = 1 - z^{-1}$ 在 $z = 1$ 处包含一个零点，因此在直流处产生无限衰减，在较低频率下产生较大衰减，而在较高频率下则产生放大。带内噪声功率可表示为

$$\sigma_{ey}^2 = \sigma_e^2 \frac{\pi^2}{3} \frac{8 f_b^3}{f_s^3}$$

5.2 动态匹配元件

动态元件匹配方法是数字技术，无需预先了解元件变化，即可降低模拟失配误差。

在数模转换器中，离散时间输入序列 $x(n)$ 会产生模拟信号 $v(t)$。

三电平数模转换器可输出 $-\Delta$、0 和 $+\Delta$。实际上，采样输出会受到加性噪声的影响，该噪声源于本应相同的电路元件之间的失配。因此，可将数模转换器视为一个变换模块，它会引入恒定增益、恒定偏移以及加性误差项 $eDAC(n)$。该误差项非线性地取决于 $x(n)$。

增益和偏移问题不大，但非线性项难以处理。DEM 方法的原理是将 $eDAC(n)$ 转换为与输入序列不相关的伪随机噪声。

6 实验室基准测试

基于时间交错型 Σ-Δ 调制器的数模转换器原型采用低成本、易于获取且灵活的元件实现。所提出的实验装置架构如图1所示。

在该原型中，数字逻辑运算通过运行于 Diligent BASYS-3 原型开发板上的程序实现。该设备是一款基于 7 系列 FPGA AMD Artix ®XC7A35T-ICPG236C 的数字电路开发平台。它具有

成本低廉，且连接方式多样，可满足各种应用需求。其主时钟频率为 $fck = 100$ MHz。

所需的正弦信号由现场可编程门阵列利用谐振电路生成。通过对原型开发板的主时钟频率进行分频，可以得到不同的时钟频率 f_H ； $f_H = f_{ck}/N$。

TI SDM 的输出 yk（m）是对 y（n）进行多相分解后得到的分量。

$$y_k(m) = y(mM + k), k = 0, 1, ..., M - 1$$

y（n）的离散时间频率为 f_H，而对于信号 y_k（m），采样频率为 fL。

数模转换器的输入既可以来自 TI SDM 的 y_k（m）输出，也可以来自多路复用器输出的高速信号 y（n）。

每条路径均使用现场可编程门阵列的输出缓冲器作为数模转换器。数模转换器的输出通过一个多输入单输出低通滤波器相加。随后，可使用数字示波器监测低通滤波器的输出。

示波器采用高分辨率的 Picoscope 4262。其主要技术参数如下：分辨率为 16 位，最高采样频率为 10 Msps，带宽为 5 MHz。

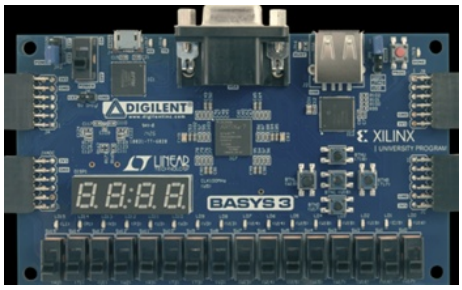
初步测试表明，该原型具有多功能性，可用于比较不同技术以开展研究。

参考文献

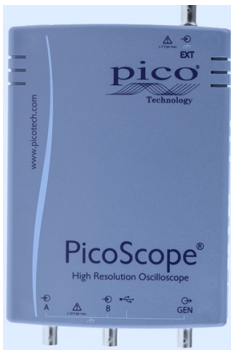
[1] David Kuochieh Su。《style id='2'>过采样数模转换。斯坦福大学，1994 年。

[2] M¨ucahit Kozak 和 Izzet Kale。过采样 *Δ-Σ* 调制器：分析、应用与新型拓扑。施普林格，2003 年。

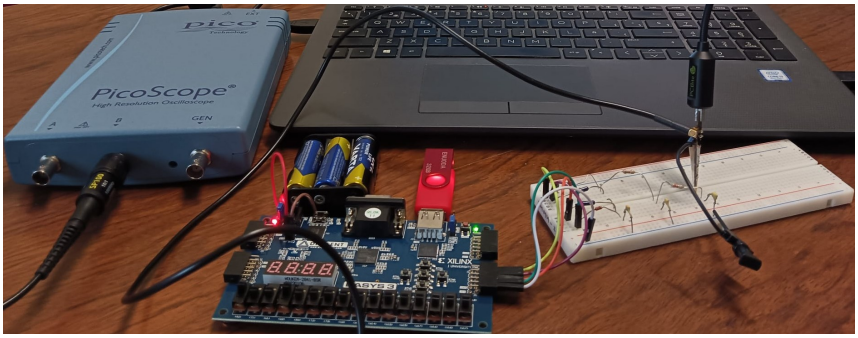
[3] F Colodro、JM Martinez-Heredia、JL Mora 和 A Torralba。采用时间交错技术提高高速性能的数模转换器开环 Σ-Δ 调制器。*AEU*-国际电子学与通信期刊，125:153394，2020 年。



