



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Electrical Engineering Department

MSc Thesis

**NS-SAR in Direct Capacitance-to-Digital Conversion
for Capacitive Sensors**

**By
Ali Mohammad Rahmani**

**Supervisor
Dr. M Yavari**

Feb 2019



دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(پلی تکنیک تهران)

دانشکده مهندسی برق

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی برق گرایش مدارهای مجتمع الکترونیک

عنوان

تبدیل مستقیم ظرفیت خازن به دیجیتال با معماری NS-SAR در

سنسورهای خازنی

نگارش

علی محمد رحمانی

استاد راهنما

دکتر محمد یآوری

بهمن ۱۳۹۷

صفحه فرم ارزیابی و تصویب پایان نامه - فرم تأیید اعضاء کمیته دفاع

در این صفحه فرم دفاع یا تأیید و تصویب پایان نامه موسوم به فرم کمیته دفاع - موجود در پرونده آموزشی - را قرار دهید.

اینجانب علی محمد رحمانی متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب تحت نظارت و راهنمایی اساتید دانشگاه صنعتی امیرکبیر بوده و به دستاوردهای دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات و روال متعارف ارجاع و در فهرست منابع و مآخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلاً برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نگردیده است. در صورت اثبات تخلف در هر زمان، مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از درجه اعتبار ساقط بوده و دانشگاه حق پیگیری قانونی خواهد داشت.

کلیه نتایج و حقوق حاصل از این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی امیرکبیر می باشد. هرگونه استفاده از نتایج علمی و عملی، واگذاری اطلاعات به دیگران یا چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس از این پایان نامه بدون موافقت کتبی دانشگاه صنعتی امیرکبیر ممنوع است. نقل مطالب با ذکر مآخذ بلامانع است.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضا

تقديم به:

خانواده عزيزم

تشکر و قدردانی:

از استاد فرهیخته، جناب آقای دکتر یآوری که در راه انجام این پژوهش مرا از مساعدت‌های علمی و عملی خود بهره‌مند ساختند، کمال تشکر و قدردانی دارم. همچنین از زحمات دوستانم، آقای دکتر تمدن، آقای دکتر یعقوبی، آقای دکتر مهدی و سعید براتی، خانم مهندس دودانگه، آقای مهندس ابراهیم‌نژاد، آقای مهندس میرزاحسینی و دیگر عزیزان در آزمایشگاه مدارهای مجتمع الکترونیک تشکر می‌نمایم که از تجربیات ارزشمند خود، بنده را بهره‌مند ساختند.

از جناب آقای دکتر کاتوزیان و آقای دکتر معزی که زحمت داوری این پایان نامه را متقبل شدند، نهایت سپاسگزاری را دارم.

خداوند را به خاطر توفیق استفاده از محضر اساتید و دوستان گرانقدر شاکرم و سربلندی و توفیق آنان را از خداوند منان خواستارم.

چکیده

بازده انرژی لازمه اصلی برای سیستم‌های حسگر بی‌سیم، کاشت‌های پزشکی و افزاره‌های پوشیدنی است. در این گونه از سیستم‌ها لازم است تا انرژی مصرفی سیستم حسگر حداقل شود تا از تعویض باتری جلوگیری شود یا در حالت بهتر بتواند با انرژی که از محیط بدست می‌آورد فعال باشد. حسگرهای خازنی توان استاتیک مصرف نمی‌کنند. بنابراین از نظر بازده انرژی می‌توانند قابل توجه باشند. علاوه بر آن می‌توانند در گستره‌ی وسیعی از کاربردهای حسگر استفاده شوند. اما مدار قرائتگر حسگر یا همان مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال می‌تواند بیشترین انرژی را در کل سیستم حسگر مصرف کند. بنابراین توسعه‌ی مبدل‌های ظرفیت خازن به دیجیتال با بازده انرژی مناسب امری بسیار حیاتی برای کاهش انرژی مصرفی سیستم حسگر است.

