بسم اللّه الرّحمن الرّحيم

والحمد للّه ربّ العالمين

وصلّى اللّه على محمّد وآله الطّاهرين

دانشگاه فردوسی مشهد
دانشکده مهندسی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه‌ی دکتری
در مهندسی برق- الکترونیک

نوسان‌سازهای متعامد و چندفازه‌ی تزویج شده

اساتید راهنما:
دکتر ساسان ناصح و دکتر محمد میمندی‌نژاد

نگارش: عماد ابراهیمی

بهمن ۱۳۹۱

تعهد نامه

اینجانب عماد ابراهیمی دانشجوی دوره دکتری تخصصی مهندسی برق - الکترونیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد نویسنده پایان نامه نوسان سازهای متعامد و چندفازه‌ی تزویج شده تحت راهنمایی دکتر ساسان ناصح و دکتر محمد میمندی‌نژاد متعهد می شوم:

- **تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.**
- **در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.**
- **مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.**
- **کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه فردوسی مشهد » و یا « Ferdowsi University of Mashhad » به چاپ خواهد رسید.**
- **حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آن ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.**
- **در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاقی انسانی رعایت شده است.**

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- **کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.**
- **استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.**

چکیده

نوسان‌سازهای متعامد و چندفازه یکی از بلوک های ضروری در سیستم های مخابراتی با/بی‌سیم مدرن مانند مدولاتورهای *QPSK*، فرستنده–گیرنده های همودین و سیستم بازیابی کلاک و داده *(CDR)* می باشند که عملکرد آنها بر کارایی کل سیستم شدیداً تاثیرگذار است. نیاز استانداردهای مخابراتی جدید به نوسان‌سازهایی با کارایی بالا منجر به انجام تحقیقات و نوآوری‌های بسیاری در زمینه نوسان‌سازهای متعامد تزویج شده با استفاده از تکنیک قفل شدگی تزریق (*injection-locking*)، گردیده است.

هسته اکثر نوسان سازهای متعامد تزویج شده را نوسان سازهای اتصال–ضربدری تشکیل می‌دهند. برای طراحی بهینه و مقایسه عملکرد این دسته از نوسان سازها، ابتدا توسط الگوریتم ژنتیک ابزار طراحی به کمک کامپیوتر پیشنهاد و ارائه گردیده که در آن بهینه‌سازی توان مصرفی و نویزفاز مورد توجه قرار گرفته است.

در ادامه با بررسی ساختار نوسان‌سازهای هماهنگ دوم روش جدیدی برای تزویج هماهنگ‌های مرتبه دوم ارائه می‌شود که منتج به تولید سیگنالهای متعامد و چندفازه مستحکم می‌گردد. همچنین با بررسی نوسان سازهای کولپیتس و جایگزین نمودن آن با نوسان‌سازهای اتصال–ضربدری، نوسان‌ساز متعامدی با تزویج هماهنگ های مرتبه اول از طریق اتصال زیرلایه‌ها (بدنه) و بدون نیاز به هرگونه المان تزویج معرفی و تحلیل می گردد و سپس با معرفی یک گره مدمشترک جدید (با اتصال زیرلایه ها) نوسان‌ساز متعامد هماهنگ دومی با هسته کولپیتس نیز ارائه می شود که درآن از تکنیک حلقه بسته استفاده شده است.

استفاده از مدولاسیون های شیفت فاز در فرستنده–گیرنده های ابزار پزشکی برای ارسال علائم حیاتی بیمار نیاز به گونه‌ای متفاوت از نوسان‌سازهای متعامد، که در آن هدف اصلی کاهش توان مصرفی و اندازه مدار باشد، را ایجاب می‌نماید. از این‌رو در پایان با بهره‌گیری از نوسان سازهای *RC* و تکنیک قفل شدگی تزریق، نوسان ساز متعامد دیگری پیشنهاد می شود که برای پیاده‌سازی در کاربردهای مهندسی پزشکی مناسب می‌باشد.

تمامی مدارهای پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار *ADS* در تکنولوژی*0.18µm RF-CMOS* طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. هچنین جانمایی یکی از نوسان‌سازها در نرم افزار *Cadence* رسم و مدار استخراج شده از این جانمایی توسط نرم‌افزار *Specter-RF* شبیه‌سازی گردیده است.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، قفل‌شدگی تزریق، کولپیتس، نوسان‌ساز متعامد و چندفازه، نوسان‌ساز اتصال-ضربدری، نویزِفاز.

