بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکدهٔ برق و کامپیوتر

# بررسی و تحلیل رفتار نویز فاز در نوسانسازهای LC-CMOS و ارائه روشهایی جهت بهبود آن

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک

**علیرضا تقی زاده**

استاد راهنما

**دکتر رسول دهقانی**

۱۳۹۰

**دانشگاه صنعتی اصفهان**

دانشکدهٔ برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق- الکترونیک آقای علیرضا تقی زاده تحت عنوان

# بررسی و تحلیل رفتار نویز فاز در نوسانسازهای LC-CMOS و ارائه روشهایی جهت بهبود آن

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۶/۲۹ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت

| | |
|---|---|
| ۱- استاد راهنمای پایان نامه | دکتر رسول دهقانی |
| ۲- استاد مشاور پایان نامه | دکتر اصغر غلامی |
| سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده | دکتر امیر برجی |

# قدردانی

بدون شک تمام موفقیت های زندگی و تحصیلی خود را در مرتبه اول مدیون خانواده عزیزم، به ویژه همسر مهربان و عزیزتر از جانم که با حضورش آرامش را درک نمودم و پدر و مادر فداکارم که در تمام مراحل زندگی پشتیبان و باعث دلگرمی من بوده اند، می باشم.

وظیفه خود می دانم مراتب سپاسگذاری و امتنانم را از استاد و سرور گرانمایه ام جناب دکتر رسول دهقانی - که راهنمایی ها و حمایت های بی دریغ ایشان در طول چندین سال حضورم در دانشگاه مرا به درس خواندن و تحقیق علاقه مند و امیدوار نمود و در کنار آن به من درس پاکی و تواضع را آموختند - اعلام کنم. به علاوه از تمامی معلمان، دبیران و اساتید دانشگاه که در طول دوران تحصیل مرا آموزش داده و به من حتی کلمه ای آموزش داده اند، تشکر و قدردانی می کنم و خود را مدیون آنان می دانم. در انتها نیز از تمامی دوستانم که مرا در انجام پروژه و تهیه گزارش یاری نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم. از درگاه خداوند متعال برای تمامی این عزیزان سلامتی، موفقیت و توفیق روزافزون در همه عرصه های زندگی را خواستارم.