در این پایان‌نامه به طراحی و شبیه‌سازی مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال مبتنی بر ساختار SAR که در آن شکل‌دهی نویز انجام می‌شود، پرداخته شده است. شکل‌دهی نویز در مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال باعث افزایش دقت مبدل می‌شود. شکل‌دهی نویز در مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR به دو صورت فعال و غیر فعال صورت می‌گیرد که در این پایان‌نامه از روش غیر فعال استفاده شده است. در این روش با استفاده از یک فیلتر خازنی مناسب مقدار ولتاژ باقیمانده‌ی تبدیل نمونه‌ی قبل دوباره در تبدیل نمونه‌ی جدید شرکت می‌کند و این کار باعث افزایش دقت مبدل می‌شود. مزیت استفاده از این روش، عدم استفاده از تقویت‌کننده و در نتیجه افزایش بازده انرژی است. ضرایب فیلتر استفاده شده در مبدل به نسبت خازن‌ها وابسته است به همین دلیل عدم تقارن خازن‌ها تأثیری روی شکل‌دهی نویز ندارند. برای شبیه‌سازی مبدل پیشنهادی در سطح سیستمی، از نرم‌افزار MATLAB و برای شبیه‌سازی در سطح مداری، از نرم‌افزار Cadence استفاده شده است. همچنین برای تست عملکرد مبدل از روش ترکیبی آرایه‌ی خازنی و ولتاژ متغیر استفاده شده است. تکنولوژی مورد استفاده برای پیاده‌سازی مداری مبدل پیشنهادی، تکنولوژی TSMC CMOS 180nm است. بازده انرژی یا همان معیار شایستگی بدست آمده برای مبدل پیشنهادی 231 fJ/step است. با فرکانس نمونه‌برداری $F_s = 666.67 \text{ kS/s}$ و نسبت بیش‌نمونه‌برداری ۸، دقت بدست آمده $11/19$ بیت و حداقل خازن تشخیص 633 aF بدست می‌آید. توان مصرفی مبدل ۴۵ میکرووات در ولتاژ مرجع $1/2$ ولت و محدوده‌ی دینامیکی مبدل نیز 5.12 pF است.

واژه‌های کلیدی:

حسگر خازنی، مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال، NS-SAR، مبدل آنالوگ به دیجیتال، شکل‌دهی نویز

فهرست مطالب

۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱- انگیزه
۴	۲-۱- اهداف
۴	۳-۱- ساختار پایان نامه
۶	فصل ۲: مبدل‌های ظرفیت خازن به دیجیتال و مشخصه‌های عملکردی آن‌ها
۷	۱-۲- اساس کار مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال
۸	۱-۱-۲- فیلتر ضد تاخوردگی
۸	۲-۱-۲- مدار نمونه بردار
۹	۳-۱-۲- کوانتایزر
۱۰	۴-۱-۲- فیلتر دیجیتال
۱۱	۲-۲- بیش‌نمونه برداری و شکل‌دهی نویز در مبدل آنالوگ به دیجیتال
۱۵	۳-۲- اساس کار مبدل‌های ظرفیت خازن به دیجیتال
۱۶	۱-۳-۲- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال مبتنی بر SAR
۱۷	۲-۳-۲- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال مبتنی بر سیگما-دلتا
۱۸	۳-۳-۲- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال مبتنی بر PM/PWM
۱۹	۴-۳-۲- محدوده‌ی دینامیکی
۱۹	۵-۳-۲- زمان اندازه‌گیری
۲۰	۶-۳-۲- دقت مطلق
۲۰	۷-۳-۲- ضریب شایستگی
۲۱	۴-۲- کاربردهای مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال
۲۳	فصل ۳: مروری بر مبدل‌های ظرفیت خازن به دیجیتال SAR
۲۴	۱-۳- انگیزه‌ی استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR در CDC
۲۴	۲-۳- مبدل‌های ظرفیت خازن به دیجیتال مبتنی بر ساختار SAR
۲۵	۱-۲-۳- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR
۲۸	۲-۲-۳- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال با آپ‌امپ
۳۲	۳-۲-۳- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR با آپ‌امپ اینورتری
۳۵	۴-۲-۳- مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR VCO
۳۷	۳-۳- جمع‌بندی روش‌های ارائه شده

۳۹	فصل ۴: ساختار پیشنهادی مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR
۴۰	۱-۴- مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR با شکل دهی نوین.....
۴۴	۲-۴- تبدیل مبدل آنالوگ به دیجیتال به مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال ADC to CDC.....
۴۴	۳-۴- ساختار کلی مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR پیشنهادی.....
۵۵	۴-۴- نحوه‌ی انتخاب خازن‌های DAC.....
۵۶	۵-۴- آنالیز نویر.....
۵۸	۶-۴- مقایسه گر.....
۶۲	۷-۴- طراحی و پیاده‌سازی منطق SAR.....
۶۴	۸-۴- سویچ‌ها.....
۶۴	۱-۸-۴- سویچ‌های DAC.....
۶۵	۲-۸-۴- سویچ‌های ولتاژ مد مشترک.....
۶۶	۳-۸-۴- سویچ‌های فیلتر FIR.....
۶۶	۴-۸-۴- سویچ‌های حسگر.....

۶۷	فصل ۵: نتایج شبیه‌سازی مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR پیشنهادی
۶۹	۱-۵- مدل خازن حسگر.....
۷۰	۲-۵- شبیه‌سازی مداری.....
۷۶	۳-۵- توان مصرفی.....
۸۰	۴-۵- مقایسه‌ی عملکرد.....

