

Dither技术结合过采样技术提高ADC采集精度的研究

马 健, 胡颖睿, 江 环

西南民族大学电子信息学院, 四川 成都

收稿日期: 2022年8月13日; 录用日期: 2022年9月12日; 发布日期: 2022年9月21日

摘 要

Dither技术和过采样技术可以改善模数转换器(ADC)的采集精度。本文研究了Dither技术结合过采样技术的方法, ADC的差分端引入Dither信号, 并在ADC后端去除, 而后采用过采样技术对信号滤波抽取, 将ADC的信噪比(Signal to Noise Ratio, SNR)、信纳比(Signal to Noise and Distortion Ratio, SINAD)和无散杂动态范围(Spurious Free Dynamic Range, SFDR), 分别提升了6.59 dB、6.89 dB和19.05 dB, 使得ADC有效位数提升了1位。

关键词

Dither, 过采样, ADC, SFDR, SNR

Research on Improving ADC Acquisition Accuracy by Combining Dither Technology with Oversampling Technology

Jian Ma, Yingrui Hu, Huan Jiang

College of Electronic and Information, Southwest Minzu University, Chengdu Sichuan

Received: Aug. 13th, 2022; accepted: Sep. 12th, 2022; published: Sep. 21st, 2022

Abstract

Dither technology and oversampling technology can improve the acquisition accuracy of analog-to-digital converter (ADC). This paper studies the method of combining the Dither technique with the oversampling technique. The Dither signal is introduced into the differential end of the

ADC and removed at the back end of the ADC. Then, the oversampling technique is used to filter and decimate the signal. The signal to noise ratio (SNR), signal to noise and distortion ratio (SINAD) and spurious free dynamic range (SFDR) of the ADC are increased by 6.59 dB, 6.89 dB and 19.05 dB respectively, so that the ADC significant bit is increased by 1 bit.

Keywords

Dither, Oversampling, ADC, SFDR, SNR

Copyright © 2022 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

ADC 芯片构建了模拟信号与数字信号之间的桥梁, 作为各种高端仪器的核心器件, 其精度的高低直接决定了测量的准确性。一直以来, 高端仪器的研发受 ADC 精度的限制, 高端仪器对 ADC 的精度指标有着较高的要求。1956 年 Widrow 首次指出量化噪声与信号在统计上独立能减少量化损失[1]。1993 年 WagdyMF 和 Goff M 首次提出数字 Dither 概念, 通过将模拟 Dither 信号和数字 Dither 信号相结合, 作为 Dither 加扰信号, 发现 Dither 信号能线性化 ADC 的 SFDR [2]。2009 年, 西安建筑科技大学的陈静等人通过对指定加扰信号的理论推导及仿真验证, 得出 Dither 信号能够改善 ADC 的非线性特性的结论[3]。James C. Candy 采用过采样技术结合求均值滤波算法将 ADC 的有效位数等效提高了 1 位[4]。中国民用航空飞行学院的李国基于过采样技术, 并使用软件方法将 12 位分辨率的 ADC 提高到 16 位的分辨率[5], 但其方法在实现时限制因素较多。目前国内外将 Dither 技术和过采样技术两种方法结合起来提升 ADC 的采集精度鲜有研究。本文在 Matlab 的 Simulink 工具箱搭建了流水线 ADC 的高精度采集系统, 分别仿真出了 Dither 技术、过采样技术, 以及将两者结合后对 ADC 的 SNR、SINAD 和 SFDR 的提升效果。仿真表明此方法可以有效提升 ADC 的采集精度。

2. Dither 技术和过采样技术原理

2.1. Dither 技术

Dither 技术是指在 ADC 的输入端加入一种宽带大幅度抖动噪声, 并在 ADC 的后端去除, 以此提高 ADC 的 SFDR。本文研究服从均匀分布的宽带大幅度 Dither 信号, 属于加减式 Dither 技术。

2.1.1. Dither 信号的产生

Dither 信号由线性反馈移位寄存器产生的 PN 序列通过一个模数转换器(DAC)后生成, 仿真中寄存器数量取 15, 多项式为 $z^{15} + z^{14} + 1$, 此设置可以使 PN 序列达到最大 $2^{15} - 1$ 个状态。

2.1.2. Dither 信号降低频谱的谐波和毛刺

设输入信号为 x , ADC 量化后的信号为 $Q(x)$, 则量化误差 $q(x)$ 可以表示为:

$$q(x) = x - Q(x) \quad (1)$$

从式(1)可知量化误差是输入信号的函数, 由于正弦信号具有周期性, 使得量化误差也具有相同的周期性[6]。量化误差函数 $q(x)$ 傅里叶级数展开后再对其做傅里叶变换可得式(2):