علیرضا تقی زاده

شهریور ۱۳۹۰

**کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.**

**تقدیم به همسر مهربان و پدر و مادر فداکارم**

## فهرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


فهرست مطالب . . . . . هشت

چکیده . . . . . ۱

**فصل اول : مقدمه** ۲

۱-۱ مقدمه . . . . . ۲

۱-۲ سیستم‌های مخابراتی و ساختار آنها [۱۸] . . . . . ۴

۱-۳ معماری یک فرستنده و گیرنده . . . . . ۶

۱-۴ اسیلاتورها و نویز فاز آنها . . . . . ۷

۱-۵ اهداف و روند ارائه مطالب . . . . . ۹

**فصل دوم : اصول کلی عملکرد اسیلاتورها و انواع آنها** ۱۱

۲-۱ مقدمه . . . . . ۱۱

۲-۲ اصول کلی عملکرد اسیلاتورها . . . . . ۱۲

۲-۲ -۱ دیدگاه سیستم فیدبك دار . . . . . ۱۲

۲-۲ -۲ دیدگاه مقاومت منفی . . . . . ۱۴

۲-۳ ساختارهای پایه نوسان ساز . . . . . ۱۵

۲-۴ اسیلاتورهای حلقوی . . . . . ۱۷

۲-۵ اسیلاتورهای LC . . . . . ۱۷

۲-۶ اسیلاتورهای کنترل شونده با ولتاژ . . . . . ۲۲

۲-۷ چرا اسیلاتورهای LC ؟ . . . . . ۲۵

**فصل سوم : منابع نویز اسیلاتورها و معرفی نویز فاز و معایب آن** ۲۷

۳-۱ مقدمه . . . ۲۷

۳-۲ انواع منابع نویز . . . ۲۸

۳-۲ -۱ نویز حرارتی مقاومت . . . ۲۸

۳-۲ -۲ نویز حرارتی ترانزیستورهای ماسفت . . . ۲۹

۳-۲ -۳ نویز فلیکر ترانزیستورهای ماسفت . . . ۳۰

۳-۲ -۴ نویز پاپ کرن . . . ۳۲

۳-۳ تعریف نویزفاز و جیتر و ارتباط آنها . . . ۳۳

۳-۳ -۱ تعریف نویز فاز و جیتر . . . ۳۴

۳-۳ -۲ ارتباط جیتر با نویز فاز [۲۰] . . . ۳۶

۳-۴ معایب ناشی از نویز فاز در سیستم های مخابراتی . . . ۳۶

۳-۴ -۱ تاثیر نویز فاز بر روی عملکرد سیستمهای OFDM . . . ۳۸

۳-۵ چگونگی ایجاد سیگنال اسیلاتور محلی . . . ۴۳

۳-۶ پاسخ حلقه های قفل فاز به جیتر (نویز فاز ) [۲۰] . . . ۴۴

**فصل چهارم : مدل‌هاي نویز فاز اسیلاتورها** ۴۷

۴-۱ مقدمه . . . ۴۷

۴-۲ مدل نویز فاز Leeson [۱۲] . . . ۴۸

۴-۲ -۱ معرفی مدل Leeson . . . ۴۸

۴-۳ مدل نویز فاز Hajimiri [۷] . . . ۵۰

۴-۳ -۱ مدل پاسخ ضربه براي فاز اضافي . . . ۵۱

۴-۳ -۲ تبدیل فاز به ولتاژ . . . ۵۵

۴-۳ -۳ پیش بیني توان مؤلفه‌هاي کناري نویز فاز . . . ۵۶

۴-۳ -۴ منابع نویز ایستان چرخشی . . . ۵۹

۴-۳ -۵ پیش بیني نویز فاز خروجي با چندین منبع نویز . . . ۵۹

۴-۴ فرآیندهای فیزیکی منجر به نویز فاز در اسیلاتورهای CMOS . . . ۶۰

۴-۴ -۱ تمایز بین نویز دامنه و نویز فاز [۱۵] . . . . . ۶۰
۴-۴ -۲ مدل سازی تاثیر نویز بر عملکرد ترانزیستورهای زوج دیفرانسیل . . . . . ۶۱
۴-۴ -۳ چگونگی تبدیل نویز عناصر مختلف مدار به نویز فاز . . . . . ۶۳
۴-۴ -۴ به دست آوردن ضریب F در رابطه Leeson برای اسیلاتورهای CMOS . . . . . ۷۲

**فصل پنجم : روش های کاهش نویز فاز اسیلاتورهای LC** **۷۴**

۵-۱ مقدمه . . . . . ۷۴
۵-۲ فیلتر نمودن نویز مدار بایاس توسط مدارات سوئیچ و خازنی . . . . . ۷۵
۵-۳ روش فیلترینگ نویز منبع جریان دنباله . . . . . ۷۸
۵-۳ -۱ مقدمه . . . . . ۷۸
۵-۳ -۲ اثر منبع جریان . . . . . ۷۹
۵-۳ -۳ فیلتر نمودن نویز . . . . . ۸۱
۵-۴ کاهش نویز فلیکر [۱۱] . . . . . ۸۳
۵-۵ کاهش نویز در مدارات CMOS از طریق گیت‌هاي سوئیچ شونده و بایاس بدنهٔ مستقیم [۲۴] . . . ۸۴

**فصل ششم : بررسی پایه ای اسیلاتور LC با مدل های اولیه** **۸۷**

۶-۱ مقدمه . . . . . ۸۷
۶-۲ استفاده از مدل سطح صفر براي کلیدهاي زوج دیفرانسیل همراه با منبع جریان ایده آل برای دنباله . . ۸۹
۶-۲ -۱ اثر تزویج بین دو سلف . . . . . ۹۰
۶-۳ استفاده از مدل سطح یك براي کلیدهاي زوج دیفرانسیل . . . . . ۹۳
۶-۳ -۱ اثر تغییر پارامترهای مدل سطح یک روی نویز فاز . . . . . ۹۳
۶-۳ -۲ اثر ابعاد ترانزیستورهای زوج دیفرانسیل بر نویز فاز . . . . . ۹۵
۶-۳ -۳ اثر تزویج بین دو سلف . . . . . ۹۹
۶-۴ افزودن منبع جریان ترانزیستوری با مدل سطح یک . . . . . ۱۰۰
۶-۵ اثر فیلتر نویز مورد استفاده برای منبع جریان دنباله در مدار با مدل سطح یک . . . . . ۱۰۲
۶-۶ کار با مدل های واقعی تکنولوژی $۰/۱۸\mu m$ . . . . . ۱۰۳

