

بررسی میزان خطای مبدل های ADC برای حصول بهترین نتیجه در FFT ها

رسول شیری

دانشگاه شهید بهشتی

سید محمد سجادی

دانشگاه شهید بهشتی

چکیده

در این مقاله به بررسی میزان خطاهای مبدل های آنالوگ به دیجیتال (ADC) و تأثیر آن ها بر تبدیل فوریه سریع (FFT) پرداخته شده است. مبدل های ADC به عنوان یکی از اجزای حیاتی در سیستم های دیجیتال و پردازش سیگنال، دارای اهمیت زیادی هستند. این مقاله ابتدا به معرفی انواع خطاهای متداول در ADC ها از جمله خطاهای کوانتیزاسیون، غیرخطی بودن و نویز می پردازد. سپس اثرات این خطاها را بر دقت و کارایی تبدیل فوریه سریع مورد بررسی قرار می دهد. نتایج نشان می دهد که خطاهای ADC می توانند به طور قابل توجهی دقت تحلیل فرکانسی را کاهش دهند و منجر به اعوجاجات و نویزهای اضافی در سیگنال خروجی FFT شوند. در پایان، روش ها و تکنیک هایی برای کاهش و تصحیح این خطاها ارائه شده و بهبود عملکرد سیستم های پردازش سیگنال دیجیتال مورد بحث قرار می گیرد. این بررسی می تواند به پژوهشگران در انتخاب و طراحی مناسب تر مبدل های ADC برای کاربردهای مختلف کمک کند.

واژگان کلیدی: Data-converters ، INL ، FFT ، ADC

مقدمه

نیاز به پردازش سیگنال های آنالوگ در فرایندهای کنترل دیجیتال و کاربردهای پردازش سیگنال، دایره کاربرد مبدل های آنالوگ به دیجیتال (ADC) را بسیار وسیع کرده است (Li, 2022). ADC ها به عنوان واسطه ای بین دنیای آنالوگ و دیجیتال عمل می کنند و فرآیند تبدیل سیگنال های آنالوگ به دیجیتال را میسر می سازند تا امکان پردازش آنها توسط پردازنده های دیجیتالی فراهم شود. اهمیت این مبدلها در حوزه هایی مانند مخابرات، تصویربرداری پزشکی، و سیستم های کنترل صنعتی بسیار حائز اهمیت است (Li, 2022; Yan et al., 2014). با این حال، همانند سایر مدارات الکترونیکی، طراحان ADC ها نیز با عواملی همچون نویز و خطا مواجه هستند. این خطاها شامل خطاهای کوانتیزاسیون، غیرخطی بودن، نویز، خطاهای آفست و گین، و خطاهای جیت می شود که هر کدام می توانند دقت و عملکرد نهایی سیستم را تحت تأثیر قرار دهند. به عنوان مثال، خطاهای کوانتیزاسیون می توانند باعث ایجاد اعوجاج در سیگنال دیجیتال شوند، در حالی که نویزهای حرارتی و شات می توانند سطح نویز زمینه را افزایش دهند و دقت اندازه گیری ها را کاهش دهند.

یکی از کاربردهای اساسی ADC در پردازش سیگنال، استفاده آن ها در تبدیل فوریه سریع (FFT) است. FFT به عنوان یکی از الگوریتم های کلیدی در پردازش سیگنال، برای تحلیل فرکانسی سیگنال ها به کار می رود و دقت آن به طور قابل ملاحظه ای به دقت مبدل ADC وابسته است. تحقیقات نشان داده اند که خطاهای ADC می توانند منجر به کاهش رزولوشن فرکانسی و افزایش اعوجاج طیفی در خروجی FFT شوند که این موضوع در کاربردهایی مانند تحلیل طیفی و ارتباطات بی سیم از اهمیت ویژه ای برخوردار است.