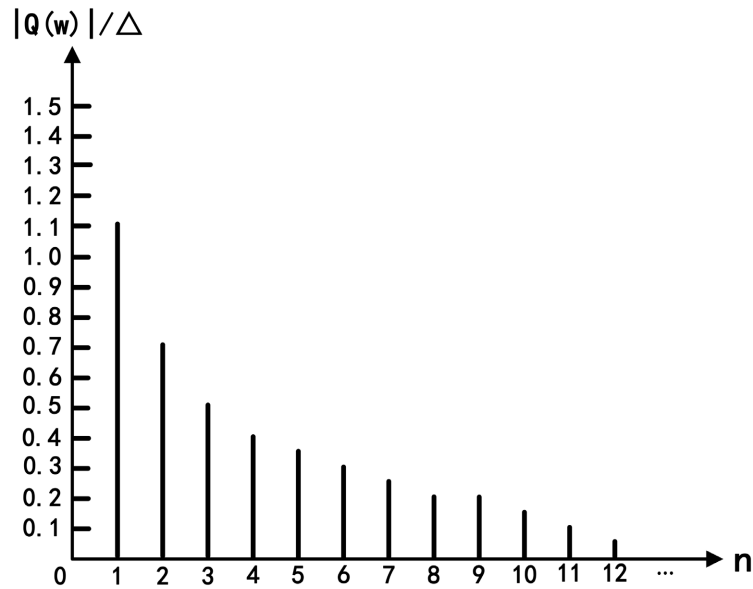


Figure 1. Spectrum of quantization error
图 1. 量化误差的频谱

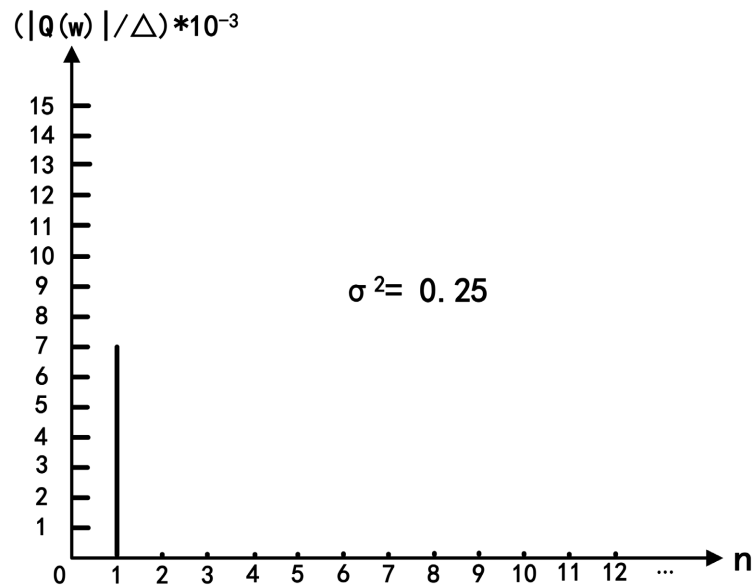


Figure 2. Quantization error after adding Dither
图 2. 加入 Dither 信号后的量化误差

$$|Q(w)| = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta}{n} \delta(w - nw_0) \tag{2}$$

$$|\overline{Q(w)}| = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\Delta}{n} \exp\left[-\frac{2\pi^2 n^2 \sigma^2}{\Delta^2}\right] \cdot \delta(w - w_0) \tag{3}$$

式(2)中 $w_0 = 2\pi/\Delta$ ，由于量化误差的周期性，图 1 频谱产生了较大的谐波。从文献[7]得知，加入 Dither 信号后 ADC 量化误差函数的傅里叶变换可表示为式(3)，其中 σ 为 Dither 信号的均方根值。图 2 是加入 Dither 后的量化误差频谱，谐波明显减小，原因是 Dither 信号打破了量化误差的周期性，使得量化误差

更接近于随机信号[8]。

2.2. 过采样技术

过采样技术要求采样频率是奈奎斯特频率的若干倍。ADC 在量化时产生的量化噪声会均匀的分布在 整个奈奎斯特带宽内。图 3 和图 4 表明了奈奎斯特带宽内的噪声总功率是恒定的，过采样后的噪声总功率 和低速率采样时的总噪声功率是相等的，过采样使噪声分布到更宽的频带范围内，此时落入有效信号 带内的噪声将会减少，设计数字低通滤波器将有效信号带外的噪声滤除，可以提高 ADC 的 SNR 和 SINAD， 再进行抽取，以降低采样速率，减少数据量。

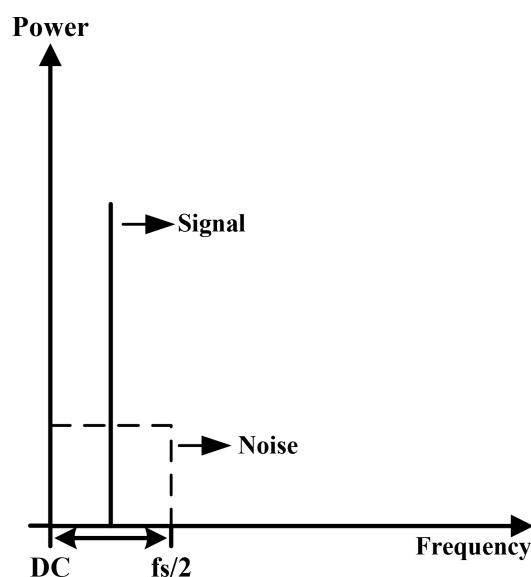


Figure 3. Sampling the power spectrum of the ADC output signal at a lower rate
图 3. 以较低速率采样 ADC 输出信号的功率谱

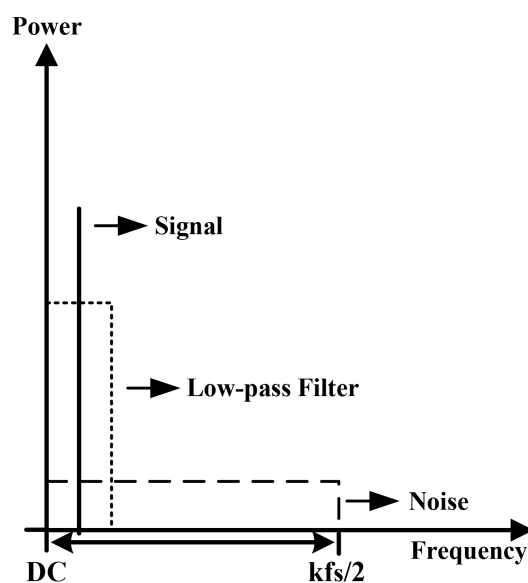


Figure 4. Power spectrum of ADC output signal after oversampling
图 4. 过采样后 ADC 输出信号的功率谱