**فصل هفتم : ارائه روش های کاهش نویز در اسیلاتور LC** **۱۰۷**

۷-۱ مقدمه . . . . . ۱۰۷

۷-۲ استفاده از ترانزیستورهای دو قطبی به عنوان منبع جریان دنباله . . . . . ۱۰۸

۷-۳ تغییر فیلتر نویز منبع جریان دنباله برای بهبود اثر آن . . . . . ۱۰۹

**فصل هشتم : نتیجه گیری** **۱۱۳**

۸-۱ جمع بندی نتایج . . . . . ۱۱۳

۸-۲ نوآوری ها . . . . . ۱۱۷

**پیوست آ: مدل های سطح پایین ترانزیستور ماسفت** **۱۲۰**

آ-۱ مدل سطح یک برای ترانزیستور ماسفت . . . . . ۱۲۰

آ-۲ مدل سطح یک اصلاح شده برای ترانزیستور ماسفت . . . . . ۱۲۲

آ-۳ مدل سطح صفر برای ترانزیستور ماسفت . . . . . ۱۲۲

**منابع و مراجع** **۱۲۴**

منابع و مراجع . . . . . ۱۲۴

**چکیده**

رشد فزاینده مخابرات بی سیم در دو دهه گذشته نیاز به ساخت فرستنده-گیرنده های با قابلیت های بالاتر، اندازه کوچکتر، توان مصرفی کمتر و ارزان تر را ایجاب نموده است. در ساختار فرستنده-گیرنده از بخش های آنالوگ، دیجیتال و مد ترکیبی استفاده می شود. تکنولوژی CMOS با ظرفیت های عظیم خود امکان ساخت کلیه بخش های یک سیستم مخابراتی روی چیپ را با کمترین هزینه و توان مصرفی فراهم آورده است. به علاوه با پیشرفت روز افزون مدارات مجتمع دیجیتال و افزایش سرعت پردازش آنها بیشتر عملیات پردازشی از بخش آنالوگ به دیجیتال منتقل گردیده است. با این وجود نه تنها از اهمیت بخش آنالوگ کاسته نشده است، بلکه روز به روز بر اهمیت این بخش افزوده شده است. از مهمترین مواردی که در قسمت آنالوگ فرکانس بالا در فرستنده-گیرنده امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است، ساخت اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ در تکنولوژی CMOS با نویز فاز پایین است. به عنوان مثال پارامتر نویز فاز در سیستم های مخابراتی با مدولاسیون نوع OFDM از اهمیت ویژه ای برخوردار است. البته اهمیت نویز فاز تنها به دنیای آنالوگ محدود نمی شود و حتی در دنیای دیجیتال نیز، نویز فاز تحت عنوان جیتر حائز اهمیت می باشد. ساختارهای مختلفی برای اسیلاتورهای کنترل شونده با ولتاژ وجود دارد که مهمترین و پرکاربردترین آنها اسیلاتورکنترل شونده با ولتاژ CMOS نوع LC است که دارای مشخصات بسیار مناسبی از جمله نویز فاز بسیار پایین نسبت به سایر ساختارها می باشد. مکانیزم تبدیل منابع نویز مختلف موجود در این مدار به نویز فاز خروجی به دلیل خاصیت غیرخطی و سیگنال بزرگ مدار اسیلاتور بسیار پیچیده می باشد. در طول سالها تلاش های گوناگونی در آنالیز نویز فاز صورت گرفته است که باعث ایجاد مدل های مختلف گردیده است. هر کدام از این مدل ها دارای نقاط ضعف و قوت خاص خود می باشند و تأثیر برخی از پارامتر ها روی نویز فاز را مشخص می نمایند. از مهمترین این مدل ها، مدل Leeson و مدل جدیدتر ارائه شده توسط Hajimiri می باشد. براساس مدل های مختلف، در طول سال ها روش های مختلفی برای کاهش نویز فاز اسیلاتورها به کار گرفته شده اند که همگی سعی در کاهش این پدیده مخرب با حداقل هزینه دارند. در این پایان نامه ابتدا به معرفی اصول عملکرد و انواع اسیلاتور های فرکانس بالا و مفاهیم نویز فاز و جیتر و تأثیر آن بر عملکرد سیستم مخابراتی می پردازیم. سپس مدل های ارائه شده برای نویز فاز اسیلاتور LC را معرفی و روابط مربوط به این مدل ها بررسی می کنیم. در ادامه با بررسی پایه ای این اسیلاتور اثر تغییر هر کدام از پارامتر های مؤثر در نویز فاز آن به تنهایی بررسی و شبیه سازی های لازم صورت خواهد گرفت. روابط دقیق تری برای دامنه نوسان اسیلاتور بر حسب نسبت ابعاد ترانزیستور های سوئیچ و در نتیجه تعیین یک نسبت بهینه برای مشخصات مناسب به دست می آید و اثر ضریب تزویج بین دو سلف بر عملکرد اسیلاتور مورد بررسی قرار می گیرد. در ادامه روش های کاهش نویز در اسیلاتور LC مورد بررسی قرار می گیرد و روش هایی برای کاهش نویز اسیلاتورها ارائه و با شبیه سازی تأیید می شوند.

**کلمات کلیدی:** سیستم های مخابراتی، تکنولوژی CMOS، اسیلاتور LC، اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ، نویز فاز، کاهش نویز.

# فصل اول

## مقدمه

### ۱-۱ مقدمه

در چند دهه گذشته با ابداع تکنولوژی مدارهای مجتمع تحولی عظیم در زندگی بشر رخ داده است. این تکنولوژی در طول این چند دهه با پیشرفت خیره کننده خود امکان ساخت سیستم‌های بسیار پیچیده را با هزینه بسیار کم، ابعاد بسیار کوچك و سرعت بسیار بالا فراهم نموده است. صنایع مخابرات بی سیم در این دوران دارای رشد بسیار زیاد و روزافزونی بوده است، به طوری که در دهه گذشته این رشد نمایی باعث افزایش کاربرد این سیستم‌ها توسط بیش از ۵ میلیارد نفر در سراسر دنیا یعنی بیش از ۸۰ درصد از مردم دنیا شده است. محصولات مخابراتی با تنوع بسیار زیاد مانند تلفن‌های همراه، شبکه‌های بی‌سیم محلی[۱]، سیستم‌های موقعیت یاب جهانی[۲]، سیستم‌های شناسایی فرکانس بالا[۳]، سیستم‌های با پهنای باند بسیار زیاد[۴] و ... در بسیاری از مناطق دنیا مورد استفاده و به عنوان جزء جدایی‌ناپذیر زندگی روزمره مردم گشته‌اند [۵]. تصور دنیایی بدون تلفن همراه برای اکثر مردم دنیا بسیار دشوار و حتی نشدنی می‌باشد.