۸۲	فصل ۶: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۳	۱-۶- نتیجه‌گیری.....
۸۴	۲-۶- پیشنهادات.....

۸۶	مراجع
۹۳	پیوست الف

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): بلوک دیاگرام ساده شده ی میکروسیستم حسگر خازنی ۳
- شکل (۱-۲): نمودار کلی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال ۸
- شکل (۲-۲): مدار ساده ی نمونه بردار ۹
- شکل (۳-۲): مدل ساده ی کوانتایزر ۹
- شکل (۴-۲): منحنی انتقال کوانتایزر n بیتی ۱۰
- شکل (۵-۲): چگالی طیف نویز بدون بیش نمونه برداری ۱۲
- شکل (۶-۲): چگالی طیف توان نویز با بیش نمونه برداری ۱۲
- شکل (۷-۲): مدولاتور سیگما-دلتا [۱۳] ۱۴
- شکل (۸-۲): مدل خطی مدولاتور سیگما-دلتا [۱۳] ۱۴
- شکل (۹-۲): بلوک دیاگرام ساده ی مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال با روش غیر مستقیم ۱۶
- شکل (۱۰-۲): بلوک دیاگرام SAR CDC ۱۷
- شکل (۱۱-۲): بلوک دیاگرام Sigma-delta CDC ۱۸
- شکل (۱۲-۲): بلوک دیاگرام PM/PWM CDC ۱۸
- شکل (۱۳-۲): نمونه ی قابل کاشت بیسیم حسگر فشار خون [۱۷] ۲۲
- شکل (۱۴-۲): نمونه ی قابل کاشت حسگر فشار داخل چشم [۱۸] ۲۲
- شکل (۱۵-۲): مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال معمولی SAR [۱۹] ۲۵
- شکل (۲-۳): زمان بندی مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR [۱۹] ۲۶
- شکل (۳-۳): دقت مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR بدون آپ امپ بر حسب ولتاژ آفست مقایسه گر و ولتاژ مرجع [۱۹] ۲۸
- شکل (۴-۳): مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال با آپ امپ [۲۰] ۲۸
- شکل (۵-۳): حداکثر خازن فیدبک تابعی از از خازن کل نسبت به دقت N [۲۰] ۳۱
- شکل (۶-۳): حداقل بهره ی تقویت کننده تابعی از دقت [۱۶] ۳۳
- شکل (۷-۳): مدار مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR با آپ امپ اینورتری [۱۶] ۳۴
- شکل (۸-۳): مبدل خازن به دیجیتال SAR VCO [۲۲] ۳۶
- شکل (۱-۴): مدار ساده ی NS-SAR [۲۷] ۴۲
- شکل (۲-۴): مدل کلی و خطی NS-SARs [۱۳] ۴۳
- شکل (۳-۴): ساختار پیشنهادی مدار تکسر مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال SAR با شکل دهی نویز ۴۵

- شکل (۴-۴): نمودار زمان‌بندی مبدل خازن به دیجیتال SAR پیشنهادی ۴۷
- شکل (۵-۴): بلوک دیاگرام سیستمی مدار مبدل ظرفیت خازن به دیجیتال پیشنهادی ۵۲
- شکل (۶-۴): مدار تفاضلی مبدل خازن به دیجیتال پیشنهادی ۵۳
- شکل (۷-۴): مقایسه‌ی اندازه‌ی تابع تبدیل نویز ساختار پیشنهادی و ساختار مرجع [۳۳] ۵۴
- شکل (۸-۴): انحراف استاندارد عدم تقارن برای خازن واحد [۱۶] ۵۶
- شکل (۹-۴): مقایسه گر لچ دینامیک با یک ورودی تفاضلی ۶۰
- شکل (۱۰-۴): لچ SR ۶۱
- شکل (۱۱-۴): مقایسه گر استفاده شده در مبدل پیشنهادی با سه ورودی تفاضلی ۶۱
- شکل (۱۲-۴): ساختار مداری منطق SAR [۳۵] ۶۳
- شکل (۱۳-۴): فلیپ‌فلاپ نوع D با گیت انتقالی ۶۴
- شکل (۱۴-۴): سویچ‌های نوع N و P ۶۴
- شکل (۱۵-۴): نمایش سویچ‌های DAC ۶۵
- شکل (۱۶-۴): سویچ بوت-استرپ [۳۸] ۶۶
- شکل (۱۷-۴): سویچ ساده‌ی CMOS ۶۶
- شکل (۱-۵): مکان هندسی قطب‌ها و صفرهای تابع تبدیل NTF ۶۸
- شکل (۲-۵): مدل‌سازی خازن حسگر ۶۹
- شکل (۳-۵): مدار تست امپدانس ورودی مدل خازن حسگر ۷۰
- شکل (۴-۵): طیف خروجی مبدل پیشنهادی در MATLAB ۷۱
- شکل (۵-۵): طیف خروجی مبدل پیشنهادی در MATLAB ۷۴
- شکل (۶-۵): طیف خروجی مبدل پیشنهادی در Cadence ۷۴
- شکل (۷-۵): طیف خروجی مبدل پیشنهادی در Cadence در FF-40 ۷۵
- شکل (۸-۵): طیف خروجی مبدل پیشنهادی در Cadence در SS 85 ۷۵
- شکل (۹-۵): طیف خروجی مبدل پیشنهادی در MATLAB با اعمال غیرایده‌آلی‌ها Error! Bookmark not defined. ۷۷
- شکل (۱۰-۵): SNR نسبت به OSR ۷۷
- شکل (۱۱-۵): FOM نسبت به OSR ۷۸
- شکل (۱۲-۵): C_{LSB} نسبت به OSR ۷۸
- شکل (۱-۶): بلوک دیاگرام سیستمی مدار مبدل پیشنهادی ۹۰

فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۳): مبدل‌های خازن به دیجیتال مبتنی بر SAR ۳۸
- جدول (۱-۴): مقادیر پارامتری خازن‌های فیلتر ۵۰
- جدول (۲-۴): مقدار پارامترهای تابع تبدیل NTF ۵۲
- جدول (۳-۴): ابعاد مقایسه گر طراحی شده ۶۲
- جدول (۱-۵): مقادیر نویز ارجاع داده شده به ورودی مبدل در دماهای مختلف ۷۳
- جدول (۲-۵): مقادیر SNDR با اعمال نویز کوانتیزاسیون و نویز ارجاع داده شده به ورودی در دماهای مختلف دمایی ۷۶
- جدول (۳-۵): توان مصرفی مبدل ۷۷
- جدول (۴-۵): خلاصه‌ی عملکرد مبدل پیشنهادی با ضرایب OSR مختلف ۷۹
- جدول (۵-۵): خلاصه‌ی عملکرد مبدل پیشنهادی در گوشه‌های مختلف با $NFFT=2^{12}$ (Cadence) ۸۰
- جدول (۶-۵): مقایسه مبدل پیشنهادی با سایر کارهای انجام شده ۸۱

فهرست اختصارات

ADC: Analog-to-Digital Converter
CDC: Capacitance-to-Digital Converter
NS-SAR: Noise Shaping Successive Approximation Register
CMOS: Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DAC: Digital-to-Analog Converter
DR: Dynamic Range
ENOB: Effective Number of Bits
FFT: Fast Fourier Transform
FoM: Figure of Merit
LSB: Least Significant Bit
NMOS: N Type CMOS Transistor
MDAC: Multiplying DAC
MSB: Most Significant Bit
PMOS: P Type CMOS Transistor
SAR: Successive Approximation Register
SFDR: Spurious Free Dynamic Range
S/H: Sample and Hold
SNDR: Signal to Noise and Distortion Ratio
SNR: Signal to Noise Ratio
NTF: Noise Transfer Function
STF: Signal Transfer Function
OSR: Over Sampling Ratio
PM/PWM: Pulse Modulation/ Pulse Width Modulation

واژه‌نامه

Anti-Aliasing Filter	فیلتر ضد تاشدگی
Band-Width	پهنای باند
Boltzmann Constant	ثابت بولتزمن
Digital-to-Analog Converter	مبدل دیجیتال به آنالوگ
Capacitance-to-Digital Converter	مبدل خازن به دیجیتال
Analog-to-Digital Converter	مبدل آنالوگ به دیجیتال
Dynamic	پویا
Dynamic Range	محدوده‌ی دینامیکی
Figure of Merit	معیار شایستگی
Nyquist-Rate Converters	مبدل‌های نرخ نایکوئیست
Offset	آفست
Over Sampling	بیش‌نمونه‌برداری
Signal to Noise and Distortion Ratio	نسبت سیگنال به اعوجاج و نویز
Signal to Noise Ratio	نسبت سیگنال به نویز
Static	ایستا
Noise Transfer Function	تابع تبدیل نویز
Signal Transfer Function	تابع تبدیل سیگنال
Wireless Transceiver	گیرنده و فرستنده‌ی بیسیم
Wireless Sensor Network	شبکه‌های حسگر بیسیم
Internet Of Everything	اینترنت اشیا