2.3. Dither 技术和过采样技术结合

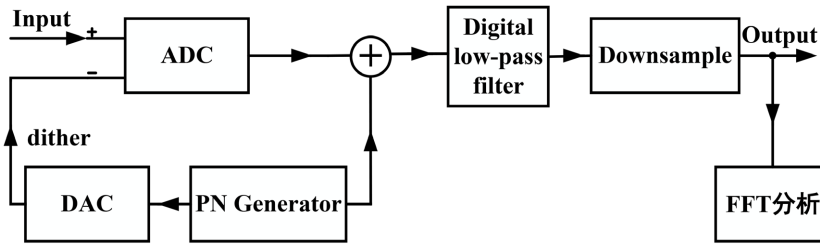


Figure 5. Principle block diagram of Dither technology combined with oversampling technology
图 5. Dither 技术结合过采样技术原理框图

图 5 表明了 Dither 技术与过采样技术结合的原理，采用加减式 Dither 技术，而后将输出信号做过采样滤波、抽取处理，最后对输出数据做 FFT 来分析 ADC 的相关性能，计算 SNR、SINAD 以及 SFDR 的值。

3. 仿真实验

3.1. Dither 技术仿真

为了仿真宽带加减式 Dither 技术对 ADC 性能的提升效果，构建了 12 位流水级 ADC，模型模拟了流水级 ADC 的工作原理，存在流水级延时，输入可以选用单端或差分的模式，模型参考电压为 2 V，采样频率可调，12 位的二进制输出通过一个全加器归为十进制的一路信号。测试此 ADC 的有效位数为 9.6 位，与实际中 12 位流水级 ADC 的有效位数接近。

图 6 输入信号为 1 kHz 的正弦波，加入适当高斯噪声模拟实际中的电路热噪声，计算谐波一般只取 2 到 5 次谐波，为保证谐波不折叠，ADC 采样时钟设置为 10 kHz，使得奈奎斯特带宽为 5 kHz，正好可以取到第 5 次谐波。系统设置了两个选择开关，拨到上方表示 ADC 输入端不引入 Dither 信号，ADC 直接输出，拨到下方表示 ADC 输入端差分输入 Dither 信号，并在 ADC 后端去除 Dither 信号后输出。图 7 和图 8 分别是不引入 Dither 信号时和引入 Dither 信号后 ADC 输出信号的功率谱。引入 Dither 信号后，功率谱中多个谐波和毛刺明显降低，图 8 由于幅度最大的谐波降低，使得 ADC 的 SFDR 得以提升。经过计算 ADC 的 SFDR 提升了大约 7.63 dB，SNR 仅降低 0.32 dB，表明加入的 Dither 信号最终被有效地去除了，并没有因此引入太多噪声使得 ADC 的 SNR 恶化。

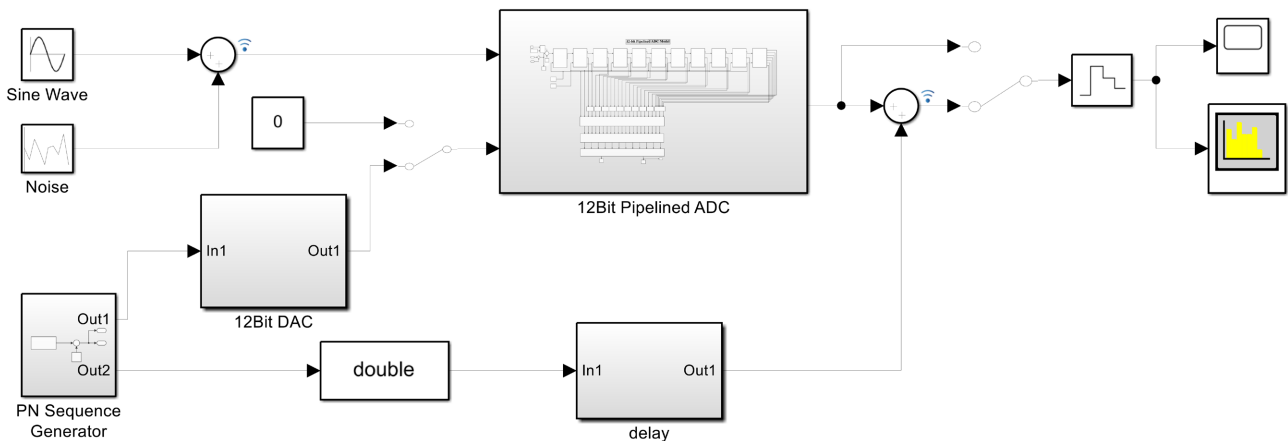
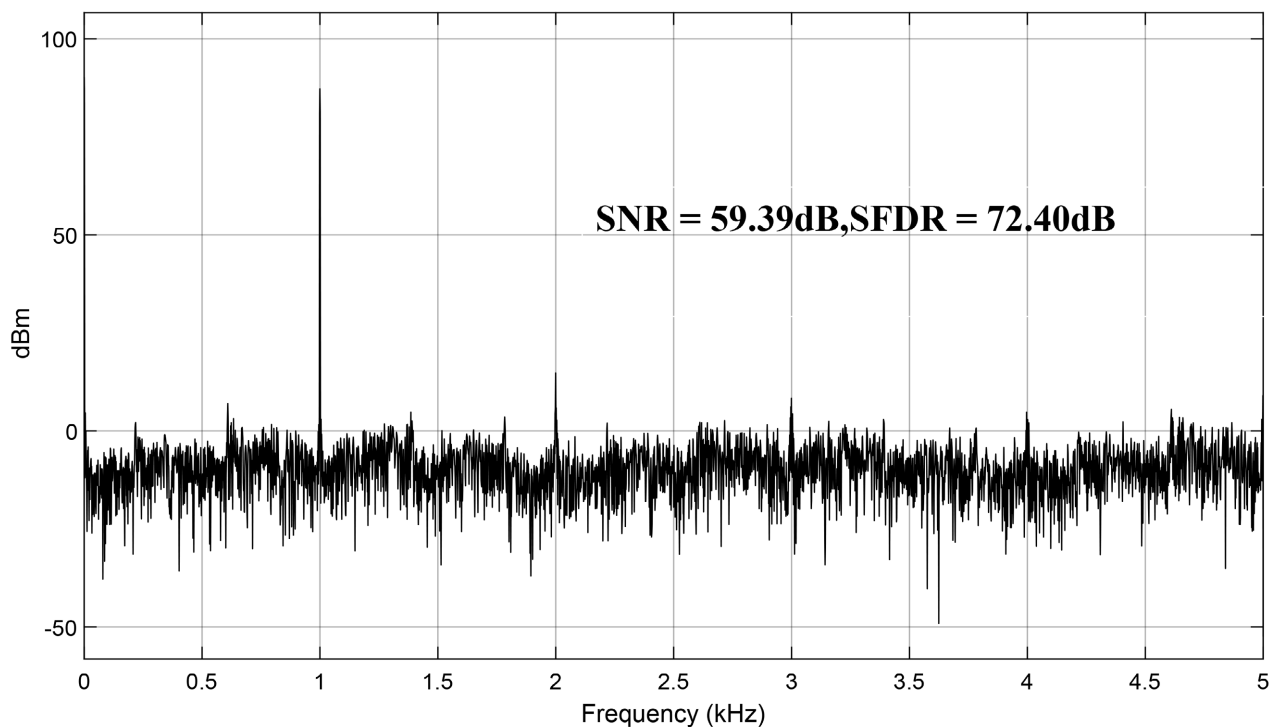