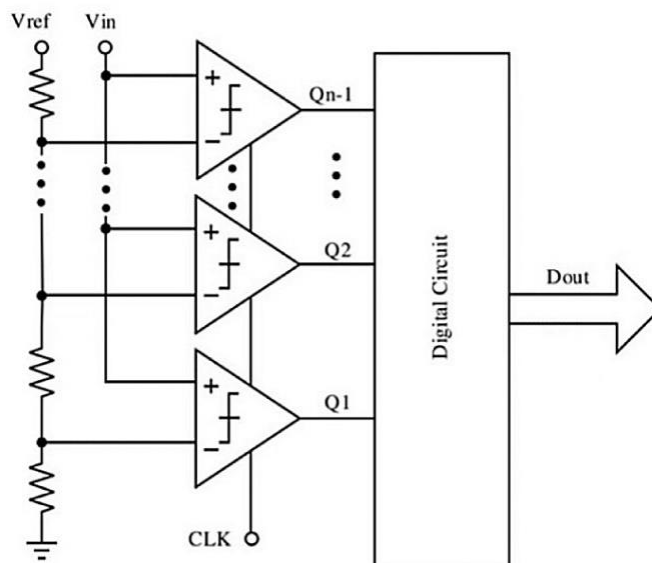
در این مقاله، ما به بررسی عمیق تر خطاهای مختلف ADC و تأثیرات این خطاها بر دقت و کیفیت خروجی FFT می پردازیم. با تأکید بر روش های مختلف کاهش و تصحیح خطاها، این مطالعه به پژوهشگران کمک می کند تا در انتخاب و طراحی مناسب تر ADC برای کاربردهای مدنظر خود، از دقت و کارایی مطلوب بهره مند شوند. این بررسی می تواند راهگشای بهبود عملکرد سیستم های پردازش سیگنال دیجیتال در حوزه های مختلف باشد.

روش تحقیق

از آنجاکه برای تبدیل سیگنال های آنالوگ به دیجیتال الگوریتم های متفاوتی وجود دارد، در این قسمت به معرفی و توضیح پرکاربردترین ADC ها پرداخته شده است.

ADC های موازی (Flash ADC)

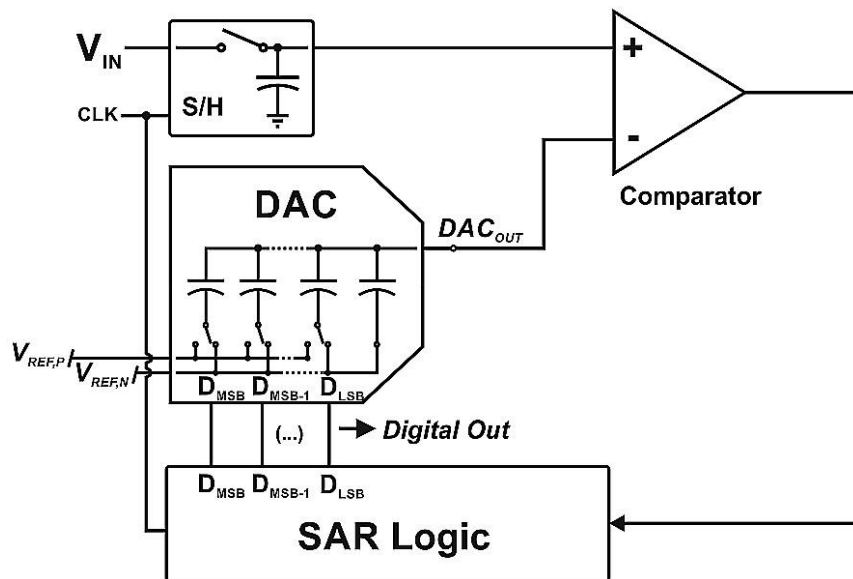
ADC های موازی که به نام Parallel ADC نیز شناخته می شوند، از یک سری مقایسه کننده با سرعت بالا استفاده کرده که به صورت همزمان و موازی عمل می کنند. عملیات تبدیل در این مبدل ها به صورت بلادرنگ انجام می شود. (Li, 2022) این نوع از ADC در سیستم های پردازش سریع سیگنال، مانند رادار و مخابرات، کاربرد دارد. به دلیل ساختار ساده و تعداد زیادی از مقایسه کننده ها، این ADC ها می توانند به سرعت بسیار بالایی دست یابند، اما هزینه و مصرف انرژی بالایی نیز دارند و به عموماً به واسطه کنترل انرژی مصرفی با توانایی تفکیک پایین تری ساخته میشوند (Urekar & Pejic, 2018). با توجه به اینکه در ساختار این نوع از مبدلها تعداد زیادی مقایسه کننده و مقاوما استفاده شده است میزان توان مصرفی آنها از یک سو و سطحی را که بر روی ویفر سلیکونی اشغال میکنند هم نسبتاً زیاد است. (Sireesha & Kumar, 2015) در کاربردهایی که نیاز به سرعت نمونه برداری بسیار بالا است، مانند پردازش ویدیو و سیستم های راداری، ADC های فلش انتخابی ایده آل هستند. مبدل MAX109 یکی از تراشه نمونه برای بررسی این نوع از مبدلهاست.