Decimatin Filter	فیلتر آشکارساز
Effective Number of Bit	تعداد بیت موثر
Absolute Resolution	دقت مطلق
Inverter Base OP-AMP	تقویت کننده ی اینورتری
Voltage controller oscillator	نوسان ساز کنترل شونده با ولتاژ
Most Significant Bit	بیت پر ارزش
Transmission Gate	گیت انتقالی

- [1] P. Corke, T. Wark, R. Jurdak, W. Hu, P. Valencia, and D. Moore, "Environmental wireless sensor networks," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 11, pp. 1903-1917, 2010.
- [2] A. Pantelopoulos and N. G. Bourbakis, "A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 40, no. 1, pp. 1-12, 2010.
- [3] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, "The internet of things: A survey," *Computer networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2787-2805, 2010.
- [4] H. Alemdar and C. Ersoy, "Wireless sensor networks for healthcare: A survey," *Computer networks*, vol. 54, no. 15, pp. 2688-2710, 2010.
- [5] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, "Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey," *Computer Networks*, vol. 67, pp. 104-122, 2014.
- [6] M. H. Ouda, M. Arsalan, L. Marnat, A. Shamim, and K. N. Salama, "5.2-GHz RF Power Harvester in 0.18 um CMOS for Implantable Intraocular Pressure Monitoring," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 61, no. 5, pp. 2177-2184, 2013.
- [7] V. Raghunathan, S. Ganeriwal, and M. Srivastava, "Emerging techniques for long lived wireless sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 44, no. 4, pp. 108-114, 2006.
- [8] M. A. Pertijs and Z. Tan, "Energy-efficient capacitive sensor interfaces," in *Nyquist AD Converters, Sensor Interfaces, and Robustness*: Springer, pp. 129-147, 2013.
- [9] A. Sundararajan and S. R. Hasan, "Release etching and characterization of MEMS capacitive pressure sensors integrated on a standard 8-metal 130 nm CMOS process," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 212, pp. 68-79, 2014.
- [10] S. Xia, K. Makinwa, and S. Nihtianov, "A capacitance-to-digital converter for displacement sensing with 17b resolution and 20μs conversion time," in *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2012 IEEE International*, 2012, pp. 198-200.
- [11] Z. Tan, R. Daamen, A. Humbert, Y. V. Ponomarev, Y. Chae, and M. A. Pertijs, "A 1.2-V 8.3-nJ CMOS humidity sensor for RFID applications," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 48, no. 10, pp. 2469-2477, 2013.

- [12] H. Muhammad *et al.*, "Development of a bioinspired MEMS based capacitive tactile sensor for a robotic finger," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 165, no. 2, pp. 221-229, 2011.
- [13] H. Garvik, "An energy efficient noise-shaping SAR ADC in 28 nm FDSOI," NTNU, 2015.
- [14] S. Oh *et al.*, "A dual-slope capacitance-to-digital converter integrated in an implantable pressure-sensing system," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 7, pp. 1581-1591, 2015.
- [15] A. Alhoshany and K. N. Salama, "A precision, energy-efficient, oversampling, noise-shaping differential SAR capacitance-to-digital converter," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, no. 99, pp. 1-10, 2018.
- [16] H. Omran, A. Alhoshany, H. Alahmadi, and K. N. Salama, "A 33fJ/Step SAR capacitance-to-digital converter using a chain of inverter-based amplifiers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 64, no. 2, pp. 310-321, 2017.
- [17] P. Cong, N. Chaimanonart, W. H. Ko, and D. J. Young, "A wireless and batteryless 10-bit implantable blood pressure sensing microsystem with adaptive RF powering for real-time laboratory mice monitoring," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 12, pp. 3631-3644, 2009.
- [18] M. H. Ghaed *et al.*, "Circuits for a cubic-millimeter energy-autonomous wireless intraocular pressure monitor," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 60, no. 12, pp. 3152-3162, 2013.
- [19] H. Omran, "Energy-Efficient Capacitance-to-Digital Converters for Low-Energy Sensor Nodes," conference proceedings, 2015.
- [20] H. Omran, M. Arsalan, and K. N. Salama, "A robust parasitic-insensitive successive approximation capacitance-to-digital converter," in *Custom Integrated Circuits Conference (CICC), 2014 IEEE Proceedings of the*, 2014, pp. 1-4.
- [21] R. G. Dreslinski, M. Wieckowski, D. Blaauw, D. Sylvester, and T. Mudge, "Near-threshold computing: Reclaiming moore's law through energy efficient integrated circuits," *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 2, pp. 253-266, 2010.
- [22] A. Sanyal and N. Sun, "An Energy-Efficient Hybrid SAR-VCO Delta-Sigma Capacitance-to-Digital Converter in 40-nm CMOS," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 7, pp. 1966-1976, 2017.
- [23] M. M. Ghanbari, J. M. Tsai, A. Nirmalathas, R. Muller, and S. Gambini, "An energy-efficient miniaturized intracranial pressure monitoring system," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 52, no. 3, pp. 720-734, 2017.