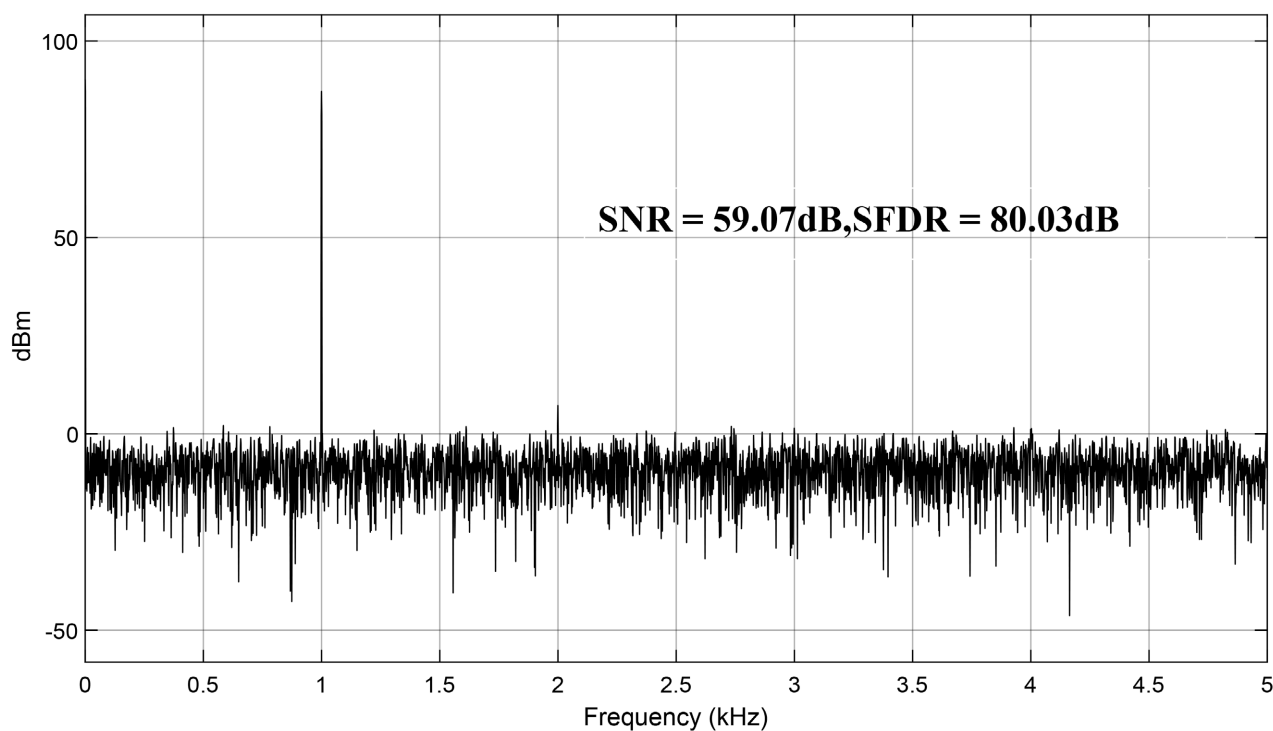
Figure 6. The system model of addition subtraction Dither
图 6. 加减式 Dither 系统模型



RBW=1.83 Hz, Sample rate=10 kHz

Figure 7. Power spectrum of ADC output signal without Dither signal

图 7. 不引入 Dither 信号时 ADC 输出信号的功率谱



RBW=1.83 Hz, Sample rate=10 kHz

Figure 8. The power spectrum of ADC output signal after introducing the Dither signal