شکل ۱ شماتیک یک Flash ADC (Li, 2022)

ADCهای تقریب متوالی (SAR ADC)

ADCهای (Successive Approximation Register) SAR بر اساس یک الگوریتم تقریب متوالی عمل می کنند. این نوع ADC از یک مدار داخلی استفاده می کند که به تدریج و به صورت بیتی مقادیر سیگنال ورودی را مقایسه و تعیین می کند. این ADCها به دلیل دقت بالا و مصرف انرژی کم، به طور گسترده ای در دستگاه های قابل حمل، مانند تلفن های همراه و ابزارهای پزشکی، مورد استفاده قرار می گیرند (Harpe, 2022; Yan et al., 2014). از دیگر ویژگی های ADCهای SAR می توان به توانایی کار در ولتاژهای پایین و داشتن زمان تبدیل قابل پیش بینی اشاره کرد، که این ویژگی ها آنها را برای کاربردهای مختلف بسیار مناسب می سازد (Yan et al., 2014). MAX1132 یک تراشه با الگوریتم SAR است، هر چند در این مقاله برای بررسی عملکرد این نوع از مبدلها اقدام به بررسی مبدل میکروکنترلر ESP32 شده است. یک مدار SAR معمولی عموماً از ۴ بخش نمونه گیر و نگه دارنده، مقایسه کننده، کنترلر دیجیتال و یک فیدبک DAC تشکیل شده است. (Harpe, 2022) در ابتدا یک نمونه توسط بخش نمونه گیر و نگه دارنده دریافت شده و واحد کنترلر به عنوان اولین تقریب مقداری را در ورودی مقایسه کننده قرار خواهد داد، بسته به اینکه این مقدار بزرگتر و یا کوچکتر از مقدار نمونه باشد، مقایسه کننده سیگنال مناسب جهت افزایش یا کاهش مقدار تقریبی را تولید خواهد کرد، این فرآیند تا آنجا ادامه پیدا خواهد کرد که تفاوت دو مقدار کمتر از یک میزان مشخص که نشان دهنده دقت مبدل است باشد. میزان انرژی مصرفی این مبدلها به شارژ و دشارژ خازنهای طبقه DAC وابسته است، الگوریتمهایی وجود دارد که میتوانند این الگوی مصرف را کاهش داده و سیکل شارژ و دشارژ را به منظور به حداقل رساندن توان مصرفی کم کنند. (Bialek et al., 2013; Tong et al., 2010) این آرایش ساده و فضای اشغال شده کم این مبدل را برای کاربردهای system on chip مستعد کرده است. (Tong et al., 2010)



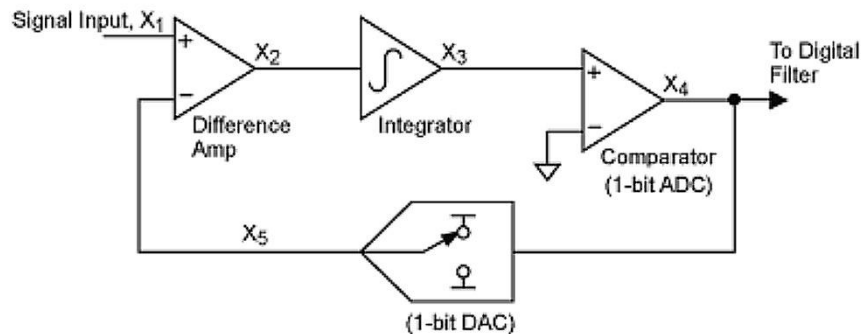
شکل ۲ شماتیک یک SAR ADC با فیدبک خازنی (Brenna et al., 2016)

ADCهای دلتا-سیگما (Delta-Sigma ADC)

ADCهای دلتا-سیگما از ترکیب تبدیل دلتا و نوسان ساز سیگما استفاده می کنند تا به دقت بسیار بالایی دست یابند. این نوع ADCها با استفاده از یک مبدل آنالوگ به دیجیتال داخلی و یک فیلتر دیجیتال، سیگنال های آنالوگ را به صورت دیجیتال تبدیل می کنند. ADCهای دلتا-سیگما به دلیل دقت و رزولوشن بالا، در کاربردهای صوتی، ابزارهای دقیق اندازه گیری و اتوماسیون صنعتی بسیار محبوب هستند. از ویژگی های مهم این نوع ADCها می توان به توانایی حذف نویز و ارائه نتایج بسیار دقیق اشاره کرد. برای درک عمیق این ساختار باید مفهوم noise shaping را درک کرد. در یک مبدل آنالوگ به دیجیتال فاکتور SNR که معرف دامنه سیگنال به نویز است را از حاصل نسبت سیگنال به مساحت زیر منحنی توزیع نویز که عموماً در بازه فرکانسی به طور یکنواخت توزیع شده است به دست می آید، مقدار آن به طور تجربی از رابطه ۱ به دست می آید.