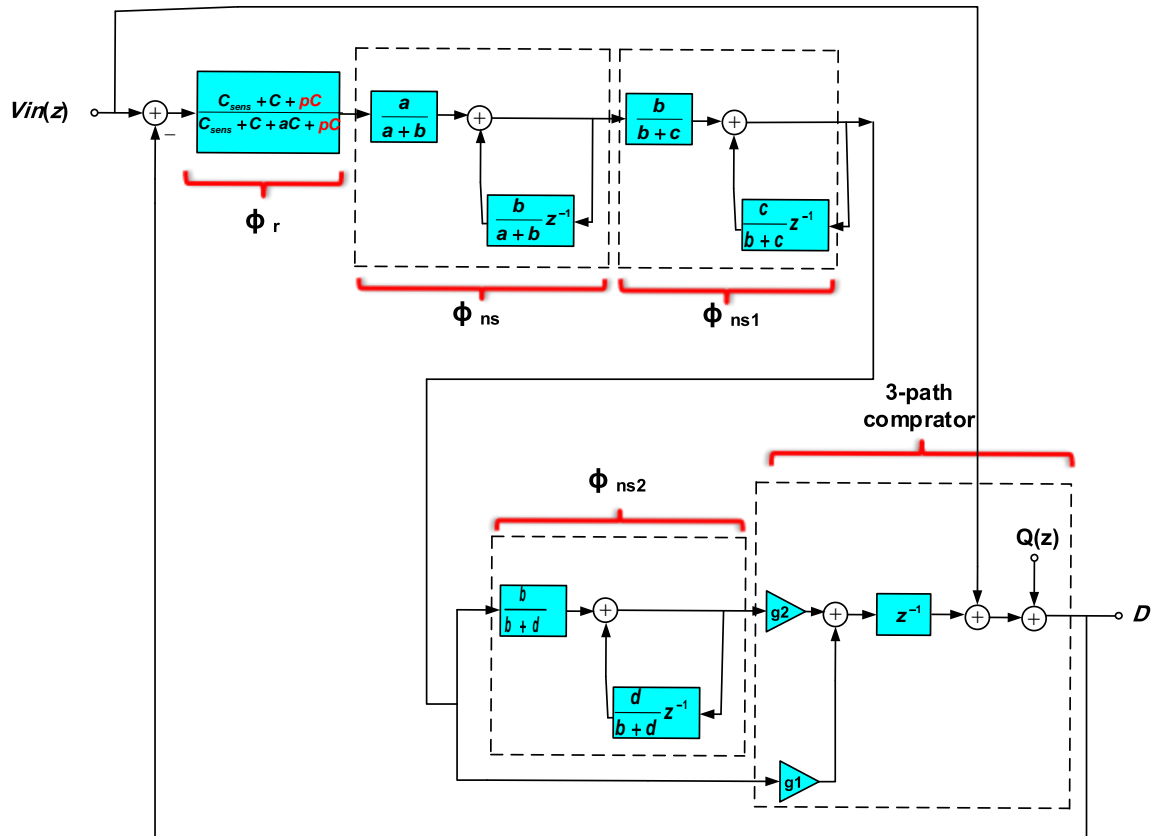
- [24] S. Oh, W. Jung, K. Yang, D. Blaauw, and D. Sylvester, "15.4 b incremental sigma-delta capacitance-to-digital converter with zoom-in 9b asynchronous SAR," in *VLSI Circuits Digest of Technical Papers, 2014 Symposium on*, pp. 1-2, 2014.
- [25] H. Ha, D. Sylvester, D. Blaauw, and J.-Y. Sim, "12.6 A 160nW 63.9 fJ/conversion-step capacitance-to-digital converter for ultra-low-power wireless sensor nodes," in *Solid-State Circuits Conference Digest of Technical Papers (ISSCC), 2014 IEEE International*, pp. 220-221, 2014.
- [26] A. Alhoshany, H. Omran, and K. N. Salama, "A 45.8 fJ/Step, energy-efficient, differential SAR capacitance-to-digital converter for capacitive pressure sensing," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 245, pp. 10-18, 2016.
- [27] J. A. Fredenburg and M. P. Flynn, "A 90-MS/s 11-MHz-Bandwidth 62-dB SNDR Noise-Shaping SAR ADC," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 12, pp. 2898-2904, 2012.
- [28] Z. Chen, M. Miyahara, and A. Matsuzawa, "A 9.35-ENOB, 14.8 fJ/conv.-step fully-passive noise-shaping SAR ADC," *IEICE Transactions on Electronics*, vol. 99, no. 8, pp. 963-973, 2016.
- [29] R. Inanlou, M. Shahghasemi, and M. Yavari, "A noise-shaping SAR ADC for energy limited applications in 90 nm CMOS technology," *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 77, no. 2, pp. 257-269, 2013.
- [30] Y.-Z. Lin, C.-H. Tsai, S.-C. Tsou, R.-X. Chu, and C.-H. Lu, "A 2.4-mW 25-MHz BW 300-MS/s passive noise shaping SAR ADC with noise quantizer technique in 14-nm CMOS," in *2017 Symposium on VLSI Circuits*, pp. C234-C235, 2017.
- [31] Z. Dai, H. Hu, Y. Chen, F. Ye, and J. Ren, "A 12-Bit ENOB 8MHz BW Noise-Shaping SAR ADC Using High-Speed Switches," in *2018 IEEE 61st International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, pp. 392-395, 2018.
- [32] S. Li, B. Qiao, M. Gandara, D. Z. Pan, and N. Sun, "A 13-ENOB Second-Order Noise-Shaping SAR ADC Realizing Optimized NTF Zeros Using the Error-Feedback Structure," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 53, no. 12, pp. 3484-3496, 2018.
- [33] W. Guo, H. Zhuang, and N. Sun, "A 13b-ENOB 173dB-FoM 2 nd-order NS SAR ADC with passive integrators," in *VLSI Circuits, 2017 Symposium on*, pp. C236-C237, 2017.
- [34] H. Jeon, "Low-power high-speed low-offset fully dynamic CMOS latched comparator," 2010.