图 8. 引入 Dither 信号后 ADC 输出信号的功率谱

3.2. 过采样技术仿真

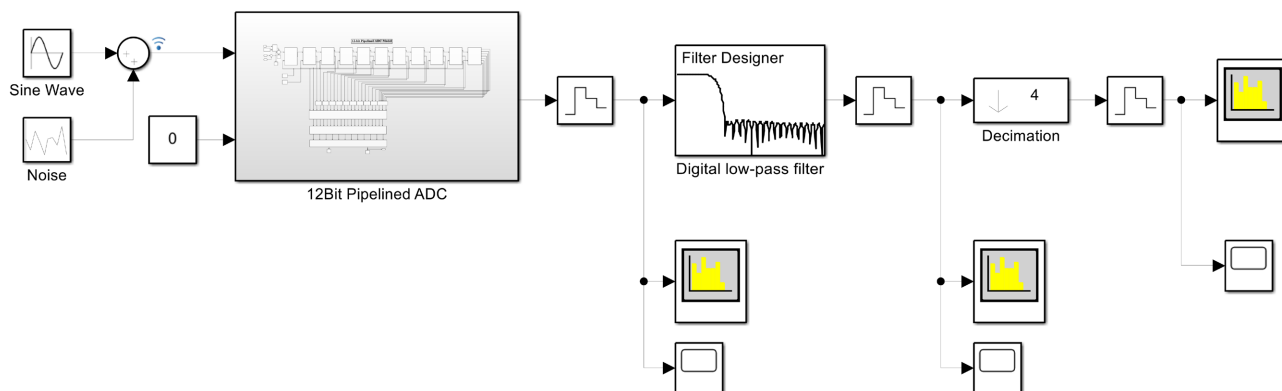


Figure 9. Model of oversampling signal processing system

图 9. 过采样信号处理系统模型

图 9 搭建了过采样信号处理系统，在理想正弦波中添加适量噪声，输入信号频率设为 1 kHz，ADC 时钟频率设为 12 kHz，ADC 输出经过低通的数字 FIR 滤波器后进行 4 倍抽取。滤波器幅频特性如图 10，滤波器阶数设为 50，采样频率和 ADC 时钟频率保持一致，截止频率设置为 1.5 kHz。从图 10 可以看出通带较为平坦，对有效信号的影响较小，而阻带衰减至 -55 dB~-60 dB 左右，可以有效地降低带外的噪声。

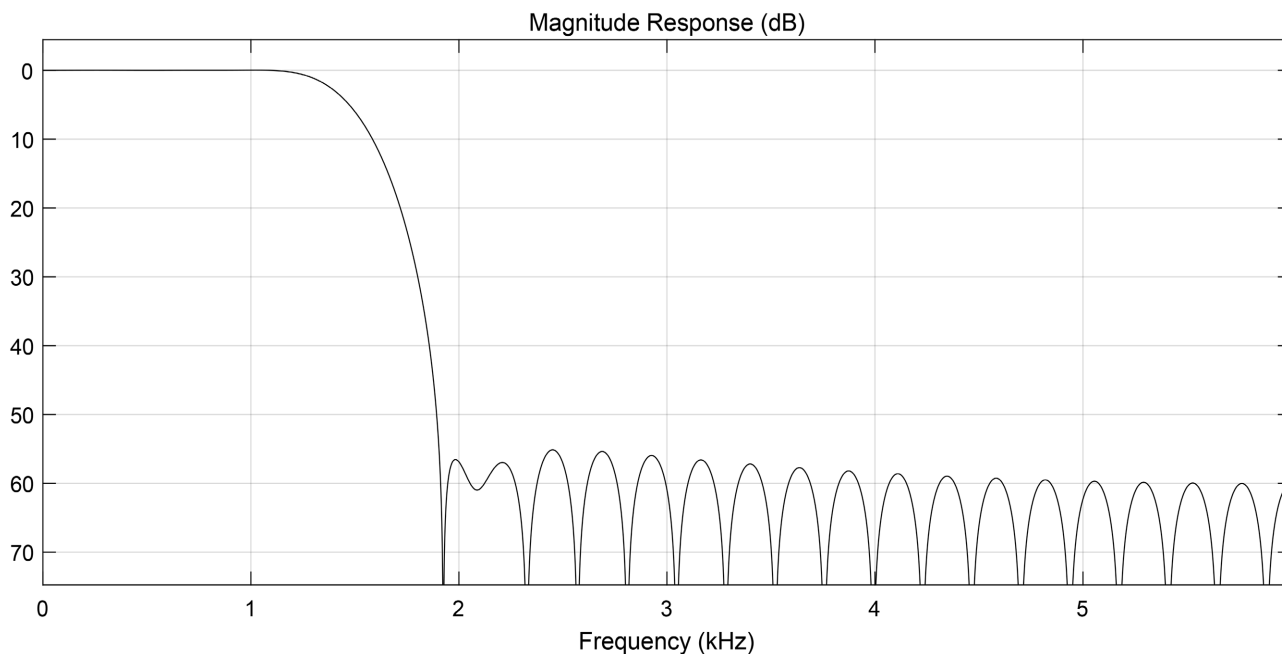
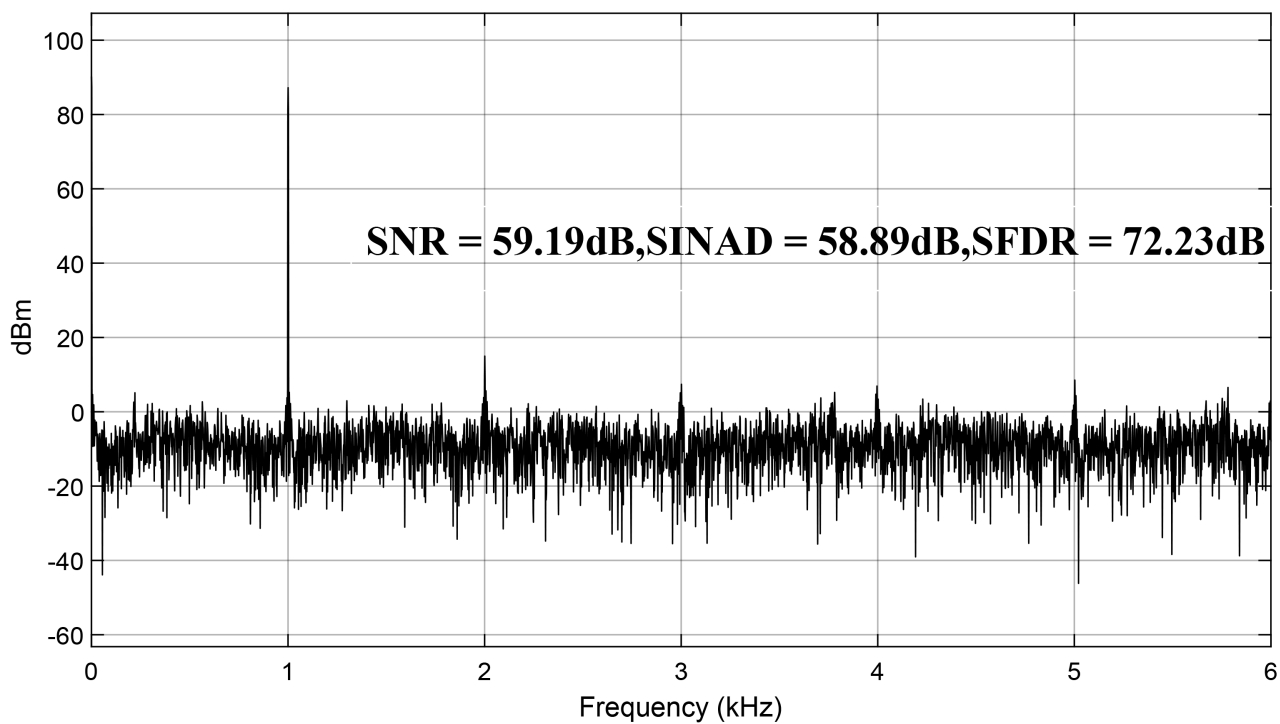


