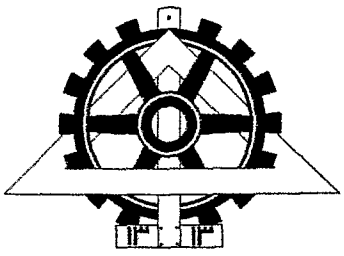
٤٤٠٨٢



# دانشگاه تهران

## دانشکده فنی

### گروه مهندسی برق و کامپیوتر


عنوان:

# مدولاتور دلتا – سیگمای میان‌گذر متعامد با پهنای باند وسیع و نسبت بیش نمونه‌برداری کم


از اطلاعات مرکز علمی ایران



## نگارش : محمد فرازیان

## استاد راهنما : دکتر امید شعاعی


پایان نامه جهت دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد

در رشتهٔ مهندسی برق - گرایش الکترونیک

شهریور ۱۳۸۲


۴۹۰۸۲

به نام خدا
دانشگاه تهران

**دانشکده فنی**
**گروه آموزشی مهندسی برق و کامپیوتر**

۱۳۸۳/۷/۲۰

**گواهی دفاع از پایان‌نامه کارشناسی ارشد**

هیات داوران پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای محمد فرازیان در رشته مهندسی برق و کامپیوتر گرایش الکترونیک با عنوان «مدولاتور دلتا – سیگمای میان‌گذر متعامد با پهنای باند وسیع و نسبت بیش نمونه‌برداری کم» را در تاریخ ۸۲/۶/۳

| | به عدد | به حروف |
|---|---|---|
| نمره نهایی پایان‌نامه : | ۱۹/ | نوزده |

و درجه : عالی ارزیابی نمود.

| ردیف | مشخصات هیات داوران | نام و نام خانوادگی | مرتبه دانشگاهی | دانشگاه یا موسسه | امضاء |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | استاد راهنما<br>استاد راهنمای دوم (حسب مورد) : | دکتر امید شعاعی | دانشیار | تهران | |
| ۲ | استاد مشاور : | ـــــ | ـــــ | ـــــ | |
| ۳ | استاد مدعو :(یا استاد مشاور دوم) | دکتر علی افضلی‌کوشا<br>دکتر حمیدرضا شفیعی | دانشیار<br>استادیار | تهران<br>تهران | |
| ۴ | استاد مدعو (خارجی) : | دکتر شاهین حسابی | استادیار | شریف | |
| ۵ | نماینده کمیته تحصیلات تکمیلی گروه آموزشی : | دکتر ناصر معصومی | استادیار | تهران | |

تذکر : این برگه پس از تکمیل توسط هیات داوران در نخستین صفحه پایان‌نامه درج می‌گردد.

دانشکده فنی دانشگاه تهران
تحصیلات تکمیلی

**دانشکدهٔ فنی**

**گروه مهندسی برق و کامپیوتر**

**عنوان:**

# مدولاتور دلتا – سیگمای میان‌گذر متعامد با پهنای باند وسیع و نسبت بیش نمونه‌برداری کم

نگارش : محمد فرازیان

**پایان نامه جهت دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ**

**مهندسی برق - گرایش الکترونیک**

از این پایان نامه در تاریخ ۱۳۸۲/۶/۳ در مقابل هیأت داوران دفاع به عمل آمد

و مورد تصویب قرارگرفت.

معاونت تحصیلات تکمیلی دانشکدهٔ فنی: ..... دکتر جواد فیض

مدیر گروه آموزشی: ..... دکتر پرویز جبه دار مارالانی

سرپرست تحصیلات تکمیلی گروه: ..... دکتر حمیدرضا جمالی

عضو هیأت داوران: ..... دکتر علی افضلی کوشا

عضو هیأت داوران: ..... دکتر شاهین حسابی

عضو هیأت داوران: ..... دکتر حمیدرضا شفیعی

نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی: ..... دکتر ناصر معصومی

تقدیم به

# پدر و مادرم

بدینوسیله از پشتیبانی مرکز تحقیقات مخابرات ایران (ITRC) در
انجام این پایان نامهٔ کارشناسی ارشد مطابق قرارداد به
شمارهٔ ۵۰۰/۹۶۳۵ تشکر و قدردانی می شود.