$$SNR = 6.02N + 1.76 \text{ dB} \quad (1)$$

از آنجاکه در مبدل دلتا-سیگما یک ADC تکبیتی وجود دارد به نظر می رسد که میزان SNR در آن از ۷/۷۸ تجاوز نکند، اما یک تکنیک خلاقانه برای پوشش این نقص ابداع شده است. اگر نرخ نمونه برداری k برابر شود، مقدار مؤثر نویز این بار در بازه وسیع تری توزیع شده و با فیلتر کردن قسمت قابل توجهی از آن از بین می رود. ذکر این نکته ضروری است که میزان SNR ثابت بوده و تا این لحظه تغییری نکرده است. پس از آن با استفاده از یک فیلتر دیجیتال می توان قسمت قابل توجهی از نویز را حذف و SNR را افزایش داد. در دومین گام noise shaping توسط یک بلوک انتگرال گیر قسمت اعظم نویز رو به بازه انتهایی انتقال داده که پس فیلتر کردن آن قسمت نویز به شکل قابل توجهی کاهش یافته و مقدار SNR افزایش میابد. در انتها با یک مدار decimation نرخ نمونه برداری به مقدار ابتدایی باز می گردد. (maxim integrated, 2003)



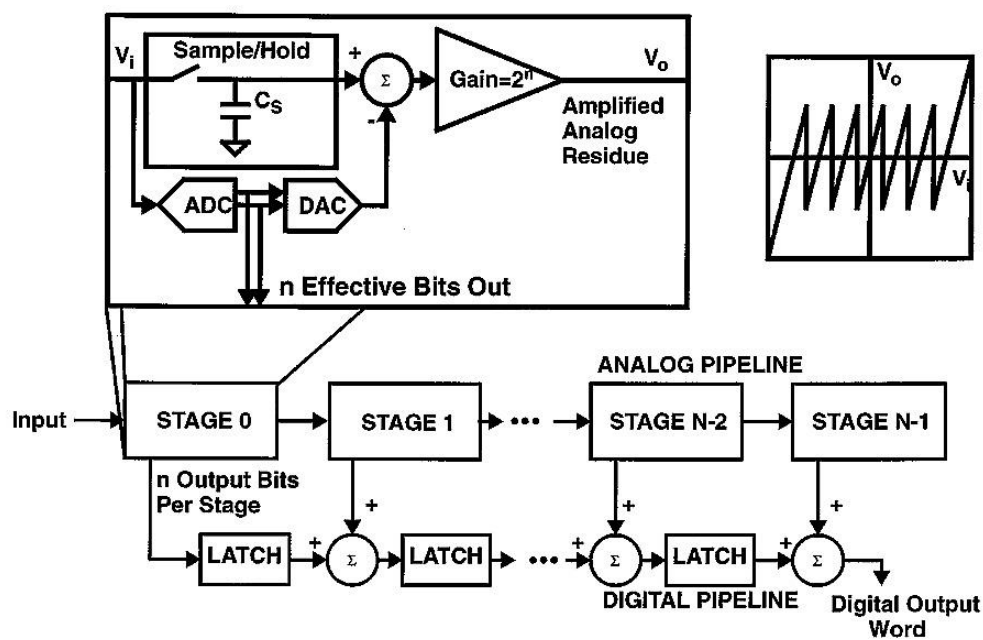
شکل ۳ شماتیک یک اسلاتور دلتا-سیگما (maxim integrated, 2003)

ADCهای مبتنی بر نوسان ساز (Ramp ADC)

ADCهای Ramp یا نوسان ساز، از یک نوسان ساز خطی و یک مقایسه کننده استفاده می کنند تا ولتاژ ورودی را با سرعت ثابت اندازه گیری و تبدیل کنند. در این نوع ADC یک مولد موج ramp وجود دارد که از یک مقدار پایه شروع به افزایش نموده و پس از رسیدن به بازه انتهایی مجدداً و در لحظه به مقدار اولیه باز خواهند گشت، در هر لحظه توسط یک مقایسه کننده، مقدار این ولتاژ با ولتاژ ورودی مقایسه می شود، در مسیر افزایش اگر با مقدار ولتاژ ورودی مساوی شود می تواند مقدار آن را باتوجه به زمان طی شده از نقطه صفر اندازه بگیرد. Ramp ADCها به دلیل ساختار ساده و هزینه پایین، در ابزارهای اندازه گیری عمومی و سیستم های کنترل صنعتی کاربرد دارند. هرچند که این نوع ADC سرعت تبدیل کمتری نسبت به سایر انواع دارد، اما برای کاربردهایی که نیاز به سادگی و کم هزینه بودن دارند، بسیار مناسب است.