Figure 10. Amplitude frequency characteristic of filter

图 10. 滤波器的幅频特性

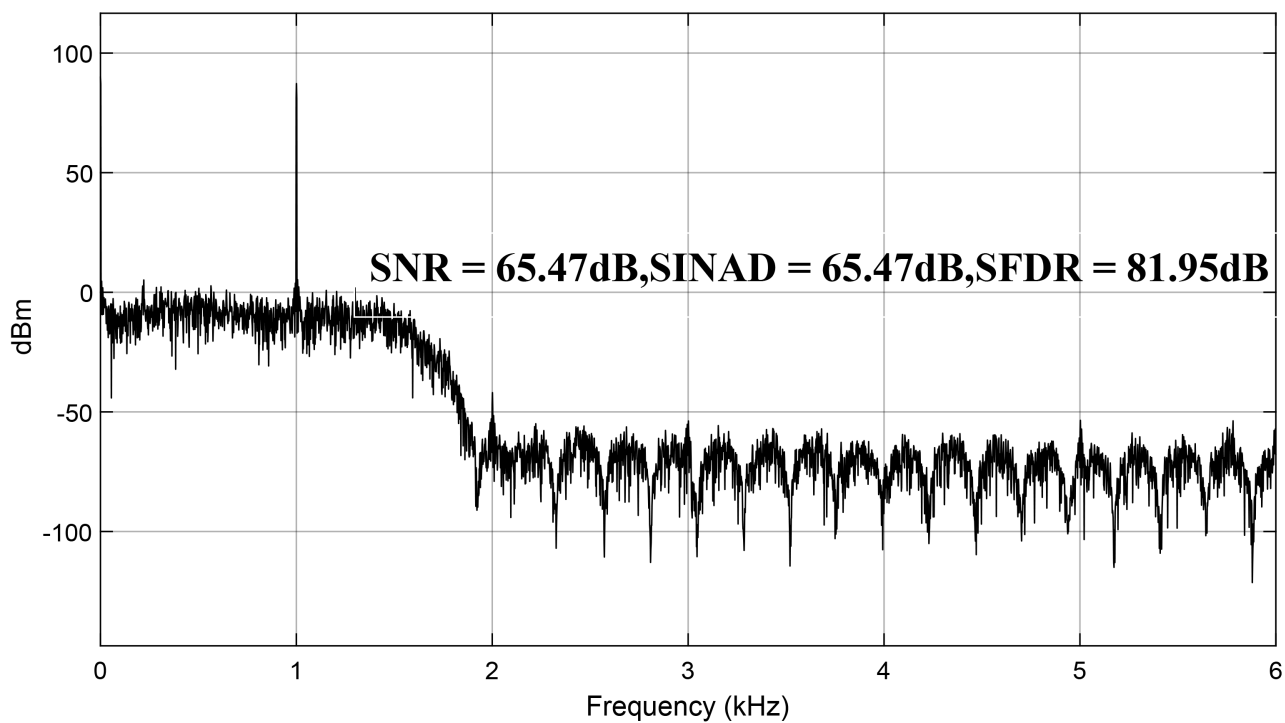
将 ADC 输出、滤波器输出以及抽取后的输出进行 FFT 分析得到图 11、图 12 和图 13。图 11 功率谱中谐波和毛刺较多，严重影响了 ADC 的 SFDR，而由于量化噪声的存在，以及为了模拟非理想正弦波在 ADC 前端添加的高斯白噪声，使得 ADC 的 SNR 只有 59.19 dB，SINAD 只有 58.89 dB，此时计算 ADC