از استاد گرامی جناب آقای دکتر امید شعاعی که در مدت انجام این پایان نامه هیچگونه کمک و راهنمایی را از این جانب دریغ ننمودند و با حوصلهٔ تمام مرا در انجام آن یاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

# چکیده

در این پایان نامه یک مدولاتور دلتا-سیگمای متعامد میان گذر با ساختاری کاملاً جدید طراحی شد که می تواند در حضور ۱٪ عدم تطابق بین دو مسیر متعامد سیگنال تصویر را ۵۶ dB تضعیف کند. از این رو می توان از آن در گیرنده های با فرکانس IF پایین، که در آنها نیاز به حذف تصویر زیاد می باشد، استفاده کرد. از ویژگیهای منحصر به فرد این ساختار اینست که می توان بهرهٔ خارج باند NTF را در آن بسیار زیادتر از ساختارهای متداول انتخاب کرد. این امر باعث می شود که با مرتبهٔ شکل دهی نویز پایین (۳) و نسبت بیش نمونه برداری بسیار کم (۸) بتوان به SNR برابر با ۸۳ dB رسید. کم بودن نسبت بیش نمونه برداری امکان کار با پهنای باند زیاد (بیش از ۱ MHz) را فراهم می کند. از سوی دیگر می توان از این مدولاتور دلتا-سیگما در گیرنده هایی که تحت چندین استاندارد مختلف کار می کنند استفاده کرد. کم بودن فرکانس نمونه برداری (به سبب کم بودن نسبت بیش نمونه برداری) همراه با ساختار تک حلقه ای مناسب باعث می شود تا این مدولاتور یک کاندیدای مناسب برای مصارف ولتاژ پایین و توان پایین باشد.

همچنین نسبت پخش ضرایب این ساختار در مقایسه با ساختارهای مشابه کم است که این امر از مشکلات عملی مربوط به ساخت می کاهد. همهٔ ضرایب دارای اندازه ای هستند که بتوان آنها را با تطابق کافی پیاده سازی کرد.

تداخل سیگنال تصویر بر اثر وجود عدم تطابق بین مسیرهای I و Q یک مشکل بزرگ در تحقق گیرنده‌های با فرکانس IF پایین می‌باشد. در این مدولاتور با استفاده از روشهای تطبیقی آثار مخرب عدم تطابق تا حدی جبران شده است. از سوی دیگر با استفاده از روشهای شکل دهی عدم تطابق و ساختارهای بهبود یافته، به حذف آثار ناشی از غیر خطی بودن DAC چند بیتی پرداخته شده است.

# فهرست مطالب


فصل اول: مقدمه و رئوس مطالب ..... ۱

۱-۱ رئوس مطالب ..... ۳

فصل دوم: ساختار گیرندهٔ رادیویی و پردازشهای بخش IF ..... ۵

۲-۱ ساختار گیرنده هترودایـن ..... ۶

۲-۲ گیرندهٔ همودایـن ..... ۸

۲-۳ گیرنده با فرکانس IF کم ..... ۱۱

۲-۴ مقایسهٔ گیرندهٔ همودایـن و گیرندهٔ با IF پایین ..... ۱۳

۲-۵ فیلترهای مختلط ..... ۱۳

۲-۶ نتیجه گیری ..... ۱۴

فصل سوم: مدولاسیون دلتا-سیگمای میان گذر متعامد ..... ۱۵

۳-۱ مبدلهای آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری نایکوییست ..... ۱۷