---

[۱] Wireless Local Access Network: WLAN

[۲] Global Positioning System: GPS Systems

[۳] Radio Frequency Identification Systems: RFID Systems

[۴] Ultra Wideband Systems: UWB Systems

به علاوه با پیشرفت بسیار سریع تکنولوژی‌های مخابراتی همراه با علوم کامپیوتر آینده دنیایی بسیار هوشمند با روابط گسترده بین تمام اجزا بسیار روشن می‌باشد. در این دوران مباحث بسیار جدیدی بر مبنای این پیشرفت ها مطرح شده است که روزگاری نه چندان دور تنها در کتاب‌های تخیلی یافت می‌شدند. مباحث مطرح شده در زمینه شبکه‌های سنسور بی‌سیم[۵] و کاربرد آنها در صنعت، پزشکی و حتی خانه، سیستم‌های هوشمند مربوط به اتوماسیون منزل[۶]، روش‌های پیچیده کنترل پزشکی از راه دور از این گونه مباحث می‌باشند.

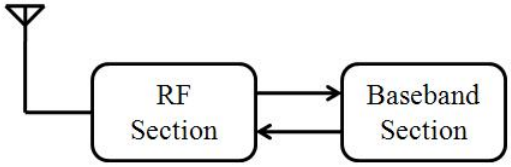
استفاده از تکنولوژی مدارهای مجتمع در ابتدا با دشواری‌های بسیار زیادی در زمینه ساخت و تولید همراه بود. در همین راستا تکنولوژی‌های متفاوتی در طول این چند دهه با هدف کاهش هزینه، افزایش پیچیدگی و کاهش ابعاد مانند CMOS، NMOS، Bipolor و ... ابداع شده و توسعه یافتند. یکی از مهمترین و پراستفاده‌ترین این تکنولوژی‌ها که امروزه بیش از ۹۹ درصد از بازار مدارات مجتمع را به دست گرفته است، تکنولوژی ساخت CMOS می‌باشد. این تکنولوژی در ابتدا با هدف ساخت مدارات دیجیتال بسیار فشرده وارد عرصه گشت و با سرعت بسیار زیاد به سمت هدف خود یعنی فشرده سازی هر چه بیشتر مدارات مجتمع پیش رفت. این تکنولوژی در طول چند دهه قانون معروف مور را که ادعا می‌نمود، فشردگی مدارات مجتمع در هر ۲ سال ۲ برابر می‌شود، تعقیب نمود. امروزه این تکنولوژی توانایی ساخت ترانزیستورهای ماسفت با طول کانال ۲۵ نانومتر را به صورت تجاری به دست آورده است. همان طور که گفته شد، ابتدا این تکنولوژی برای ساخت مدارات دیجیتال ابداع و مورد استفاده گرفت. ولی در سال‌های اخیر توجه بسیار زیادی برای ساخت مدارات آنالوگ در این تکنولوژی شده است. به طور کلی، کیفیت عملکرد، هزینه و مدت زمان مورد نیاز برای ارائه به بازار سه پارامتری هستند که در انتخاب تکنولوژی تعیین کننده می‌باشند. در گذشته تکنولوژی‌هایی که برای مدارات فرکانس بالا مورد استفاده قرار می‌گرفتند، تکنولوژی‌های Silicon Bipolar و GaAs بودند. تکنولوژی GaAs دارای مزیت‌هایی از جمله بالا بودن حاصلضرب ولتاژ شکست در فرکانش قطع، بدنه نیمه عایق و سلف‌ها و خازن‌هایی با کیفیت بالا می‌باشد. تکنولوژی Silicon Bipolar امکان فشرده سازی مدارات در هزینه پایین‌تری نسبت به GaAs فراهم می‌آورد و به همین دلیل بیشتر مورد استفاده قرار می‌گرفت [۱۸].

امروزه با توجه به مزایای بسیار زیاد تکنولوژی CMOS در مدارات دیجیتال و پیشرفت آن، امکان تحقق ساخت مدارهای آنالوگ که در گذشته تنها توسط GaAs یا Silicon Bipolar انجام می‌شد، فراهم آمده است. از مهمترین مزیت‌های این تکنولوژی برای ساخت مدارات فرکانس بالای آنالوگ کاهش هزینه‌های ساخت به دلیل عدم نیاز به پروسه

---

[۵] Wireless Sensor Networks

[۶] Building Automation




شکل ۱- ۱: بلوک دیاگرام فرستنده و گیرنده

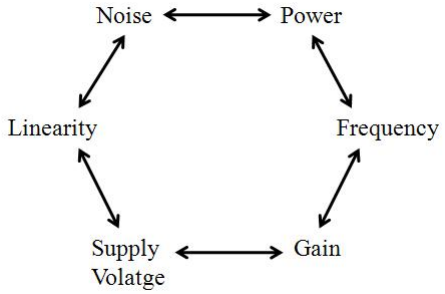
جدا، کمك به ساختار نرم افزارهای CAD و کاهش زمان رسیدن محصول به بازار می‌باشد. به علاوه یکی از مهمترین و اساسی‌ترین دستاورهای این تکنولوژی امکان ایجاد سیستم‌های روی چیپ [۱] می‌باشد. این سیستم‌ها کلیه بخش‌های مورد نیاز یك سیستم مخابراتی روی یك تراشه قرار می‌دهند که باعث کاهش چشمگیر هزینه ساخت و توان مصرفی می‌شود. این دو ویژگی در مدار سیستم‌های قابل حمل از جمله تلفن‌های همراه بسیار اساسی می‌باشد.