RBW=2.2 Hz, Sample rate=12 kHz

Figure 11. Power spectrum of ADC output signal

图 11. ADC 输出信号的功率谱



RBW=2.2 Hz, Sample rate=12 kHz

Figure 12. Power spectrum of filter output signal

图 12. 滤波器输出信号的功率谱

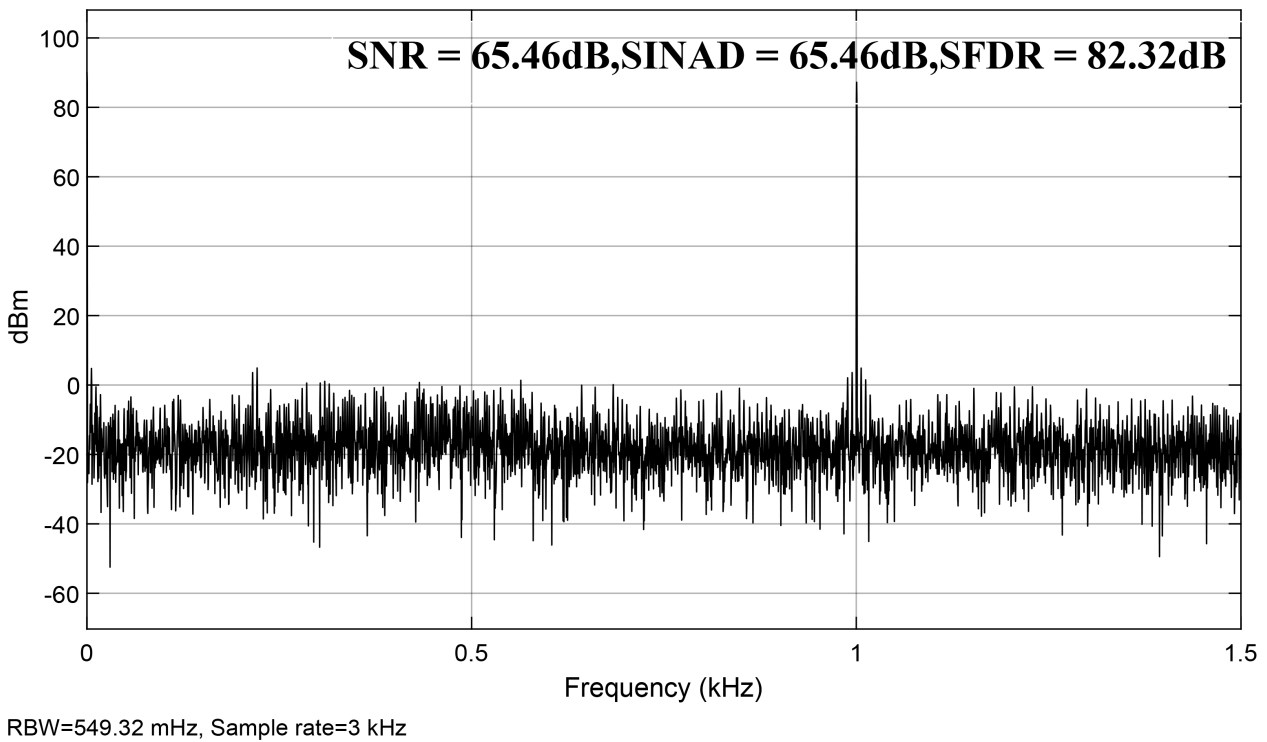


Figure 13. Power spectrum of output signal after extraction
图 13. 抽取后输出信号的功率谱

的有效位数约为 9.5 位，与实际中 12 位 ADC 的有效位数相近。经过滤波器后信号的功率谱如图 12，ADC 的 SNR 增加了 6.28 dB，SINAD 增加了 6.58 dB，SFDR 增加了 9.72 dB，此时 ADC 的有效位数约为 10.6 位，相当于将 ADC 的有效位数增加了一位。后续经过 4 倍的抽取后信号的功率谱如图 13，ADC 的 SNR、SINAD 和 SFDR 几乎不变。此仿真系统证明过采样技术的可以有效地提升 ADC 的采集精度。

3.3. Dither 技术结合过采样技术仿真

图 14 为 Dither 技术和过采样技术结合模型，模型先采用 Dither 技术提升 ADC 的 SFDR，然后采用过采样滤波处理提升 ADC 的 SNR、SINAD 和 SFDR。经仿真验证 Dither 技术和过采样技术结合比单一采用某一种技术对 ADC 的采集精度提升更大。在不采用 Dither 技术和过采样技术的仿真系统中，ADC 输出信号的功率谱作为对照组如图 11，Dither 技术和过采样技术结合后输出信号的功率谱如图 15。图 15

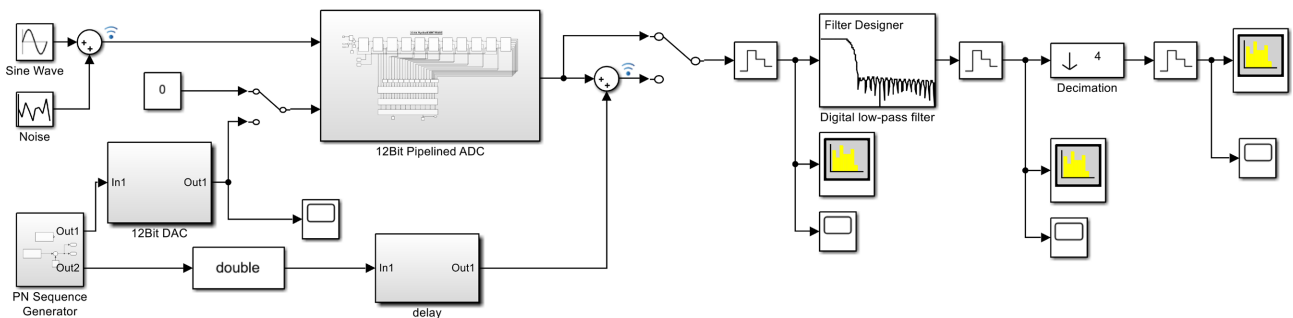


Figure 14. Combined model of Dither technology and oversampling technology
图 14. Dither 技术和过采样技术结合模型