۳-۱-۱ نمونه‌برداری ..... ۱۸

۳-۱-۲ کوانتیزاسیون ..... ۱۹

۳-۱-۳ محدودیتهای ADCهای نرخ نایکوییست ..... ۲۰

۳-۲ مدولاسیون دلتا – سیگما (ΔΣ) ..... ۲۰

۳-۲-۱ مدولاتور دلتا – سیگمای پایین گذر ..... ۲۱

۳-۲-۲ شکل‌دهی نویز میان‌گذر ..... ۲۲

۳-۲-۲-۱ انتخاب فرکانس IF ..... ۲۳

۳-۲-۲-۲ تبدیل DC به fs/٤ ..... ۲۴

۳-۳ مدولاتور دلتا – سیگمای میان‌گذر متعامد ..... ۲۶

۳-۳-۱ تحقق قطبهای مختلط ..... ۲۹

۳-۳-۱-۱ روش مستقیم ..... ۲۹

۳-۳-۱-۲ روش بهبود یافته ..... ۳۰
۳-٤ جایگاه مدولاتور دلتا – سیگمای متعامد در گیرندهٔ IF ..... ۳۱
۳-٥ مقایسهٔ مدولاتورهای دلتا – سیگمای حقیقی و متعامد ..... ۳۴
۳-٥-۱ مزایای مدولاتورهای متعامد برای سیگنالهای مختلط ..... ۳۵
۳-٥-۲ کاهش اثر شکل‌دهی نویز به سبب وجود صفرهای مزدوج مختلط در NTF ..... ۳۷
۳-٥-۳ مدولاسیون ورودهای حقیقی ..... ۳۹
۳-٦ فیلتر ضدتداخل ..... ۴۱
۳-۷ فیلتر کردن به منظور کاهش نرخ در مدولاتور دلتا – سیگمای متعامد ..... ۴۲
فصل چهارم: اثرات غیر ایده آل ..... ٤٥
٤-۱ مشکل عدم تطابق در سیستمهای مختلط (I و Q) ..... ۴۵
٤-۲ گیرنده IF مختلط ..... ۴۶
٤-۲-۱ ساختار یک گیرندهٔ تک IF ..... ۴۶
٤-۲-۲ مشکلات ناشی از عدم تطابق ..... ۴۷
٤-۲-۲-۱ عدم تعادل در بهره وفاز ..... ۴۸
٤-۲-۲-۲ عدم تطابق بین ضرایب ..... ۵۰
٤-۲-۳ تداخل ..... ۵۴
٤-۳ نتیجه‌گیری ..... ۶۱
فصل پنجم: حذف عدم تطابق در سیستمهای متعامد ..... ٦۲
٥-۱ تنظیم کردن خارج خط ..... ۶۲
٥-۲ تبدیل هیلبرت ..... ۶۵
٥-۳ ساختار بهبود یافتهٔ مدولاتور دلتا - سیگما ..... ۶۵
٥-۴ روش تطبیقی حذف عدم تطابق بین مسیرهای I و Q ..... ۶۹
٥-٤-۱ سیستم تطبیقی حذف نویز ..... ۷۰
٥-٤-۲ مشکلات مدل کلاسیک ..... ۷۳
٥-٤-۳ مدل توسعه یافته ..... ۷۶
٥-٤-٤ الگوریتم توسعه یافته ..... ۷۸

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

۵-۴-۵ نتیجه گیری ..... ۷۹
فصل ششم: DAC چند بیتی و مشکلات آن ..... ۸۰
۶-۱ ساختار مدولاتورهای دلتا – سیگما با استفاده از کوانتایزر چندبیتی ..... ۸۲
۶-۱-۱ ساختار مناسب برای DAC ..... ۸۴
۶-۱-۲ تطابق دینامیکی عناصر ..... ۸۷
۶-۱-۲-۱ انتخاب تصادفی عناصر ..... ۸۸
۶-۱-۲-۲ چرخش دینامیکی عناصر – شیفت‌دهندهٔ Barrel ..... ۹۰
۶-۱-۲-۳ میانگین گیری جداگانه از سطوح (ILA) ..... ۹۲
۶-۱-۲-۴ روش میانگین‌گیری توسط دیتای ورودی (DWA) ..... ۹۳
۶-۲ ساختارهای ADC با کوانتایزر دوگانه ..... ۹۵
۶-۲-۱ ساختار Leslie-Singh ..... ۹۵
۶-۲-۲ ساختار ADC با دو فیدبک ..... ۹۸
۶-۳ نتیجه گیری ..... ۹۹
فصل هفتم: طراحی مدولاتور دلتا–سیگمای میان گذر متعامد مرتبهٔ ۴ ..... ۱۰۰
۷-۱ طراحی تابع تبدیل نویز مختلط ..... ۱۰۲
۷-۱-۱ طراحی NTF مرتبهٔ ٤ با ساختار ٤/٠ ..... ۱۰۴
۷-۱-۲ طراحی STF ..... ۱۰۵
۷-۱-۳ طراحی NTF مرتبهٔ ٤ با ساختار ۳/۱ ..... ۱۰۶
۷-۲ ساختار عمومی برای پیاده سازی مدولاتور دلتا–سیگمای متعامد ..... ۱۰۸
۷-۲-۱ مزایای ساختار عمومی ..... ۱۰۹
۷-۲-۲ توابع تبدیل در ساختار عمومی ..... ۱۱۰
۷-۳ ساختار جدید برای مدولاتور دلتا– سیگمای میان گذر متعامد ..... ۱۱۰
۷-٤ طراحی مدولاتور متعامد مرتبهٔ ٤ ( ۳/۱ ) با ساختار ..... ۱۱۴
۷-۵ عدم تطابق بین ضرایب دو مسیر ..... ۱۲۱
۷-٦ روش تطبیقی برای حذف آثار ناشی از عدم تطابق ..... ۱۲۷
۷-۷ فیلتر کردن به منظور کاهش نرخ ..... ۱۲۸