در ادامه باید ذکر شود که تکنولوژی CMOS از ابتدا برای ساخت مدارات دیجیتال طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است و حتی توسعه و پیشرفت آن نیز در راستای بهبود طراحی مدارات دیجیتال رخ داده است. بنابراین می‌توان حدس زد که بسیاری از خواص و ویژگی‌های آن برای مدارات آنالوگ فرکانس بالا مناسب نیست. از جمله مهمترین این ویژگی‌های منفی می‌توان به قابلیت جریان دهی پایین عناصر اکتیو، کیفیت پایین عناصر پسیو ساخته شده در پروسه نظیر سلف‌ها و خازن‌ها و محدودیت‌های ولتاژ تغذیه اشاره نمود. بنابراین این ویژگی‌ها بحث طراحی مدارات آنالوگ در این تکنولوژی را دشوار نموده است. ولی با توجه به مزیت‌های آن طراحان آنالوگ موفق به حل برخی از مشکلات شده و امروزه این تکنولوژی بسیار مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۱-۲ سیستم‌های مخابراتی و ساختار آنها [۱۸]

ساختار کلی یك سیستم مخابراتی به صورت کلی به صورت یك سیستم شامل فرستنده و گیرنده می‌باشد. در این ساختار مدارات و بلوك‌های مختلفی قابل شناسایی می‌باشند. ولی به طور کلی ساختار هر کدام از سیستم‌های فرستنده و گیرنده به صورت یك قسمت فرکانس بالا و یك قسمت پایه می‌باشد(شکل ۱- ۱). این دو قسمت به سادگی با توجه به ویژگی‌ها و مشخصات از یکدیگر قابل تمیز می‌باشند. از ویژگی‌های منحصر به فرد قسمت فرکانس بالا می‌توان به پیچیدگی کمتر از نظر تعداد المان‌های به کار رفته در آن، فرکانس کاری آن و ساختار کلی به صورت آنالوگ برای آن اشاره نمود. این در حالی است که قسمت باند پایه دارای تعداد بسیار زیادی المان بوده و بخش عمده عملیات سیستم را بر عهده دارد. به

[۱] System On Chip: SOC




شکل ۱- ۲: ۶-ضلعی طراحی فرکانس بالا

علاوه این قسمت به طور عمده دیجیتال می‌باشد (البته ممکن است دارای بخش‌های آنالوگی نیز باشد). به عنوان مثال یك تلفن همراه دارای بیش از یك میلیون ترانزیستور می‌باشد که تنها تعداد بسیار کمی از آنها مربوط به قسمت فرکانس بالا می‌باشند و بقیه عمدتاً برای قسمت باند پایه به کار رفته‌اند. با این وجود پیچیدگی قسمت فرکانس بالا به مراتب بیشتر از قسمت باند پایه بوده و به نوعی گلوگاه [۱] اصلی سیستم‌های مخابراتی می‌باشد.

دلیل عمده این پیچیدگی چند زمینه‌ای بودن آن می‌باشد. به این معنی که برخلاف دیگر مدارهای آنالوگ و دیجیتال، طراحی سیستم‌های فرکانس بالا نیاز به فهم خوب از بسیاری از زمینه‌هایی دارد که دارای ارتباط مستقیم با مبحث طراحی مدارات مجتمع نمی‌باشند. به عنوان مثال می توان مباحثی مانند تئوری مخابرات، تئوری مایکروویو، بحث سیگنال‌های تصادفی، انتشار سیگنال، استانداردهای بسیم، ساختار فرستنده ـگیرنده‌ها و ... را نام برد. بنابراین طراح آنالوگ باید در زمینه‌های مختلف و دور از هم ذکر شده دارای اطلاعات کافی باشد و بتواند تمام این مباحث را به طور همزمان برای طراحی یك سیستم فرکانس بالا به کار ببرد.

دلیل دوم وجود بده بستان‌های [۱] بسیار زیاد در طراحی مدارات فرکانس بالا می‌باشد. این بده بستان‌ها به طور خلاصه در۶ -ضلعی شکل ۱- ۲ مشاهده می‌شوند. در این ۶-ضلعی هر دو پارامتر به نوعی با یکدیگر بده بستان داشته و همین امر طراحی مطلوب و بهینه را بسیار دشوار می‌گرداند.