فهرست

فصل ۱ **۱**

پیشگفتار **۱**

۱-۱ انگیزه‌ی این پژوهش ۱

۱-۱-۱ معماری گیرنده های رادیویی ۲

۱-۱-۱-۱ گیرنده هترودین ۲

۱-۱-۱-۲ گیرنده همودین ۳

۱-۱-۱-۳ گیرنده *Low-IF* ۳

۱-۲ روشهای متداول در تولید سیگنالهای متعامد ۵

۱-۲-۱ فیلترهای چندفازه *RC-CR* ۶

۱-۲-۲ تقسیم فرکانس توسط فلیپ فلاپ ۶

۱-۲-۳ به کارگیری نوسان سازهای حلقوی ۷

۱-۲-۴ استفاده از روش سنتزکننده های سیگنال دیجیتال *DSS* ۸

۱-۲-۵ تزویج نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری*LC* ۹

۱-۳ دست‌آوردهای این پژوهش ۱۱

۱-۴ ساختار رساله ۱۱

فصل ۲ **۱۳**

ارائه‌ی یک ابزار طراحی جهت بهینه‌سازی نوسان‌سازهای متداول اتصال-ضربدری*LC* با استفاده از الگوریتم ژنتیک چندهدفه **۱۳**

۲-۱ مقدمه ۱۳

۲-۲ آشنایی با تعاریف اولیه ۱۵

۲-۲-۱ نوسان سازهای اتصال-ضربدری*LC* ۱۵

۲-۲-۲ الگوریتم ژنتیک ۱۵

۲-۲-۲-۳ روش *NSGA* ۱۶

۲-۲-۲-۴ روش *NSGAII* ۱۸

۲-۳ پیادهسازی الگوریتم ژنتیک چندهدفه *NSGAII* و طراحی بهینه نوسانسازهای*LC* ۱۸

۲-۳-۱ مطالعه موردی: طراحی بهینه نوسان ساز*LC* با فرکانس مرکزی ۲/۴*GHz* ۲۱

۲-۳-۲ مقایسه سه ساختار متداول نوسانسازهای*LC* ۲۴

۲-۴ نتیجه گیری ۲۶

فصل ۳ **۲۷**

نوسان‌سازهای متعامد و چندفازه‌ی هماهنگ دوم اتصال-ضربدری*LC* **۲۷**

۳-۱ مقدمه ۲۷

۳-۲ نوسان سازهای متعامدLC با تزویج هماهنگ های مرتبه اول ۲۸
۳-۳ نوسانسازهای متعامد LC با تزویج هماهنگهای مرتبه دوم ۳۰
۳-۴ بررسی مکانیزم‌های تزویج هماهنگ‌های مرتبه دوم و مستحکم (حتمی‌متعامد) بودن نوسان‌ساز متعامد مربوطه ۳۴
۳-۵ نوسان‌ساز متعامد هماهنگ دوم پیشنهادی ۳۵
۳-۵-۱ نتایج شبیه‌سازی نوسان‌ساز پیشنهادی و مقایسه آن با نوسان‌سازهای متعامد گذشته ۳۸
۳-۵-۱-۱ قوت تزویج ۴۲
۳-۵-۲ نوسان‌ساز چندفازه LC با استفاده از روش پیشنهادی ۴۳
۳-۵-۳ بررسی قابلیت دیگر تکنیک‌های تزویج هماهنگ‌های مرتبه دوم در تولید سیگنال‌های چندفازه ۴۴
۳-۶ نتیجه گیری ۴۵
فصل ۴ **۴۷**
نوسان‌سازهای متعامد و چندفازه‌ی کولپیتس **۴۷**
۴-۱مقدمه ۴۷
۴-۲ بررسی نویزفاز در نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری و کولپیتس ۴۸
۴-۲-۱ نوسان‌ساز کولپیتس جریان-سوئیچ شونده ۵۰
۴-۲-۱-۱ شرط شروع نوسان در نوسان‌ساز کولپیتس جریان-سوئیچ شونده ۵۱
۴-۳ نوسان سازهای متعامد با استفاده از تزویج دو نوسانساز کولپیتس ۵۲
۴-۳-۱ نوسان‌سازهای متعامد هماهنگ اول ۵۳
۴-۳-۲ نوسان‌سازهای متعامد هماهنگ دوم ۵۴
۴-۴ نوسان‌سازهای متعامدِ کولپیتسِ پیشنهادی ۵۵
۴-۴-۱ نوسان‌ساز هماهنگ اول ۵۵
۴-۴-۲ تحلیلی بر متعامد بودن نوسان‌ساز پیشنهادی ۵۸
۴-۴-۳ ضریب تزویج و کنترل آن ۶۰
۴-۴-۴ تحلیلی بر نویزفاز نوسان‌ساز متعامد ۶۱
۴-۴-۴-۱ دامنه نوسان و زاویه هدایت در یک نوسان‌ساز کولپیتس ۶۱
۴-۴-۴-۳ سهم نویز ترانزیستور M_1 در نویزفاز خروجی ۶۶
۴-۴-۴-۴ محاسبه سهم نویز ترانزیستور منبع جریان M_{sw} در نویزفاز خروجی ۶۹
۴-۴-۴-۵ محاسبه نویز ناشی از تزریق زیرلایه ۷۱
۴-۴-۵ شبیه‌سازی و مقایسه ۷۳
۴-۴-۶ نوسان‌ساز چندفازه با استفاده از تکنیک پیشنهادی ۷۷
۴-۵ نوسان‌ساز متعامد هماهنگ دوم پیشنهادی ۷۹