ADCهای لوله ای (Pipeline ADC)

ADCهای لوله ای یا Pipeline ADC از چندین مرحله تبدیل سریالی تشکیل شده اند که هر مرحله به صورت موازی کار می کند و سیگنال ورودی به صورت متوالی از یک مرحله به مرحله بعدی منتقل می شود. در هر مرحله سیگنال توسط یک مبدل Flash ADC با خروجی n بیتی تبدیل را انجام داده و آن را در یک رجیستر n بیتی نگه می دارد، این مقدار تبدیل شده مجدداً توسط یک DAC به مقدار آنالوگ تبدیل شد و از سیگنال اصلی کم می شود، مقدار باقیمانده در 2^n ضرب شده و ورودی طبقه بعد را تشکیل می دهد، این فرایند برای m مرحله انجام می شود تا یک مبدل $m \times n$ بیتی حاصل شود. (Medawar et al., 2010) این ساختار اجازه می دهد که هر مرحله تبدیل با سرعت بالا و به صورت موازی عمل کند، این فرایند منجر به افزایش سرعت کلی تبدیل می شود. ADCهای لوله ای برای کاربردهایی که نیاز به سرعت و دقت بالا دارند، مانند پردازش سیگنال دیجیتال و تجهیزات ارتباطی، بسیار مناسب هستند. این نوع ADCها با استفاده از تکنیک های پردازش موازی، توانایی دستیابی به نرخ نمونه برداری بالا و دقت مطلوب را دارند. MAX1439 یک تراشه نمونه برای بررسی این نوع از مبدلهاست. از آنجا که میزان قابل توجهی از توان مصرفی مربوط به مقایسه کننده هاست و آنها هم برای نیمی از این چرخه تبدیل مورد استفاده قرار گرفته اند، میتوان هر یک از آنها را بین دو مرحله که زمان عملکرد مشترک ندارند به اشتراک گذاشت، این فرایند توان مصرفی این مبدله را کاهش میدهد. (Wang et al., 2010)



شکل ۴ شماتیک یک Pipeline ADC (Cline & Gray, 1996)

یافته‌ها

باتوجه به بررسی‌های انجام شده فاکتورهای اساسی در هر الگوریتم تبدیل بررسی شده و مطابق جدول ۱ ارائه شده است

جدول ۱ مقایسه ADC های مورد بحث

نوع ADC	توان مصرفی (mW)	حداکثر فرکانس نمونه برداری (MSPS)	خطای تبدیل (LSB)	نویز (dB)	خطای غیر خطی (%)	تأخیر (ns)	نیاز به کالیبراسیون
ADC فلش	۵۰۰-۱۰۰	۳۰۰۰-۵۰۰	± 0.5	-۸۰	۰.۰۱	۱	ندارد
ADC تقریبی متوالی	۵۰-۱	۱۰۰-۱	± 1	-۷۰	۰.۰۲	۱۰	ندارد
ADC دلتا-سیگما	۱۰۰-۰.۱	۱۰-۰.۰۰۱	± 0.1	-۱۲۰	۰.۰۰۱	۱۰۰۰	ندارد
ADC مبتنی بر رمپ	۱۰۰-۱۰	۱۰-۰.۱	± 2	-۶۰	۰.۰۵	۱۰۰	ندارد
ADC لوله‌ای	۳۰۰-۵۰	۵۰۰-۱۰	± 0.5	-۸۵	۰.۰۲	۵	دارد

بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان داد که خطاهای موجود در ADCها می توانند تأثیرات قابل توجهی بر دقت و کارایی تبدیل فوریه سریع (FFT) داشته باشند. خطاهایی مانند کوانتیزاسیون، نویز، و غیرخطی بودن می توانند منجر به کاهش رزولوشن فرکانسی و افزایش اعوجاج طیفی در نتایج تبدیل فوریه شوند.

