دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه

جهت اخذ درجه‌ی کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق-گرایش الکترونیک

عنوان

طراحی بلوک مقایسه کننده یک مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR با توان مصرفی پایین برای شبکه های حسگر بی سیم

استادان راهنما

دکتر جعفر صبحی

دکتر قادر کریمیان

استاد مشاور

دکتر ضیاء الدین دایی کوزه کنانی

پژوهشگر

سهند محرمی

بهمن ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

نام خانوادگی دانشجو: محرمی **نام:** سهند
عنوان پایان نامه: طراحی بلوک مقایسه کننده یک مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR با توان مصرفی پایین برای شبکه های حسگر بی سیم.
اساتید راهنما: دکتر جعفر صبحی ، دکتر قادر کریمیان استاد مشاور: دکتر ضیاء الدین دایی کوزه کنانی
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی برق **گروه:** الکترونیک **دانشگاه:** تبریز **دانشکده:** مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ التحصیلی:** بهمن ۱۳۹۰ **تعداد صفحه:** ۱۰۷
کلید واژه‌ها: شبکه حسگر بی سیم (wireless sensor network)، مبدل آنالوگ به دیجیتال (analog to digital converter) ، CMOS، نویز، خطینگی.

چکیده :

شبکه حسگر بی سیم به یک شبکه از حسگر های خود راهبر گفته می شود که با فاصله پخش شده اند، و برای اندازه گیری گروهی برخی از کمیت های فیزیکی با شرایط محیطی مانند دما، صدا، رطوبت و ...در مکان های مختلف یک محدوده کاربرد دارند. شبکه های حسگر با انگیزه ی استفاده در کاربرد های نظامی مانند نظارت بر میدان جنگ توسعه پیدا کرده اند. در ضمن از این شبکه ها در نظارت و کنترل فرایند های صنعتی، نظارت بر محیط و خانه و کارهای پزشکی استفاده می شود. بلوک های تشکیل دهنده ی این شبکه حسگر عبارتند از: سنسور، مبدل آنالوگ به دیجیتال، واحد کنترل میکرو و بخشRF. از آنجائیکه این سیستم ها بی سیم هستند، بنابراین نیاز به طراحی بلوک هایی با توان مصرفی پایین می باشد. بنابراین مهمترین مشخصه مربوط به مبدل آنالوگ به دیجیتال به کار رفته در این شبکه مربوط به توان مصرفی آن می باشد. از این رو یکی از چالش ها در طراحی شبکه های حسگر بی سیم، طراحی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال با توان مصرفی پایین می باشد.

هدف از این پایان نامه طراحی بلوک مقایسه کننده مربوط به یک مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR با توان مصرفی پایین می باشد. تکنولوژی مورد استفاده برای طراحی0.18um CMOS می باشد.

فهرست مطالب:

۱) مروری بر گذشته..... ٦

۱-۱) ساختار انواع مبدل های آنالوگ به دیجیتال و مقایسه آنها [2]:..... ٦

۱-۲) مقایسه ساختارها [2]:..... ۷

۱-۲-۱) مبدل FLASH : ۷

۱-۲-۲) مبدل SAR:..... ۸

۱-۲-۳) مبدل SIGMA DELTA : ۹

۱-۲-٤) مبدل FOLDING AND INTERPOLATING :..... ۹

۱-۲-۵) مبدل های PIPELINED : ۱۰

۱-۳) دلیل انتخاب مبدل SAR برای بخش مبدل آنالوگ به دیجیتال شبکه های حسگر بی سیم[2] : ۱۲

۱-٤) ساختار SAR از چهار بلوک اصلی تشکیل یافته است : [2]..... ۱۲

۱-۵) مدل رفتاری [2]، [3]:..... ۱٤

۱-۵-۱) پارامترهای مبدل آنالوگ به دیجیتال [2]:..... ۱٤

۱-۵-۲) یکنواختی [3]: ۱٤

۱-۵-۳) ناپایداری سیگنال کلاک [3]: ۱۵

۱-۵-٤) نویز [2]، [3]: ۱٦

۱-۵-۵) نرخ خطای بیت [3]:..... ۱۸

۱-۵-٦) ضریب استحقاق [3]: ۱۸
۱-۵-۷) غیر خطینگی [2]، [3]: ۱۹
۱-۵-۸) خطای غیرخطی تفاضلی [2]: ۱۹
۱-۵-۹) خطای غیر خطی جمع شونده [2]: ۲۰
۱-۵-۱۰) نسبت سیگنال به نویز [2]: ۲۱
۱-۵-۱۱) SFDR [2]: ۲۲
۱-۵-۱۲) نسبت سیگنال به نویز +اعوجاج [2]: ۲۲
۱-۵-۱۳) تعداد بیت موثر [2]: ۲۲
۱-۵-۱٤) خطای بهره و خطای انحراف [3]: ۲۳
۱-۵-۱۵) نرخ نمونه برداری [2]: ۲٤