- [35] T. O. Anderson, "Optimum control logic for successive approximation analog-to-digital converters," *Comput. Des.*, vol. 11, no. 7, pp. 81-86, 1972.
- [36] A. Rossi and G. Fucili, "Nonredundant successive approximation register for A/D converters," *Electronics letters*, vol. 32, no. 12, pp. 1055-1057, 1996.
- [37] S. T. Oskuii, "Comparative study on low-power high-performance flip-flops," ed: Institutionen for systemteknik, 2004.
- [38] M. yavari, "Low-Voltage High-Performance Sigma Delta Modulators for Broadband Applications," Ph.D Thesis, University Tehran, 2006.
- [39] Z. Tan, S. H. Shalmany, G. C. Meijer, and M. A. Pertijs, "An energy-efficient 15-bit capacitive-sensor interface based on period modulation," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 47, no. 7, pp. 1703-1711, 2012.
- [40] J. Sanjurjo, E. Prefasi, C. Buffa, and R. Gaggl, "An energy-efficient 17-bit noise-shaping dual-slope capacitance-to-digital converter for MEMS sensors," in *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*, pp. 389-392, 2016.
- [41] Y. He, Z.-y. Chang, L. Pakula, S. H. Shalmany, and M. Pertijs, "27.7 A 0.05 mm² 1V capacitance-to-digital converter based on period modulation," in *Solid-State Circuits Conference-(ISSCC), 2015 IEEE International*, pp. 1-3, 2015.

پیوست الف

برای بدست آوردن تابع تبدیل NTF کافی است تابع تبدیل نسبت خروجی به خطای کوانتیزاسیون

را از روی بلوک دیاگرام سیستمی مدار بدست آوریم. برای این کار از روش میسون استفاده می کنیم



شکل (۱-۶): بلوک دیاگرام سیستمی مدار مبدل پیشنهادی

فرمول میسون :

$$G = \frac{y_{out}}{y_{in}} = \frac{D(z)}{M(z)} = \frac{\sum_{k=1}^N P_k \Delta_k}{\Delta} \quad (1-6)$$

با توجه به بلوک دیاگرام تنها مسیر ورودی به خروجی (با فرض ورودی Q) P_1 است.

$$P_1 = 1 \quad (۲-۶)$$

برای بدست آوردن دترمینان گراف Δ ابتدا تمام حلقه ها را بدست می آوریم.

$$L_1 = \frac{b}{a+b} z^{-1} \quad ; \quad L_2 = \frac{c}{b+c} z^{-1} \quad ; \quad L_3 = \frac{d}{b+d} z^{-1} \quad (۳-۶)$$

$$L_4 = -\frac{C_{sens} + C + pC}{C_{sens} + C + pC + aC} \cdot \frac{a}{a+b} \cdot \frac{b}{b+c} \cdot \frac{b}{b+d} \cdot g_2 \cdot z^{-1}$$

$$L_5 = -\frac{C_{sens} + C + pC}{C_{sens} + C + pC + aC} \cdot \frac{a}{a+b} \cdot \frac{b}{b+c} \cdot g_1 \cdot z^{-1}$$