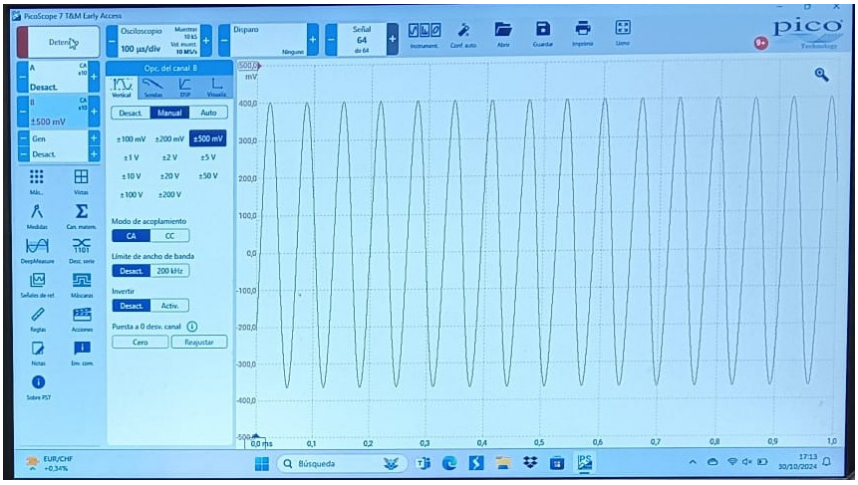
FPGA



示波器



概述



示波器输出

图1：实验装置的组成部分。

[4] Amir Babaie-Fishani 和 Pieter Rombouts。采用三阶噪声整形的全数字为主 VCO 型连续时间 Σ-Δ调制器。*IEEE* 固态电路期刊，52(8):2141–2153，2017年。[5] Chi-Hang Chan、Yan Zhu、Liang Qi、Sai Weng Sin、Maurits Ortmanns 和 Rui P Martins。高性能过采样模数转换器。载于纳米级互补金属氧化物半导体中的模拟与混合信号电路，第181–218页。施普林格，2023年。[6]Martin Clara。高性能数模转换器：数字收发器中的应用，第36卷。施普林格科学与商业媒体，2012年。

[7] Brian Black。用于系统设计的模数转换器架构与选择。《模拟对话》，33(8):1–4，1999年。

[8] Steven F Barrett。模数转换（模数转换器）。载于《人人都能学 *Arduino* 微控制器处理！第二部分》，第97–136页。施普林格，2022年。

[9] Valentin Oleschuk、R Gregor 和 Federico Barrero。《采用不连续同步调制的多相多逆变器驱动》。载于*2012*年第*15*届国际电力电子与运动控制会议（*EPE/PEMC*），第 DS2a–8 页。电气电子工程师学会，2012 年。

[10] Tianqing Shui。低开关频率下两电平同步对称 SVPWM 的电流谐波优化。载于*2020*年亚洲能源与电气工程研讨会（*AEEES*），第 487–491 页。电气电子工程师学会，2020 年。

[11] Manuel R Arahal、Federico Barrero、Manuel G Ortega 和 Cristina Martin。电压型逆变器直接数字控制的谐波分析。《数学与计算机模拟》，130：155–166，2016 年。

[12] Pervez M Aziz、Henrik V Sorensen 与 J Vn der Spiegel。Σ-Δ 转换器概述。*IEEE* 信号处理杂志，13(1):61–84，1996。[13] Walt Kester。过采样插值数模转换器。*MT-017*，教程文档，亚德诺半导体公司，可于 *http://www. analog. com/static/imported- files/tutorials/MT-017. pdf* 获取，2009。[14] Bupesh Pandita 与 Kenneth W Martin。对数模转换器非线性敏感度降低的过采样模数转换器。*IEEE Transactions on Circuits andSystems II: Express Briefs*，56(11):840–844，2009。

[15] Simone Orcioni、Rocco d’Aparo、Armando Lobascio 与 Massimo Conti。固态照明调光中的动态过采样率抖动 Σ-Δ 调制。国际电路理论与应用杂志，41(4):387–395，2013。

[16] R-G Chang、C-Y Chen、J-H Hong 和 S-Y Lee。采用自适应前馈系数的宽动态范围 Σ-Δ 调制器。*IET circuits, devices& systems*，4(2):99–112，2010年。

[17] F Colodro 和 A Torralba。脉宽调制采样信号的频谱分析。*IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*，57(8):622–626，2010年。