۱-٦) ساختار دیفرانسیلی و ساختار تک خروجی [2]: ۲٤

۲) ملاحظات ساختار: ۲۷

۲-۱) مزایا و معایب ساختار های مبدل از نظر پیاده سازی [2]: ۲۷

۲-۲) مقایسه کننده ها [4]، [5]: ۲۸

۲-۲-۱) ساختار کلی [5]: ۲۸
۲-۲-۲) ملاحظات طراحی مقایسه کننده های ولتاژ [5]: ۲۹

۲-۳) انواع ساختارهای مقایسه کننده [4]: ۳۱

۲-۳-۱) مقایسه کننده های حلقه باز [4]: ۳۱
۲-۳-۲) مقایسه کننده های latched با پیش تقویت کننده [4]: ۳۲
۲-۳-۳) مقایسه‌کننده‌های latch شده تمام دینامیکی [5]: ۳٤
۲-۳-٤) مقایسه‌کننده زوج دیفرانسیلی از نوع latch و voltage sa [5]: ۳٦

۲-۳-۵) ترانزیستورهای latch شده دینامیکی double-tail [5]: ۳۸

۲-٤) مدارات نمونه‌بردار و نگه‌دار CMOS [6]: ٤۰

۲-٤-۱) مقدمه: ٤۰

۲-٤-۲) نشت بار وclock feedtrough [6]: ٤۱

۲-۵) انواع ساختارهای مدارات نمونه‌گیر و نگه‌دار [5]: ٤۳

۲-۵-۱) ساختارهای مرسوم حلقه‌باز [5]: ٤٤

۲-۵-۲) ساختارهای حلقه بسته متداول [5]: ٤٦

۲-۵-۳) ساختار حلقه باز با خازن میلر [5]: ٤۹

۲-٦) مدارات نمونه گیر و نگه دار با ساختار های کاهش خطاهای بحث شده [6]: ۵۱

۲-٦-۱) نمونه‌برداری سری (متناوب) [6]: ۵۱

۲-٦-۲) مدارات S/H بر اساس آپ-امپ‌های سوئیچ شده [6]: ۵۲

۲-٦-۳) مدار نمونه‌بردار و نگه‌دار bottom-plate با سوئیچ خودراه انداز [6]: ۵۵

۲-۷) بخش های تشکیل دهنده مبدل طراحی شده و تحلیل کارکرد آنها: ۵۸

۲-۷-۱) سوئیچ خودراه انداز [7]: ۵۸

۲-۷-۲) مقایسه‌کننده دینامیکی latchشده [4]: ٦۲

۲-۷-۳) آنالیز ولتاژ آفست مقایسه‌کننده دینامیکی [4]: ٦۳

۲-۷-٤) نحوه کار مدار ما: ۷۳

۲-۷-۵) روش های سوئیچ زنی در منابع استفاده شده در تهیه این پایان نامه [8]، [9]، [10]: ۸۸

۳) مقدمه: ۹۷

۳-۱) نتایج تست مبدل: ۹۷

۳-۲) پیشنهادات: ۱۰٤

٤) منابع: ۱۰٦

فهرست اشکال:

شکل ۱-۱ کوانتیزاسیون ٦

شکل ۱-۲ ساختار مبدلFLASH ۷

شکل ۱-۳ ساختار مبدلSAR ۸

شکل ۱-٤ ساختار مبدلSIGMA DELTA ۹

شکل ۱-۵ ساختار مبدل FOLDING ۱۰

شکل ۱-٦ ساختار مبدلPIPELINED ۱۱

شکل ۱-۷ مبدل SAR ۱۲

شکل ۱-۸ طرز کار مبدل SAR ۱٤

شکل ۱-۹ یکنواختی ۱۵

شکل ۱-۱۰ ناپایداری سیگنال کلاک ۱٦

شکل ۱-۱۱ مدار نمونه بردار و مدل نویز آن و طیف فرکانسی ساختار ۱۷

شکل ۱-۱۲ خطای غیر خطی جمع شونده وخطای غیرخطی تفاضلی ۱۹

شکل ۱-۱۳ طیف فرکانسی خطا های غیر خطی و نحوه از دست دادن کد خروجی ۲۰

شکل ۱-۱٤ روش های مشخص کردن خطای غیر خطی جمع شونده ۲۱

شکل ۱-۱۵ خطای بهره و خطای آفست ۲۳

شکل ۱-۱٦ مقایسه ساختار تک خروجی و ساختار تفاضلی ۲۵

شکل ۲-۱ مقایسه مبدل ها براساس سرعت و دقت نمونه برداری ۲۷

شکل ۲-۲ نماد مداری یک مقایسه کننده ایده آل و پاسخ ایده آل و واقعی آن ۲۹

شکل ۲-۳ مقایسه کننده حلقه باز ۳۱

شکل ۲-٤ مقایسه کننده latched با پیش تقویت کننده ۳۲

شکل ۲-۵ مقایسه‌کننده مقسم مقاومتی (مقایسه‌کننده لوئیس-گری) ۳٤

شکل ۲-٦ مقایسه‌کننده زوج دیفرانسیلی از نوع latch و voltage sa ۳٦

شکل ۲-۷ مقایسه‌کننده های latch شده دینامیکی double-tail ۳۸

شکل ۲-۸ مدار نمونه‌گیر و نگه‌دار تحقق یافته با ترانزیستورMOS ٤۱

شکل ۲-۹ نشت بار از کانال ترانزیستورMOS ٤۲

شکل ۲-۱۰ مدار نمونه گیر حلقه باز ٤٤

شکل ۲-۱۱ مدار نمونه گیر حلقه بسته ٤٦

شکل ۲-۱۲ مدار نمونه گیر حلقه بسته ارتقا یافته ٤۷

شکل ۲-۱۳ مدار نمونه گیر حلقه باز با خازن میلر ٤۹

شکل ۲-۱٤ مدار نمونه بردار سری ۵۱

شکل ۲-۱۵ مدارنمونه گیر بر اساس آپ-امپ‌های سوئیچ شده ۵۳

شکل ۲-۱٦ تحقق ترانزیستوری مدارنمونه گیر بر اساس آپ-امپ‌های سوئیچ شده ۵٤

شکل ۲-۱۷ مدارنمونه گیر بر اساس آپ-امپ‌های سوئیچ شده در حالت تفاضلی ۵۵

شکل ۲-۱۸ مدار نمونه‌بردار و نگه‌دار bottom-plate با سوئیچ خودراه انداز ۵۵

شکل ۲-۱۹ سوئیچ Boot Straped ۵٦

شکل ۲-۲۰ نحوه عملکرد سوئیچ خودراه انداز بکار رفته در مبدل ٦۰

شکل ۲-۲۱ تحقق ترانزیستوری سوئیچ خودراه انداز بکار رفته در مبدل ٦١

شکل ۲-۲۲ مقایسه کننده دینامیکی latchشده بکار رفته در مبدل ٦٢

شکل ۲-۲۳ طبقه ورودی مقایسه کننده بکار رفته در مبدل ٦٤

شکل ۲-۲٤ طبقه خروجی مبدل بکار رفته در مبدل ٧٠

شکل ۲-۲۵ شکل کلی DAC بکار رفته در مبدل ٧٣

شکل ۲-۲٦ فاز نمونه برداری مبدل ٧٤

شکل ۲-۲۷ فاز اعمال ولتاژ تغذیه به عنوان ولتاژ رفرنس با استفاده از ترانزیستور های (C+,C-) ٧٥