۴-۵-۱ شبیه سازی و مقایسه ۸۰
۴-۶ نتیجه‌گیری ۸۲
فصل۵ ۸۴
نوسان‌سازهای متعامد برای کاربردهای مهندسی پزشکی ۸۴
۵-۱ مقدمه ۸۴
۵-۱-۱ ابزار رادیویی در مهندسی پزشکی ۸۵
۵-۲ نوسان‌ساز*RC* و عملکرد آن ۸۶
۵-۳ نوسان‌سازهای متعامد*RC* ۸۷
۵-۴ نوسان‌ساز متعامد*RC* پیشنهادی ۸۸
۵-۴-۱ شبیه‌سازی و مقایسه ۸۹
۵-۴-۲ طراحی یک نوسانساز متعامد *RC* فرکانس پایین برای استفاده در *MICS* ۹۲
۵-۵ نتیجه گیری ۹۳
فصل۶ ۹۵
نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۹۵
۶-۱ نتیجه‌گیری ۹۵
۶-۲ پیشنهادهایی برای ادامه‌ی این پژوهش ۹۷
ضمیمه(الف) ۱۰۰
(الف) نحوه عملکرد نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری و تعریف شاخصه‌ها ۱۰۰
الف-۱ نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری (مقاومت منفی) ۱۰۰
الف-۲ شاخصه‌های تعریف شده برای نوسانسازها ۱۰۲
الف-۲-۱ فرکانس نوسان ۱۰۲
الف-۲-۲ گستره‌ی تنظیم فرکانس ۱۰۳
الف-۲-۳ توان مصرفی ۱۰۴
الف-۲-۴ نویزِفاز ۱۰۴
ضمیمه (ب) ۱۰۵
ب-۱ بررسی رفتار ورکتورهای *MOS* و گستره‌ی تنظیم ۱۰۶
مراجع ۱۰۸

فصل ۱

پیشگفتار

۱-۱ انگیزه‌ی این پژوهش

افزایش تقاضا در حوزه مخابرات بی‌سیم منجر به بروز فرستنده-گیرنده‌هایی نوین با نیازهای جدید گردیده است. تکنیک‌های موجود در حوزه پردازش سیگنال دیجیتال به همراه ارسال اطلاعات دیجیتال سبب ممکن ساختن مدولاسیون ها و دمدولاسیون ها، رمزنگاری و تصحیح خطاهای بسیار پیچیده‌ای شده است که نتیجه آن بهبود قابل توجه کیفیت ارسال و دریافت اطلاعات می‌باشد. از آنجا که پردازش سیگنال‌های دیجیتال بسیار ساده‌تر از پردازش سیگنال‌های آنالوگ می‌باشد همواره تلاش بسیار زیادی در جهت کمینه‌سازی قسمت‌های آنالوگ و در نتیجه انتقال بسیاری از بلوک‌ها به حوزه دیجیتال وجود داشته است.

اما فرکانس بالای سیگنال‌های ارسالی و دریافتی در یک فرستنده-گیرنده[1] سبب تحمیل توان مصرفی نامعقولی بر مبدل‌های داده می‌گردد که این امر سبب شده است همواره پردازش سیگنال‌ها در بلوک ابتدایی-انتهایی[2] فرستنده-گیرنده ها در حوزه آنالوگ باقی بماند. در واقع این بلوک نقش واسط بین آنتن و بخش دیجیتال را بر عهده دارد و

[1] Transceiver
[2] Front-end

عملکرد آن در گیرنده بسیار حساس تر از فرستنده است و پارامترهای مورد نیاز آن در گیرنده بسیار سخت گیرانه‌تر است.