[18] James C Candy 和 GC Temes。用于 A/D 和 D/A 转换的过采样方法。过采样Δ-Σ数据转换器，第 1–25 页，1992年。

[19] Dongyang Jiang、Sai-Weng Sin、Seng-Pan U、Rui Paulo Martins 和 Franco Maloberti。面向无线通信的可重构无失配时间交织带通 Σ-Δ 调制器。*Electronics Letters*，53(7):506–508，2017年。

[20] Nasser Erfani Majd 和 Rezvan Fani. 用于极性Δ-Σ调制器发射机的低时钟速率时间交织架构。*ETRI Journal*，45(1):150–162，2023。

[21] James A Cherry 和 W Martin Snelgrove. 用于高速模数转换的连续时间Δ-Σ调制器：理论、实践与性能极限。施普林格，2002。

[22] Haejun Noh、Woojin Kim、Yongkwon Kim、Seok-Tae Koh 和 Hyuntak Jeon。采用嵌入光电二极管驱动电路中的基于压控振荡器的量化器的低功耗、宽动态范围光电容积描记读出集成电路。电子学，14(19):3834，2025。
[23] F. Colodro 和 A. Torralba。多速率单比特Σ-Δ调制器。*IEEETransactions on Circuits and Systems II: Analogand DigitalSignalProcessing*，49(9):629–634，2003。[24] Viet Nguyen、Filippo Schembari 和 Robert Bogdan Staszewski。探索超低电压压控振荡器频率数字转换的速度最大化——

基模数转换器。*IEEE*电路与系统汇刊*I*：正规论文，70(3):1043–1056，2022。

[25] Wenxin Yu、Lenian He 和 Jianxiong Xi。用于电流检测隔离放大器的高精度输入级。微电子学杂志，第 106932 页，2025 年。

[26] A. Petraglia、Fernando A. Pinto Bar´uqui 和 Jacqueline S Pereira。采用时分复用和传递函数多相分解设计低分母阶数的开关电容抽取滤波器。微电子学杂志，40(12):1673–1680，2009 年。

[27] F Colodro、A. Torralba 和 MLaguna。时间交织多速率Σ-Δ调制器。载于 *2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*，第 5581–5584 页。IEEE，2005 年。

[28]Moo-Yeol Choi 和 Bai-Sun Kong。采用数字反馈残差量化增强基于VCO的连续时间Δ-Σ模数转换器的线性度。电子学，10(22):2773，2021 年。

[29]Jingchao Lan、Danfeng Zhai、Yongzhen Chen、Zhekan Ni、Xingchen Shen、Fan Ye 和 Junyan Ren。28 纳米互补金属氧化物半导体工艺中，采用数字后台校准的 2.5 GS/s 四路交织基于环形放大器的流水线逐次逼近型模数转换器。电子学，10(24):3173，2021。

[30] F. Colodro 和 A. Torralba。采用快速跟踪量化器和较少比较器的连续时间Σ-Δ调制器。*IEEE*电路与系统汇刊*I*：正规论文，57(9):2413–2425，2010。

[31] Hadi Dehbovid、Habib Adarang 和 Mohammad Bagher Tavakoli。使用沃尔泰拉级数对压控振荡器抖动生成进行非线性分析。电气与电子工程计算与数学国际期刊，37(2):755–771，2018。

[32] Le-rui Chen、Umer Sadiq Khan、Muhammad Kashif Khattak、Sheng-jun Wen、Hai-quan Wang 和 He-yu Hu。基于非线性频谱和改进型卷积神经网络的模拟电路故障诊断有效方法。科学仪器评论，94(5)，2023。

[33] Jonas Borgmans 和 Pieter Rombouts。用于线性环形压控振荡器模数转换器的增强型电路。*Electronics Letters*，55(10)：583–585，2019。

[34] ChangsokHan. 连续时间*Δ-Σ*调制器中适合互补金属氧化物半导体缩放的量化器。佛罗里达大学，2019年。

[35] F. Colodro和A. Torralba。利用跟踪环路实现用于ΣΔ调制器的基于压控振荡器的量化器的线性度增强。*IEEE Transactions on Circuitsand Systems II: Express Briefs*，61(6)：383–387，2014年。

[36] PA Uchagaonkar、SA Shinde、VV Patil和RK Kamat。基于现场可编程门阵列的ΣΔ模数转换器设计。《国际电子与计算机科学工程期刊》，1(2)：508–513，2012年。

[37] Maral Faghani、Maryam Isa、Mohd Nizar Hamidon和Amin Mazaheri。一阶ΣΔ调制器的两种不同基于现场可编程门阵列的拓扑结构之比较。载于*2015*年*IEEE*国际电路与系统研讨会（*ICSyS*），第120–124页。电气电子工程师学会，2015年。