شکل ۲-۲۸ اعمال نتیجه ی مقایسه اول به DAC (Vin2<Vin1) ٧٦

شکل ۲-۲۹ اعمال نتیجه ی مقایسه دوم بهDAC (Vin2<Vin1) ٧٧

شکل ۲-۳۰ اعمال نتیجه مقایسه اول به DAC در شرایط(Vin1<Vin2) ٧٨

شکل ۲-۳۱ سیگنال های کنترلی مورد نیاز برای اعمال نتیجه ی مقایسه به DAC ٧٩

شکل ۲-۳۲ سیگنال های کلاک اعمال شده به مقایسه کننده و بخش SAR ٨٠

شکل ۲-۳۳ بخش SAR مدار(تولید و اعمال سیگنال های کنترلی به قسمت های مختلف مبدل) ٨٢

شکل ۲-۳٤ بخش ترکیب و تولید سیگنال های کنترلی بخش مثبت DAC ٨٥

شکل ۲-۳۵ بخش ترکیب و تولید سیگنال های کنترلی بخش منفی DAC ٨٦

شکل ۲-۳٦ اعمال سیگنال های کنترلی به DAC ٨٧

شکل ۲-۳۷ روش سوئیچ زنی متداول در مبدل های SAR ٨٩

شکل ۲-۳۸ روش سوئیچ زنی در مبدل رفرنس [8] ٩٠

شکل ۲-۳۹ روش سوئیچ زنی در مبدل رفرنس [9] ٩١

شکل ۲-٤٠ نماد مداری و تحقق ترانزیستوری گیت معکوس کننده(NOT) ٩٢

شکل ۲-٤۱ نماد مداری و تحقق ترانزیستوری گیت (NAND) ۹۳

شکل ۲-٤۲ سلول تاخیر ۹٤

شکل ۳-۱ بازسازی خروجی مبدل با استفاده از DAC ایده آل ۹۷

شکل ۳-۲ شکل موج شبیه سازی شده با DAC ایده آل برای گره خروجی در٦٤ نمونه ۹۸

شکل ۳-۳ شکل موج شبیه سازی شده با DAC ایده آل برای گره خروجی در٦٤ نمونه(ترکیب ورودی و خروجی) ۹۸

شکل ۳-٤ تحلیل فوریه ولتاژ گره خروجی در٦٤ نمونه ۹۹

شکل ۳-۵ تحلیل فوریه در گوشهFF ۱۰۰

شکل ۳-٦ تحلیل فوریه در گوشهSS ۱۰۰

شکل ۳-۷ شکل موج شبیه سازی شده با DAC ایده آل برای گره خروجی در۱۰۲٤ نمونه ۱۰۱

شکل ۳-۸ شکل موج شبیه سازی شده با DAC ایده آل برای گره خروجی در۱۰۲٤ نمونه(بزرگ شده در یک نیم سیکل) ۱۰۱

شکل ۳-۹ تحلیل فوریه ولتاژ گره خروجی در۱۰۲٤نمونه ۱۰۲

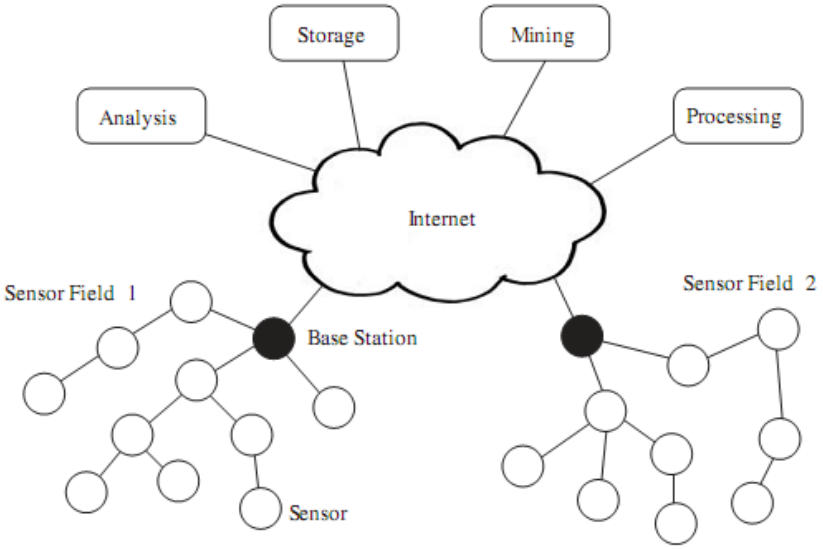
پیشگفتار

شبکه های حسگر بی سیم [1]:

در حالی که بسیاری از سنسورها به طور مستقیم به کنترل کننده ها و ایستگاه های پردازنده وصل می شوند(به طور مثال با استفاده از شبکه های محلی)تعداد فزاینده ای از سنسورها اطلاعات جمع آوری شده را بصورت بی سیم به یک ایستگاه پردازنده مرکزی می فرستند.این نکته از آن جا حایز اهمیت است که بسیاری از کاربرد های شبکه ای به صدها و هزاران گره سنسوری نیازمند است که اغلب در مناطق دوردست و غیرقابل دسترس هستند.بنابراین یک سنسور بی سیم نه تنها دارای یک بخش حسگر است،بلکه هم چنین دارای یک پردازنده(on board) ،بخش ارتباطات و قابلیت ذخیره سازی است.با این پیشرفت،یک گره سنسوری نه تنها مسئول جمع آوری اطلاعات،بلکه هم چنین مسئول تجزیه تحلیل شبکه،ارتباط و ترکیب داده های حسگر و داده های حسگرهای دیگر می باشد.زمانی که تعداد زیادی از سنسورها به صورت هماهنگ با هم یک محیط فیزیکی بزرگ را نظارت می کنند یک شبکه حسگر بی سیم[1] را تشکیل می دهند.گره های سنسوری نه تنها با همدیگر ارتباط برقرار می کنند بلکه با استفاده از رادیوهای بی سیم خود با یک ایستگاه مرکزی نیز ارتباط برقرار می کنند که به آنها اجازه انتشار داده های سنسورشان را به منظور پردازش از راه دور،تجسم،آنالیز،و سیستم های ذخیره سازی را می دهد.

1. WSN

به عنوان مثال شکل ۱ دو محدوده سنسوری را نشان می دهد که به دو محدوده جغرافیایی مختلف نظارت می کنند.و از طریق اینترنت به ایستگاه مرکزی متصل می شوند.



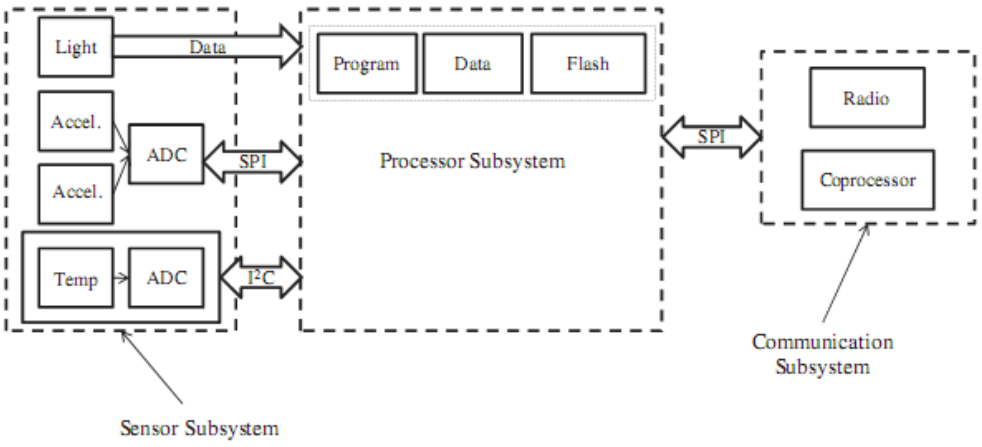
شکل۱ دو محدوده سنسوری مجزا

قابلیت های گره های سنسوری در یک شبکه حسگر بی سیم بطور گسترده ای می تواند متفاوت باشد.مثلا گره های سنسوری ساده ممکن است یک پدیده فیزیکی مجزا را نظارت کنند،در حالی که دستگاه های پیچیده تر ممکن است انواع تکنیک های سنجش(آکوستیک،نوری،مغناطیسی) را ترکیب نمایند.آنها هم چنین ممکن است در قابلیت های ارتباطی خود نیز متفاوت باشند.به عنوان مثال با استفاده از الترا سوند،مادون قرمز،یا فرکانس رادیویی با نرخ داده و زمان نهفتگی متفاوت با مرکز ارتباط برقرار کنند..در حالی که سنسور های ساده ممکن است تنها اطلاعات محیط مورد مشاهده را جمع آوری و ارسال کنند،دستگاه های قدرتمند،مثلا دستگاه هایی با قابلیت های بالای پردازش ،انرژی و ذخیره سازی ممکن است پردازش های گران قیمت و توابع تجمعی انجام دهند.چنین دستگاه هایی معمولا مسئولیت های