از آنجاکه FFT بیش از هر شاخص دیگری به خطاهای زمانی وابسته است، بهترین انتخاب برای کاربردهای FFT در نرخ های نمونه برداری بالا flash ADC است. البته در فرکانس های کم به علت SNR بالای الگوریتم delta-sigma می تواند راه گشا باشد، اما به این مسئله باید توجه شود که به علت تأخیر ذاتی، این الگوریتم انتخاب مناسبی در فرکانس های بالا نیست.

منابع

- Bialek, J., Wickmann, A., Ohnhaeuser, F., Fischer, G., Weigel, R., & Ussmueller, T. (2013). Implementation of a digital trim scheme for SAR ADCs. *Advances in Radio Science*, 11, 227–230. <https://doi.org/10.5194/ars-11-227-2013>
- Brenna, S., Bonetti, A., Bonfanti, A., & Lacaita, A. L. (2016). An efficient tool for the assisted design of SAR ADCs capacitive DACs. *Integration, the VLSI Journal*, 53, 88–99. <https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2015.12.005>
- Cline, D. W., & Gray, P. R. (1996). A power optimized 13-b 5 Msamples/s pipelined analog-to-digital converter in 1.2 μm CMOS. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 31(3), 294–303. <https://doi.org/10.1109/4.494191>
- Harpe, P. (2022). Low-Power SAR ADCs: Basic Techniques and Trends. *IEEE Open Journal of the Solid-State Circuits Society*, 2, 73–81. <https://doi.org/10.1109/ojsscs.2022.3211482>
- Li, D. (2022). Comparative Study of High Speed ADCs. In *Highlights in Science, Engineering and Technology ESAC (Vol. 2022)*.
- maxim integrated. (2003). demystifying delta-sigma ADCs.
- Medawar, S., Händel, P., Björzell, N., & Jansson, M. (2010). Input-dependent integral nonlinearity modeling for pipelined analog-digital converters. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 59(10), 2609–2620. <https://doi.org/10.1109/TIM.2010.2045551>
- Sireesha, R., & Kumar, A. (2015). Design of low power 0.8V Flash ADC using TIQ in 90nm technology. 2015 International Conference on Smart Technologies and Management for Computing, Communication, Controls, Energy and Materials, ICSTM 2015 - Proceedings, 406–410. <https://doi.org/10.1109/ICSTM.2015.7225451>
- Tong, X., Chen, J., Zhu, Z., & Yang, Y. (2010). A high performance 90 nm CMOS SAR ADC with hybrid architecture. *Journal of Semiconductors*, 31(1). <https://doi.org/10.1088/1674-4926/31/1/015002>
- Urekar, M., & Pejic, D. (2018, October 19). Low Resolution Stochastic Flash ADC for High Precision Energy and RMS Voltage Measurements for Smart Grid. *CPEM 2018 - Conference on Precision Electromagnetic Measurements*. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501106>
- Wang, J., Zhu, D., Guo, L., Jin, R., Wan, P., & Lin, P. (2010). A 22mW 10-bit 150-MS/s pipelined ADC in 1.2V 65nm CMOS. *ICSICT-2010 - 2010 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology, Proceedings*, 454–456. <https://doi.org/10.1109/ICSICT.2010.5667673>
- Yan, S., Zhongming, X., Pengcheng, Y., Jueying, Z., Li, G., Song, Y., Xue, Z., Yan, P., Zhang, J., & Geng, L. (2014). A 0.6-V 8.3-ENOB asynchronous SAR ADC for biomedical applications. *Journal of Semiconductors*, 35(8). <https://doi.org/10.1088/1674-4926/35/8/085007>



Checking the error rate of ADC converters to get the best result in FFTs

Seyed mohammad sajadi
Shahid Beheshti University

Rasoul shiri¹
Shahid Beheshti University

Abstract

In this article, we examine the error rates of Analog-to-Digital Converters (ADCs) and their impact on the Fast Fourier Transform (FFT). ADCs are critical components in digital systems and signal processing, playing a significant role. The article begins by introducing common types of errors in ADCs, including quantization errors, non-linearity, and noise. It then investigates the effects of these errors on the accuracy and performance of the FFT. The results indicate that ADC errors can significantly reduce the precision of frequency analysis, leading to distortions and additional noise in the FFT output signal. Finally, methods and techniques for reducing and correcting these errors are presented, and the improvement of digital signal processing system performance is discussed. This review can aid researchers in selecting and designing more suitable ADCs for various applications.

Keywords: ADC , FFT , INL , Data-converters