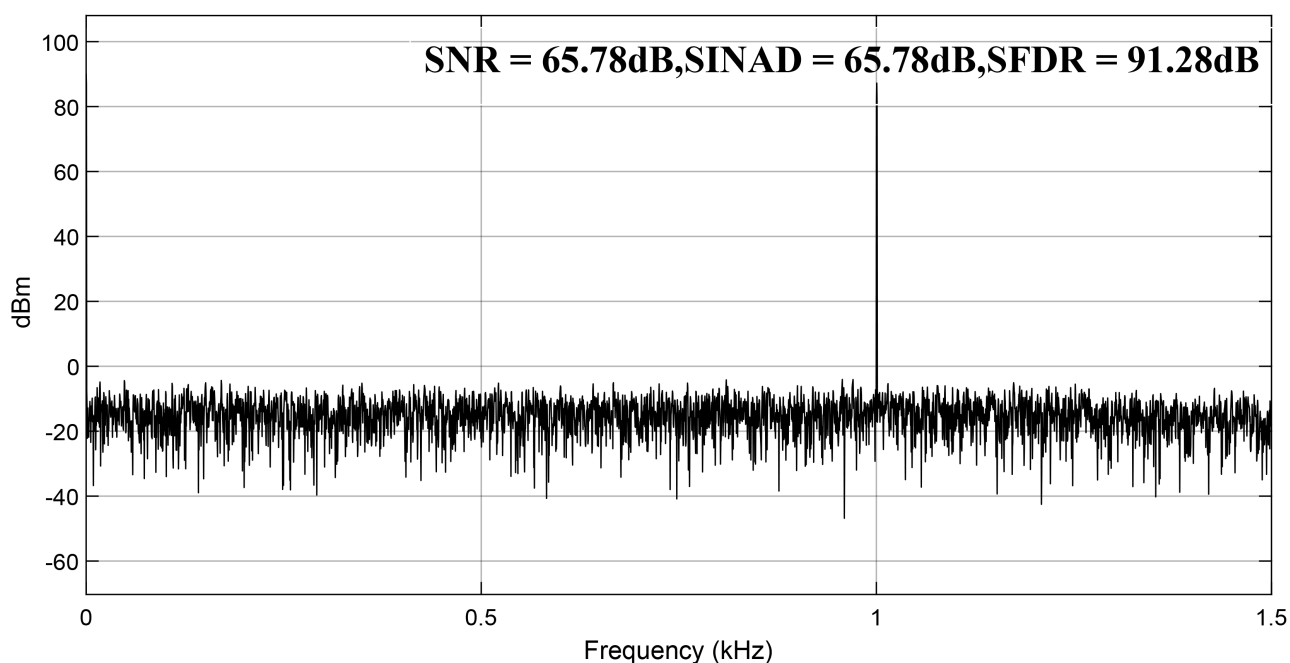


Figure 15. The power spectrum of the output signal after the combination of Dither technology and oversampling technology

图 15. Dither 技术和过采样技术结合后输出信号的功率谱

信号功率谱中的谐波和毛刺很小，经计算 ADC 的 SFDR 提升了 19.05 dB，噪声功率的下降也很明显，ADC 的 SNR 和 SINAD 分别提升了 6.59 dB, 6.89 dB, 相当于把 ADC 的有效位数从 9.5 位提升至 10.6 位。

4. 结束语

本文研究了 Dither 技术和过采样技术提升 ADC 采集精度的方法，并做出了相应的仿真，仿真验证了两种方法都可以有效的提升 ADC 的采集精度，并且将两种方法结合起来对 ADC 采集精度的提升效果更好。结合两种方法最终将 ADC 的 SNR、SINAD 和 SFDR 分别提升了 6.59 dB, 6.89 dB, 19.05 dB, 相当于将 ADC 的有效位数增加了 1 位。

参考文献

- [1] Widrow, B. and Kollár, I. (2008) Quantization Noise: Roundoff Error in Digital Computation, Signal Processing, Control, and Communications. Cambridge University Press, Britain. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511754661>
- [2] Wagdy, M.F. and Goff, M. (1993) Linearizing Ideal A/D Converters via Analog and Digital Dither: Analytical Study. 1993 *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Irvine, 18-20 May 1993, 154-162.
- [3] 陈静, 侯媛彬. Dither 信号理论分析及仿真[J]. 电光与控制, 2009, 16(12):46-47, 57.
- [4] Candy, J.C. and Temes, G.C. (1992) Basic Theory and Analysis. In: Candy, J.C. and Temes, G.C., Eds., *Oversampling Delta-Sigma Data Converters: Theory, Design, and Simulation*, Wiley, 31-31. <https://doi.org/10.1109/9780470545461>
- [5] 李国. 基于过采样技术提高 ADC 分辨率的研究与实现[J]. 计算机工程, 2005, 31(Z1): 244-245+248.
- [6] 张占鹏. Dither 在 ADC 中的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [7] 刘锐. 基于数模混合加扰和去扰的数据采集技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [8] 靳翔, 闫肃, 赵洪明, 王兴华, 陈铖颖. 宽带 Dither 技术改善 ADC SFDR 性能研究[J]. 微电子学与计算机, 2018, 35(3): 9-13.