اضافی در یک شبکه حسگر بی سیم (به عنوان مثال تشکیل دهنده ستون فقرات ارتباطات شبکه)که توسط دستگاه های حسگر منابع محدود دیگر برای رسیدن به مثلا ایستگاه پایه انجام دهند.در نهایت برخی دستگاه ها ممکن است دارای فناوری های جانبی اضافی باشند.(به عنوان مثال دارای سیستم GPS). که به آنها اجازه می دهد موقعیت شان را به طور دقیق مشخص کنند.با این حال چنین سیستم هایی معمولا توان خیلی زیادی را مصرف می کنندتا در یک شبکه حسگر بی سیم قابلیت تحقق داشته باشند.

ساختار گره[1] :

گره های حسگر بی سیم عنصر مرکزی در شیکه حسگر بی سیم می باشند.از طریق این گره است که سنجش،پردازش،و ارتباطات انجام می گیرد.این گره اطلاعات را ذخیره می کند و پروتکل های ارتباطی و الگورریتم های پردازش اطلاعات را پیاده سازی می کند.کیفیت،اندازه،و فرکانس اطلاعات سنجش شده می تواند از شبکه استخراج شود و واین پارامترها تحت تاثیر منابع فیزیکی در دسترس گره هستند.بنابراین طراحی و پیاده سازی یک گره حسگر بی سیم یک گام مهم می باشد.هر گره از اجزا سنجش،پردازش،ارتباطات و زیر سیستم های تامین توان تشکیل یافته است(همانند شکل زیر)



شکل۲ گره سنسوری

در چند سال گذشته بسیاری از وسایل وقطعات الکترونیکی با توجه ویژه ای نسبت به توان مصرفی آنها طراحی و ساخته شده اند.برای سیستم های الکترونیکی نظیر سیستم های بی سیم و یا دستگاه های کاشت(در کاربرد های پزشکی,نظامی...) مصرف توان یکی از بحرانی ترین بخش های طراحی می‌باشد.محدودیت هایی که در مورد مصرف توان داریم پیشرفت های روز افزون در تکنیک های طراحی مدارت با منابع ولتاژ و توان مصرفی کم را می طلبد.

مبدل های آنالوگ به دیجیتال مقادیر آنالوگ و پیوسته را به مقادیر گسسته عددی که در پردازش اطلاعات,انتقال اطلاعات و سیستم های کنترل کاربرد دارند تبدیل میکنند.برای طراحی مدارت با توان مصرفی پایین مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال عناصری کلیدی هستند.در این پایان نامه هدف طراحی یک مبدل آنالوگ به دیجیتال SAR با توان مصرفی بسیار پایین می‌باشد که به همراه مدارت جانبی،با تاکید روی بخش مقایسه کننده آن توضیح داده خواهد شد.هدف رسیدن به یک مبدل SAR با وضوح ۱۰بیت,سرعت

۲۵۰ KHZو توان مصرفی پایین تر از100uw می‌باشد.

فصل اول

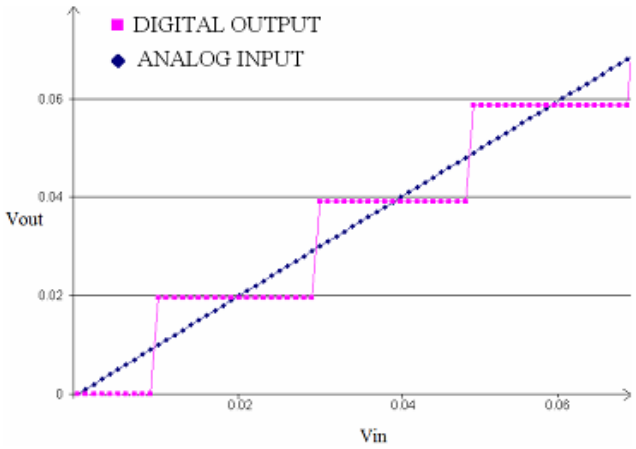
پیشینه تحقیق

۱) مروری بر گذشته

۱-۱) ساختار انواع مبدل های آنالوگ به دیجیتال و مقایسه آنها [2]:

مبدل آنالوگ به دیجیتال یک مدار الکترونیکی است که یک سیگنال پیوسته آنالوگ را به مقادیر گسسته تبدیل می کند.یک سیگنال آنالوگ برای تبدیل شدن به یک مقدار دیجیتال باید ابتدا کوانتیزه شود.سیگنال آنالوگ می تواند مقادیر نامحدودی را اختیار کند.کوانتیزاسیون عمل تبدیل مقادیر نامحدود به مقادیر گسسته و محدود می باشد.