۷-۸ نتیجه گیری ..... ۱۳۲
۷-۹ پیشنهاد برای کارهای آینده ..... ۱۳۳
واژه نامه ..... ۱۳٤
مراجع ..... ۱۳۵
پیوست الف: اثر عدم تطابق در فیلتر های مختلط تک قطبی ..... ۱۳۹
پیوست ب: الگوریتم LMS مختلط ..... ۱٤۱
پیوست پ: شکل دهی عدم تطابق ..... ۱٤۳
پیوست ت: ملاحظات عملی در طراحی NTF ..... ۱٤٦
پیوست ث: توابع تبدیل و تعیین ضرایب ساختارها ..... ۱٤۹

# فصل اول

# مقدمه و رئوس مطالب

## ۱

تحقیقات زیادی در میکروالکترونیک برای پیاده‌سازی یک گیرندهٔ RF بصورت کاملاً مجتمع که عمدهٔ بخشهای آن در حوزهٔ دیجیتال باشد صورت گرفته است. هدف نهایی این تلاشها ساخت وسایل مخابراتی در ابعاد کوچک، قیمت پایین و توان مصرفی کم می‌باشد که علاوه بر قابل اعتماد بودن[1] و آزمون‌پذیری[2] بتوانند در استانداردهای مخابراتی[3] مختلف هم کار کنند.

برای دستیابی به گیرندهٔ کاملاً مجتمع از ساختارهایی که فرکانس میانی (IF) در آنها صفر است[4] استفاده می‌کنیم. در این ساختارها با استفاده از میکس کردن متعامد[5] سیگنال دریافتی مشخصات فیلتر حذف تصویر[6] RF، که یک فیلتر غیرفعال است، تعدیل پیدا می‌کند. درنتیجه این فیلتر قابل مجتمع‌سازی برروی تراشه می‌شود. مشکلات متعددی وجود دارد که کارآیی این ساختار را کاهش می‌دهند و ما را به سمتی سوق می‌دهند که عمدهٔ پیاده‌سازی در بخش دیجیتال انجام گیرد. برای این منظور عمل تبدیل آنالوگ به دیجیتال باید در نزدیکترین نقطه به آنتن صورت گیرد، مثلاً در یکی از طبقات IF، که در آن امکان تبدیل آنالوگ به دیجیتال وجود دارد. این موضوع ما را به سمت استفاده از مبدلهای آنالوگ به دیجیتال میان‌گذر سوق می‌دهد.

---

1 - Robust
2 - Testable
3 - Multiple communication standards
4 - Zero-IF Receivers
5 - Quadrature Mixing
6 - Image reject filter

در این پایان‌نامه یک گیرنده با فرکانس IF کم[1] ارایه شده است. در این گیرنده با استفاده از میکس کردن متعامد، سیگنال تصویر تا حد قابل‌توجهی تضعیف می‌شود. درنتیجه گیرنده‌های IF کم یک راه‌حل ممکن برای پیاده‌سازی دیجیتال و یکپارچهٔ[2] گیرنده‌های رادیویی می باشند. یک جزء بسیار مهم در این سیستم، و هر گیرندهٔ دیگری که از میکس کردن متعامد به جهت حذف عناصر غیرقابل مجتمع‌سازی[3] استفاده می‌کند، عنصری است که بتواند بخوبی عمل تبدیل آنالوگ به دیجیتال میان‌گذر[4] را برروی سیگنالهای متعامد انجام دهد. در این پایان‌نامه یک مبدل آنالوگ به دیجیتال دلتا – سیگمای (ΔΣ) میان گذر متعامد ارایه شده است. استفاده از چنین مبدلی مزایای تئوری و عملی زیادی نسبت به استفاده از یک جفت مبدل آنالوگ به دیجیتال دلتا- سیگمای حقیقی دارد. از سوی دیگر ساختار ارایه شده برای این مدولاتور میان‌گذر دلتا-سیگمای متعامد یک ساختار کاملاً جدید می‌باشد که مزایای زیادی نسبت به ساختارهای رایج قبلی دارد و آنرا به یک ساختار مناسب برای کار با نسبت بیش نمونه‌برداری[5] (OSR) کم و پیاده‌سازی در تکنولوژیهای دیجیتال امروزی تحت ولتاژ تغذیهٔ پایین تبدیل می‌کند. مراحل طراحی توابع تبدیل و سیستم موردنیاز برای تحقق این مدولاتور دلتا – سیگمای متعامد بطور کامل بیان شده است.