[38] Dejan Todorovi´c、Iva Salom、Vladimir ˇCelebi´c 和 Jurij Prezelj。采用数字微机电系统麦克风阵列的现场可编程门阵列平台的实现与应用。载于第四届国际电气、电子与计算工程会议论文集，第 5–8 页，2017年。

[39]Rafa-l Kie-lbik、Krzysztof Ha-lagan、Witold Zatorski、Jaros-law Jung、Jacek Ula´nski、Andrzej Napieralski、Kamil Rudnicki、Piotr Amrozik、Grzegorz Jab-lo´nski、Dominik Sto¨zek 等。AruZ——基于现场可编程门阵列的大规模超并行真实复杂系统分析仪。《计算机物理通信》，232：22–34，2018年。

[40] Eric Monmasson、Micka¨elHilairet、Giovanni Spagnuolo 和 MarcianN Cirstea。《用于复杂电力能源系统控制的片上系统现场可编程门阵列器件》。*IEEE*《工业电子杂志》，16(2):53–64，2021年。

[41] F Colodro 和 A Torralba。《细胞神经模糊网络（CNFN）：一种新型细胞网络》。载于*IEEE*第五届国际模糊系统会议论文集，第1卷，第517–521页。电气电子工程师学会，1996年。

[42] Yves Geerts、Michiel Steyaert 和 Willy Sansen。《多位Δ-Σ模数转换器设计》。施普林格，2002年。[43] MR Arahal、MJ Duran、F Barrero 和 SL Toral。《采用可变三次谐波注入的五相感应电机驱动器稳定性分析》。*Electric Power Systems Research*，80(12):1459–1468，2010年。[44] Trevor C Caldwell。《style id='8'>时间交错连续时间Δ-Σ调制器》。2004年。[45] Jafar Talebzadeh 和 Izzet Kale。《一种新颖的双通道连续时间时间交错三阶Σ-Δ调制器，采用积分器共享拓扑》。*Analog Integrated Circuits and Signal Processing*，95(3):375–385，2018年。[46]Christian Schmidt。《数模转换器的交错概念》。施普林格，2020年。[47] Siwan Dong、Sihao Ning、Menghan Yuan、Peng Wang 和 Wenju Yang。《一种基于高阶运算放大器共享技术、用于语音通信的低功耗Σ-Δ调制器》。*AEU-International Journal of Electronics and Communications*，176:155116，2024年。[48] F. Colodro、J.M. Mart´ınez-Heredia、J.L. Mora、J. Ramirez-Angulo 和 A. Tor- ralba。《在模拟域采用时分复用的时间交错Σ-Δ调制器数模转换器》。*IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*，70(2):441–445，2022年。[49] Mahmoud Ghoneim、Omar Ismail、John G Kauffman 和 Maurits Ortmanns。《离散时间Δ-Σ调制器高功率效率运算放大器拓扑的设计研究》。载于*2025 IEEE International Symposium on Circuits and Systems(ISCAS)*，第1–5页。电气电子工程师学会，2025年。[50] Shengjian Liu、Liansheng Liu 和 Yu Peng。《用于频率交错数模转换器的专用幅频误差数字预均衡器》。*Measurement*，第118914页，2025年。[51] Jian Zhao、Yong Ping Xu 和 Yan Su。《一种采用锁相环和噪声整形频率数字转换器的MEMS硅振荡加速度计》。载于*MEMS*

硅振荡加速度计与读出电路，第93–131页。River Publishers，2022。

[52] F Colodro 与 A Torralba。基于具有三阶噪声整形的采样锁相环的频率数字转换。*Electronics Letters*，47(19):1069–1070，2011。

[53] Kok Lim Chan、Jianyu Zhu 与 Ian Galton。采用动态元件匹配防止高分辨率数模转换器中脉冲形状失配引起的非线性失真。*IEEE* 固态电路期刊，43(9):2067–2078，2008。

[54]Anas A Hamoui 与 Kenneth W Martin。面向宽带应用的低过采样Δ-Σ模数转换器中的高阶多位调制器与伪数据加权平均。电气电子工程师学会电路与系统汇刊*I*：常规论文，51(1):72–85，2004。

[55] F Colodro、A Torralba、J.L. Mora 和 J.M. Martinez-Heredia。基于异步 Σ-Δ 调制的模拟平方技术。*IEEETransactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*，56(8)：629–633，2009。

[56] Rex T Baird 和 Terri S Fiez。利用数据加权平均改进 ΔΣ 数模转换器的线性度。发表于*ISCAS'95-International Symposium on Circuits and Systems*，第 1 卷，第 13–16 页。电气电子工程师学会，1995。

[57] Zhijie Chen、Hongyou Li、Mengqian Jiang、Sha Zhu 和 Peiyuan Wan。利用失配误差整形的噪声整形 SAR 模数转换器动态范围自补偿技术。*Electronics Letters*，58(10)：388–389，2022。