سومین دلیل دشواری طراحی مدارات فرکانس بالا نبودن نرم‌افزارهای طراحی با قدرت بالا مانند دیگر زمینه‌ها از جمله طراحی مدارات دیجیتال می‌باشد. امروزه نرم افزارهای بسیار قدرتمندی برای سنتز و تحلیل مدارات دیجیتال موجود می‌باشند که امکان مکانیزه کردن طراحی را فراهم ساخته‌اند و طراحی باند پایه با تعداد بسیار زیاد ترانزیستور را بسیار ساده نموده‌اند. در بحث طراحی مدارات فرکانس بالا چنین نرم افزارها و حتی مدل‌های مناسب در بسیاری از موارد وجود ندارد.

---

[۱] Bottleneck

[۱] Tradeoff

به عنوان آخرین دلیل می‌توان به بحث پیچیدگی مدل سازی رفتار المان‌های مدار و در نتیجه پیچیدگی تحلیل آن در طراحی مدارات فرکانس بالا پرداخت. با توجه به چهار دلیل ذکر شده طراحی مدارات فرکانس بالا کار بسیار دشوار بوده و بسیاری از اوقات طراحی مدارات فرکانس بالا را یك هنر قلمداد می‌کنند.

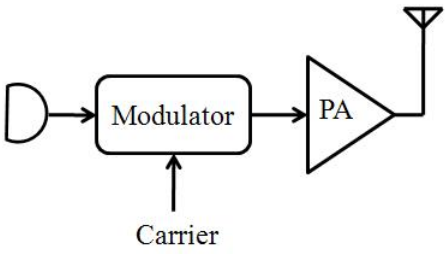
### ۱-۳ معماری یک فرستنده و گیرنده

فرایندی که طی آن پیام به شکل مناسب برای انتقال تبدیل می‌شود مدولاسیون نامیده می‌شود. این فرایند در گیرنده به صورت معکوس انجام می‌شود که به آن دمدولاسیون گفته می‌شود. معماری یك فرستنده و گیرنده در طول چند دهه گذشته مورد تغییر قرار گرفته و به علاوه انواع ساختارها در این سال‌ها ایجاد شده‌اند. به طور کلی با توجه به پیشرفت بسیار زیاد در طراحی دیجیتال و هزینه بسیار کم برای ساخت آنها، بسیاری از عملیات مورد نیاز روی سیگنال در قسمت باند پایه توسط مدارات دیجیتال انجام می‌شود و نهایتاً سیگنال ساخته شده برای ارسال به قسمت فرکانس بالا فرستاده می‌شود. ولی هر چقدر هم قدرت بخش دیجیتال افزایش یابد و قابلیت‌های آن بیشتر شود، حذف قسمت فرکانس بالا در فرستنده ـ گیرنده‌ها امکان پذیر نیست و برخی از مهمترین عملیات سیستم در این قسمت انجام می‌شود، به طور مستقیم بر روی کارایی کل سیستم تاثیر مستقیم دارد.

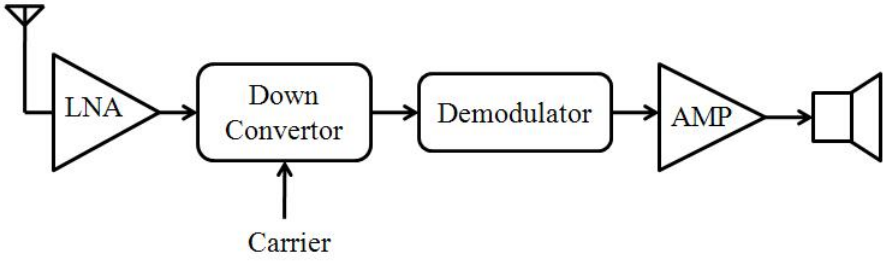
در گذشته نه چندان دور، معماری سیستم به صورت آنالوگ بود که در شکل ۱- ۳، این معماری برای فرستنده و گیرنده مشخص است. در این معماری، در مسیر ارسال، سیگنال آنالوگ تولید شده توسط منابع مختلف مانند میکروفون حامل فرکانس بالا را مدوله می‌کند و نتیجه تقویت شده و بعد از تطبیق امپدانس با آنتن ارسال می‌شود (شکل ۱- ۳(آ)). در گیرنده پس از دریافت سیگنال توسط آنتن و تقویت آن توسط تقویت کننده با نویز کم [۱] با یك پایین آورنده به فرکانس پایین (پایه) منتقل شده تا عمل دمدولاسیون انجام شود و سپس تقویت شده، به یك بلندگو متصل می‌شود (شکل ۱- ۳(ب)).

ساختار یك سیستم فرستنده ـ گیرنده دیجیتال در شکل ۱- ۴ مشخص شده است. در این معماری در فرستنده مطابق شکل ۱- ۴(آ) توسط ،ADC صدا به صورت دیجیتال درآمده و عملیات مختلف در حوزه دیجیتال مانند فشرده سازی و ... انجام می‌شود تا نرخ بیت و پهنای باند کم شود. سپس عملیات کد کردن انجام می‌شود تا بتوان در گیرنده بعضی از خطاها را تشخیص یا اصلاح نمود. به علاوه چون داده‌ها به صورت پالس برای ارسال مناسب نیستند، آنها را تغییر شکل داده و سپس به مدولاتور و تقویت کننده توان اعمال کرده و توسط آنتن ارسال می‌کنیم. در گیرنده مطابق شکل ۱- ۴(ب) داده ها پس از دریافت توسط آنتن توسط تقویت کننده نویز پایین تقویت شده و وارد پایین آورنده شده و به باند پایه منتقل