همانطور که بیان شد ساختار گیرندهٔ متعامد دیجیتال یک کاندیدای مناسب برای تحقق گیرنده‌های مجتمع برروی یک تراشه می‌باشد. اما این ساختار به عدم تطابق بسیار حساس است. هرگونه عدم تعادل بین بهره یا فاز مسیرهای هم‌فاز[6] (I) و متعامد[7] (Q) باعث تداخل نویز باند تصویر در باند سیگنال مطلوب می‌شود.

در این پایان‌نامه این مشکل و روشهای حذف آثار آن مورد بررسی واقع شده است. این مشکل در هر کدام از اجزای گیرندهٔ متعامد ازجمله میکسر متعامد یا مدولاتور دلتا- سیگمای متعامد می‌تواند رخ دهد.

---

1 -Low-IF Receiver
2 -Monolithic
3 -Off-chip
4 -Bandpass Analog-to-Digital Conversion
5 -OSR: Oversampling Ratio
6 -In-phase
7 -Quadrature Phase

## ۱-۱ رئوس مطالب

این گزارش مشتمل بر ۷ فصل و ۵ پیوست می‌باشد. فصل ۱ به مقدمه و معرفی موضوع و ارایه رئوس مطالب می‌پردازد. در فصل ۲ به معرفی و بررسی ساختار گیرنده‌های IF و پردازشهای سیگنال در بخش IF پرداخته می‌شود. مزایا و معایب هر کدام از این گیرنده‌ها برای هدف مجتمع‌سازی و کاهش توان مصرفی بررسی می‌شود و نهایتاً یک ساختار مناسب برای بخش IF گیرنده‌های متعامد دیجیتال انتخاب می‌شود. در فصل ۳ مروری بر مدولاتورهای دلتا–سیگمای پایین‌گذر و میان‌گذر انجام می شود همچنین در این فصل مدولاتور دلتا–سیگمای میان‌گذر متعامد به همراه روشهای پیاده‌سازی آن در حوزهٔ گسسته (Z) معرفی می‌شود. فصل ٤ به بررسی آثار عدم تطابقها بر رفتار گیرندهٔ متعامد دیجیتال و مدولاتور دلتا–سیگمای متعامد می‌پردازد. اثر عدم تطابق بین ضرایب در مدولاتور دلتا–سیگمای متعامد یا عدم تعادل بین مسیرهای I و Q در گیرندهٔ متعامد بصورت کاهش نسبت سیگنال به نویز (SNR) و نسبت حذف تصویر (IMR) ظاهر می‌شود. در فصل ۵ روشهایی برای حذف آثار عدم تطابقهای معرفی شده در فصل ٤ ارایه می‌شود. با این روشها می‌توان کارآیی سیستم را تا حدی بهبود بخشید. در این فصل به روشهایی که سابقاً متداول بوده اشاره می شود و سپس به یک روش که با استفاده از الگوریتمهای تطبیقی بهبود یافته به حذف آثار عدم تطابق می‌پردازد اشاره‌ای می‌شود.

در این مدولاتور از یک کوانتایزر چندبیتی استفاده شده است. متعاقباً باید از یک مبدل دیجیتال به آنالوگ (DAC) چندبیتی هم استفاده کرد. متأسفانه DACهای چندبیتی به اندازهٔ کافی خطی نیستند و باعث بروز هارمونیکهای سیگنال اصلی می‌شوند. روشهای متعددی برای حذف اثرات ناشی از غیرخطی بودن DACها ارایه شده که در فصل ٦ به بررسی بعضی از آنها می‌پردازیم.

نهایتاً فصل ۷ به طراحی سطح سیستمی مدولاتور دلتا–سیگمای میان‌گذر متعامد مرتبهٔ چهار با ساختار $f_s/4$ می‌پردازد. این مدولاتور با فرکانس نمونه‌برداری ۱۶ MHz سیگنال میان‌گذر با پهنای باند ۱ MHz حول فرکانس IF برابر با ۴ MHz می باشد را به دیجیتال تبدیل می‌کند و درحالیکه از یک کوانتایزر چهار بیتی و یک کوانتایزر تک‌بیتی استفاده می‌کند به دقت حدود ۱۴ بیت می‌رسد. سپس