در شکل (۱-۱)عمل کوانتیزاسیون نشان داده شده است.دامنه سیگنال آنالوگ ورودی بین ۰ و بیشترین مقدار دامنه ورودی بصورت پیوسته تغییر می کند و در خروجی به صورت یک عدد دیجیتالیN بیتی ظاهر می شود.



شکل ۱-۱ کوانتیزاسیون

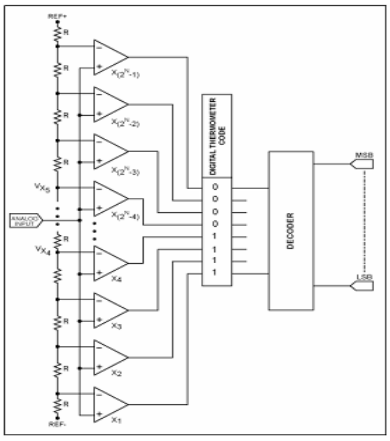
وضوح مبدل تعداد سطوح مجزایی است که می تواند در خروجی تولید کند.وضوح براساس بیت سنجیده می شود.مثلا اگرNبیت وضوح داشته باشیم، 2^N سطح خروجی گسسته میتواند از هم تفکیک شود.هم چنین وضوح براساس کم ترین مقدار آنالوگ که باعث تغییر سطح مقدار دیجیتال خروجی می شود تعریف می گردد.(LSB)

۱-۲) مقایسه ساختارها [2]:

در طراحی مبدل های آنالوگ به دیجیتال بده بستان[1] بین سرعت مبدل و توان مصرفی آن بسیار مهم می باشد.

۱-۲-۱) مبدل FLASH :

ساختارFLASH ADC(شکل۱-۲)که گاهی ساختار مبدل موازی نیز نامیده می شود،سریع ترین نوع مبدل آنالوگ به دیجیتال می باشد.اما این ساختار از نظر وضوح محدود می باشد و هم چنین توان مصرفی بالایی نیز دارد.مساحت مورد نیاز برای پیاده سازی این نوع مبدل نیز نسبتا بزرگ می باشد.



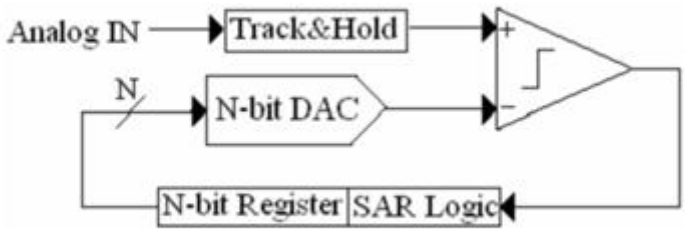
شکل ۱-۲ ساختار مبدلFLASH

[1].trade off

دلیل اصلی بالا بودن توان مصرفی این نوع مبدل در مقایسه با ساختارهای دیگر به کار بردن تعداد بالای مقایسه کننده ها در ساختار آن می باشد.برای تحقق یک مبدلN، FLASH ADC بیتی ما به $(2^N - 1)$ مقایسه کننده نیاز داریم و این نشان می دهد تعداد مقایسه کننده ها با افزایش وضوح مبدل به طور نمایی افزایش می یابد.بخش مقایسه کننده یکی از اصلی ترین مصرف کنندگان توان در مبدل ها می باشد.برای کاهش توان مصرفی باید روی ساختارهایی که تعداد مقایسه کننده های آن پایین تر است تمرکز کنیم.

۱-۲-۲) مبدل SAR:

مبدل SAR (شکل۱-۳)برای وضوح های متوسط و بالا بهترین گزینه از نظر توان مصرفی می باشد.این ساختار به تنها۱مقایسه کننده نیاز دارد.یک مبدل N، SAR بیتی دارایN دوره مقایسه می باشد و تا تکمیل۱مرحله مقایسه آماده ورود به مرحله بعد نمی شود.این ساختار دارای کم ترین توان مصرفی می باشد،اما سرعت نمونه برداری آن نیز پایین می باشد.



شکل ۱-۳ ساختار مبدل SAR