[۱] Low Noise Amplifier: LNA




(آ) بلوک دیاگرام فرستنده




(ب) بلوک دیاگرام گیرنده

شکل ۱- ۳: بلوک دیاگرام یک فرستنده و گیرنده آنالوگ [۱۸]

می‌شوند. سپس توسط ADC نمونه برداری شده و عکس عملیات فرستنده یعنی جبران سازی، دمولاتور، دکدینگ و عکس فشرده سازی روی آن انجام می‌شود. در نهایت توسط مبدل DAC داده های دیجیتال به آنالوگ تبدیل شده و به بلندگو اعمال می‌شوند. همان طور که مشخص است قسمت فرکانس بالا در دو حالت تقریباً یکسان است و با پیشرفت تکنولوژی مدارات دیجیتال عملاً حذف این بخش شدنی نیست. این بخش شامل مدولاتور، تولید کننده سیگنال حامل، تقویت کننده توان در فرستنده و تقویت کننده با نویز کم و نیز پایین آورنده و تولید کننده حامل در گیرنده می‌باشد.

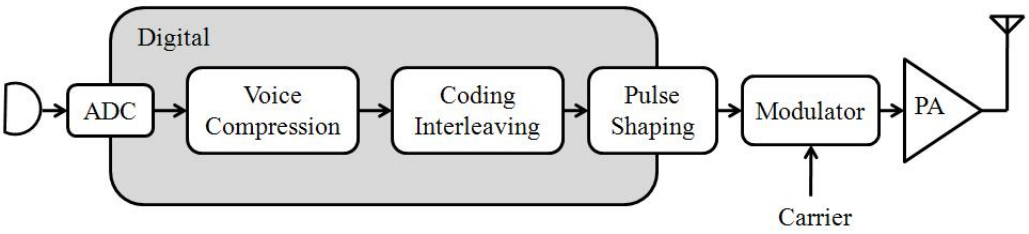
### ۱-۴ اسیلاتورها و نویز فاز آنها

با پیشرفت روزافزون مخابرات، روز به روز بر خواسته‌های سخت‌تر روی بلوک‌های فرکانس بالا افزوده است. از مهمترین این بلوک‌ها که در طول سالها نیازمند ویژگی‌های بسیار سخت است، بلوک تولید کننده سیگنال حامل [۱] می‌باشد. این بلوک خود عمدتاً از چند بلوک تشکیل شده است که مهمترین بخش آن یک بلوک اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ [۲] می‌باشد. وظیفه این بلوک ایجاد یک سیگنال سینوسی می‌باشد که به عنوان حامل برای انتقال اطلاعات به کار می‌رود.

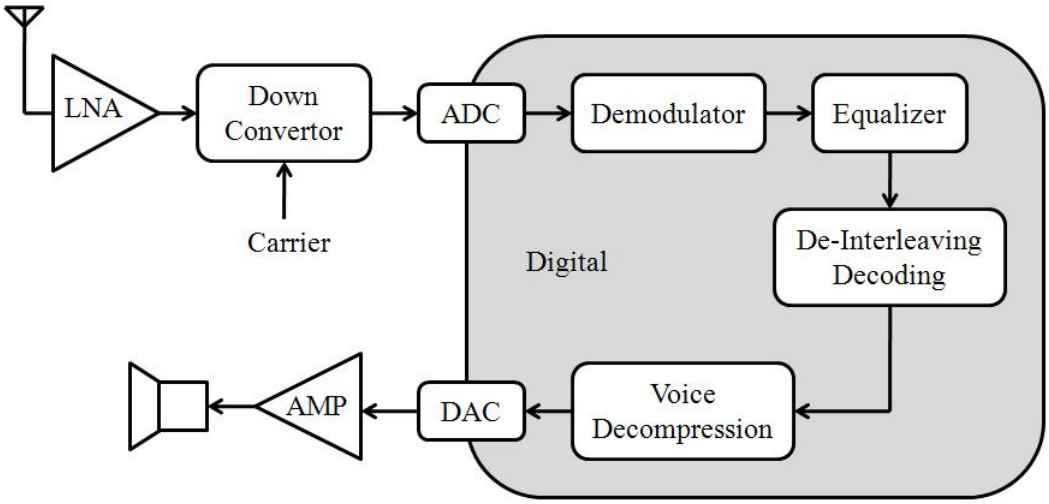
---

[۱] Local Oscillator

[۲] Volatge Controllerd Oscillator: VCO




(آ) بلوک دیاگرام فرستنده




(ب) بلوک دیاگرام گیرنده

شکل ۱- ۴: بلوک دیاگرام یک فرستنده و گیرنده دیجیتال [۱۸]

مشخصات این بلوك به طور مستقیم روی کارایی کل ساختار فرستنده ـ گیرنده تاثیر دارد. از جمله مهمترین پارامترهای این بلوك می‌توان به توان مصرفی، دامنه سیگنال خروجی، میزان خلوص خروجی، نویز فاز (یا جیتر) و ... اشاره نمود. طراحی یك اسیلاتور کنترل شونده با ولتاژ با حداقل توان مصرفی، حداکثر دامنه نوسان خروجی، حداکثر خلوص و حداقل نویز فاز هدف نهایی یك طراح می‌باشد، ولی برآورده نمودن همه این ویژگی‌ها در عمل غیرممکن می‌باشد، زیرا این ویژگی‌ها در بسیاری از اوقات با یکدیگر متناقض می‌باشند.