با توجه حلقه های موجود دترمینان گراف Δ به صورت زیر بدست می آید :

$$\Delta = 1 - L_1 - L_2 - L_3 - L_4 - L_5 + L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3 + L_3 L_5 - L_1 L_2 L_3 \quad (۴-۶)$$

با جایگذاری و مرتب سازی روابط بالا، مخرج تابع تبدیل NTF به صورت زیر بدست می آید :

$$M(z) = 1 - \left(\frac{b}{a+b} + \frac{c}{b+c} + \frac{d}{b+d} \right) z^{-1} \quad (۵-۶)$$

$$- \left(\frac{(C_{sens} + C + pC) abg_1}{(aC + C_{sens} + C + pC)(a+b)(b+c)} \right) z^{-1}$$

$$- \left(\frac{(C_{sens} + C + pC) ab^2 g_2}{(aC + C_{sens} + C + pC)(a+b)(b+c)(b+d)} \right) z^{-1}$$

$$+ \left(\frac{bc}{(a+b)(b+c)} + \frac{bd}{(a+b)(b+d)} + \frac{cd}{(b+c)(b+d)} \right) z^{-2}$$

$$- \left(\frac{(C_{sens} + C + pC) abdg_1}{(aC + C_{sens} + C + pC)(a+b)(b+c)(b+d)} \right) z^{-2}$$

$$- \frac{bcd}{(a+b)(b+c)(b+d)} z^{-3}$$

برای بدست آوردن صورت تابع تبدیل NTF نیز کافی است گره هایی که با مسیر P_1 در تلاقی است

حذف کرده و دترمینان گراف Δ_k بدست آمده را در مسیر مفروض ضرب کرد.

$$\begin{aligned}
D(z) = P_1 \Delta_1 = & 1 - L_1 - L_2 - L_3 + L_1 L_2 + L_1 L_3 + L_2 L_3 - L_1 L_2 L_3 \\
& 1 + \left(\frac{bc}{(a+b)(b+c)} + \frac{bd}{(a+b)(b+d)} + \frac{cd}{(b+c)(b+d)} \right) z^{-2} \\
& - \left(\frac{b}{a+b} + \frac{c}{b+c} + \frac{d}{b+d} \right) z^{-1} - \frac{bcd}{(a+b)(b+c)(b+d)} z^{-3}
\end{aligned} \tag{8-9}$$

Abstract

Energy efficiency is a key requirement for wireless sensor nodes, biomedical implants, and wearable devices. The energy consumption of the sensor node needs to be minimized to avoid battery replacement, or even better, to enable the device to survive on energy harvested from the ambient. Capacitive sensors do not consume static power; thus, they are attractive from an energy efficiency perspective. In addition, they can be employed in a wide range of sensing applications. However, the sensor readout circuit—i.e., the capacitance-to-digital converter (CDC)—can be the dominant source of energy consumption in the system. Thus, the development of energy-efficient CDCs is crucial to minimizing the energy consumption of capacitive sensor nodes.

In this thesis, a capacitance to digital converter (CDC) is designed and simulated based on a SAR structure that can shape the noise. Noise shaping in analog to digital converters results in increasing the resolution. Noise shaping in a SAR analog to digital converter can be performed in both active and passive methods, but in this thesis, the passive method has been used. In this method, by using a suitable capacitive filter, the residual voltage of the previous sample transformer is reassigned to the new sample conversion, which increases the accuracy of the converter.

The reason for choosing the passive structure is that in this method, there is no need of using an amplifier and this leads to a better energy efficiency. As the filter coefficients in the proposed structure depend on the ratio of the capacitors, the mismatch between the capacitors has no effect in noise shaping. Matlab has been used for the system level design and the simulations in circuit level have been done by using Cadence in TSMC CMOS 0.18 μ m technology. The figure of merit for the designed converter is 231 fJ/step.

With a sampling frequency of $F_s = 666.67$ kS/S and an over sampling ratio of 8, the obtained resolution is 11.19 bit and the absolute resolution is equal to 633 aF. The power consumption of the designed converter is 45 μ W and the dynamic range is equal to 5.12 pF.

Key Words: Analog-to-Digital Converter, NS-SAR, Capacitance-to-Digital Converter, Capacitive Sensor, Noise-Shaping



**Amirkabir University of Technology
(Tehran Polytechnic)**

Electrical Engineering Department

MSc Thesis

**NS-SAR in Direct Capacitance-to-Digital Conversion
for Capacitive Sensors**

**By
Ali Mohammad Rahmani**

**Supervisor
Dr. M Yavari**

Feb 2019