در این میان ویژگی نویز فاز از مهمترین خواص و در عین حال از پیچیده‌ترین خواص برای تحلیل می‌باشد. نویز فاز به معنی خارج شدن طیف فرکانسی سیگنال اسیلاتور محلی از شکل ایده‌آل خود (که در حوزه فرکانس باید یك ضربه باشد) می‌باشد. این ویژگی به طور مستقیم روی حداقل پهنای باند مربوط به هر کاربر در یك سیستم مخابراتی تاثیر می‌گذارد که در نهایت باعث کاهش کاربران یك سیستم مخابراتی می‌شود. به علاوه در سیستم‌هایی که از روش مدولاسیون OFDM استفاده می‌کنند، می‌تواند تاثیر منفی بسیار نامطلوبی داشته باشد که در فصل های آتی در مورد آن توضیح داده خواهد شد.

با توجه به مطالب گفته شده تا الان، می‌توان دریافت که چرا امروزه ساخت اسیلاتورهای با نویز فاز کم تا چه حد اهمیت دارد و مورد توجه طراحان قرار گرفته است. تعداد مقالاتی که هر ساله درباره این موضوع نوشته می‌شوند بسیار زیاد می‌باشد که به عنوان مثال مراجع [۸]، [۹] ،[۱۰] و [۱۶] تعدادی از آنها می باشند. در تمامی این مقالات عمدتاً از اسیلاتورهای نوع LC استفاده شده است که علت در فصل های آینده مورد بررسی قرار می گیرد ولی به طور کلی می توان گفت علت اصلی آن نویز فاز بسیار کمتر این اسیلاتورها نسبت به انواع دیگر اسیلاتورها می‌باشد.

### ۱-۵ اهداف و روند ارائه مطالب

در قسمت های قبل درباره اهمیت نویز فاز در سیستم های مخابراتی که امروزه بسیار مورد استفاده می باشند، توضیح داده باشد. با توجه به اهمیت آن موضوع این پایان نامه انتخاب و روند اجرای آن شکل گرفت. در این پایان نامه ضمن بررسی ساختارهای مختلف اسیلاتورهای مورد استفاده در سیستم های مخابراتی در قسمت فرکانس بالا، تمرکز خود را بر پرکاربردترین و مطلوب ترین نوع اسیلاتورها در مدارات فرکانس بالا قرار داده و آنرا به طور کامل بررسی می کنیم. به علاوه با مرور مدل های تبدیل نویز به نویز فاز، مکانیزم ها را مورد ارزیابی قرار می دهیم و سعی در بهبود نویز فاز از طریق روش های نوین می نماییم. روند ارائه مطلب به صورت زیر می باشد.

در فصل دوم به معرفی اصول کلی عملکرد اسیلاتورها می پردازیم و از دو دیدگاه مختلف نحوه عملکرد اسیلاتور را بررسی می کنیم. سپس انواع اسیلاتورهای مورد استفاده در مدارات فرکانس بالا را معرفی و ویژگی های هر کدام را ارائه و دلیل انتخاب اسیلاتور LC را مشخص می کنیم. در ادامه در فصل سوم به معرفی تعریف نویز فاز و معادل آن جیتر پرداخته و ارتباط آنها را بیان می کنیم. سپس به اثر نویز فاز در سیستم های مخابراتی پرداخته و به ویژه اثر نویز فاز در مودولاسیون پرکاربرد امروزی یعنی OFDM را بررسی می کنیم و در انتهای فصل نیز رفتار حلقه های قفل فاز در مواجهه با نویز اسیلاتورها را توضیح می دهیم تا با اهمیت نقش طراحی اسیلاتورهای با نویز فاز پایین در مدارات فرکانس بالا آشنا شویم. فصل چهارم با معرفی منابع مختلف نویز در اسیلاتورها مانند نویز حرارتی مقاومت، نویز حرارتی کانال ترانزیستورهای ماسفت، نویز فلیکر و نویز پاپ کرن آغاز و سپس انواع مدل های موجود برای تبدیل نویز به نویز فاز از جمله مدل های مطرح Leeson و Hajimiri را بررسی و نحوه یافتن فاکتور نویز در رابطه Leeson را ارائه می دهیم. هدف این فصل آشنایی با ریشه ها و پارامترهای مختلف دخیل در نویز فاز است تا در فصل بعد روش های کاهش نویز فاز را با دلایلشان بیان کنیم. در فصل پنجم به بررسی روش های کاهش نویز فاز اسیلاتورهای LC پرداخته و انواع روش های آن شامل روش های فیلترینگ نویز و سوئیچ نمودن بایاس و سوئیچ ترانزیستور بین نواحی وارونگی و انباشتگی را بررسی