بلوک ابتدایی–انتهایی بسیاری از سیستم‌های مخابراتی مدرن از جمله فرستنده–گیرنده‌های هموداین[1]، سیستم حذف تصویر، بازیابی پالس ساعت و داده[2]، و مدولاتورهای *QPSK* نیازمند به وجود سیگنالهایی با اختلاف فاز ۹۰ درجه می‌باشند. بنابراین نوسان‌سازهای کنترل‌شونده متعامد *(QVCO*[3]*)* بخش اجتناب ناپذیری از هر سیستم مخابراتی پیشرفته و مدرن می‌باشند. پیشرفت‌های مخابراتی و نیاز به دستگاه های ارتباطی همراه، طراحان مدار را به طراحی و ساخت مدارهایی با توان مصرفی پایین، قیمت کم، قابلیت تجمع سازی بالا، نویز کم و سرعت زیاد ملزم می نماید که نوسان‌سازهای چندفازه و متعامد نیز، به عنوان جزئی جداناپذیر از سیستم‌های مخابراتی مدرن، از این امر مستثنا نمی باشند.

به‌منظور تبیین اهمیت وجود سیگنالهای متعامد، اشاره‌ای مختصر به معماری سه فرستنده–گیرنده رادیویی متداول امری ضروری است.

۱–۱–۱ معماری گیرنده های رادیویی

به طور کلی گیرنده‌های رادیویی را می توان به سه دسته تقسیم نمود: ۱– گیرنده‌های هتروداین یا *IF*[4] که از یک یا چند طبقه *IF* تشکیل شده‌اند،۲– گیرنده های هموداین یا *Zero-IF* که سیگنال دریافتی را مستقیماً به باند پایه منتقل می‌کنند، و ۳– گیرنده‌های *Low-IF* که اخیراً به خاطر داشتن مزایای هر دو معماری قبل مورد استقبال طراحان سیستم‌های مخابراتی قرار گرفته است [۱و۲].

۱–۱–۱–۱ گیرنده هتروداین[5]

این ساختار برای مدتی طولانی (بیش از ۷۰ سال) رایج‌ترین ساختار مورد استفاده در فرستنده–گیرنده‌های مخابراتی بوده است. همانطور که در شکل ۱–۱ نشان داده شده است، در این ساختار سیگنال رادیویی دریافتی در طی یک یا چند مرحله به باند میانی منتقل می‌شود. این ساختار می تواند برای انواع مدولاسیون‌ها مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از نظر حساسیت و انتخابگری کانال‌ها نسبت به دیگر ساختارها از کارایی بالاتری برخوردار

[1] Homodyne
[2] Clock data recovery (CDR)
[3] Quadrature voltage-controlled oscillator
[4] Intermediate frequency
[5] Heterodyne

است[۱و۲]. مشکل اصلی این ساختار تداخل فرکانس تصویر و فرکانس دلخواه است زیرا با کاهش فرکانسی[1] انجام شده توسط میکسر، هر دو سیگنال در باند *IF* قرار می گیرند. برای غلبه بر این مشکل در گیرنده هترودین از یک فیلتر حذف تصویر قبل از میکسر استفاده می شود. این فیلتر می بایست تیز و قابلیت انتخاب‌گری بالایی داشته باشد. از اینرو برای پیاده سازی آن به قطعاتی با ضریب کیفیت بالا نیاز می باشد. با توجه به پایین بودن ضریب کیفیت قطعات داخل تراشه ناچار به استفاده از قطعات خارج تراشه[2] می باشیم که مشکلاتی از جمله افزایش سایز (کاهش مجتمع سازی) و افزایش قیمت را به همراه خواهد داشت و با رهیافت مخابرات مدرن مانند دستیابی به یک سیستم بر روی یک تراشه[3] کاملاً در تضاد است.

شکل ۱-۱. ساختار یک گیرنده سوپر هترودین.

۱-۱-۱-۲ گیرنده همودین

برای رهایی از محدودیت های فرستنده های هترودین و افزایش قابلیت مجتمع سازی با حذف قطعات خارج تراشه، در مخابرات مدرن از گیرنده‌های همودین یا انتقال مستقیم[4] استفاده می‌شود. همانطور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است در این گیرنده سیگنال رادیویی دریافتی مستقیماً به باند پایه منتقل می‌شود و به این ترتیب مشکل تداخل فرکانس تصویر با فرکانس مطلوب و نیاز به فیلتر حذف تصویر خارج تراشه منتفی می گردد. اگرچه این ساختار از قابلیت مجتمع سازی بالایی برخوردار است اما حساسیت آن به نویز فلیکر، آفست *DC*، نشتی نوسان‌ساز محلی (که یک نوسان ساز متعامد است) و خطای فاز نوسان‌ساز متعامد طراحی آنرا مشکل می‌سازد به طوریکه، یکی از گلوگاه های طراحی گیرنده های رادیویی مدرن طراحی نوسان‌ساز متعامدی با نویزفاز کم، دقت فاز بالا، توان مصرفی پایین و فرکانس نوسان بالا می‌باشد [۱].

شکل ۱-۲. ساختار یک گیرنده همودین.

۱-۱-۱-۳ گیرنده *Low-IF*

[1] Down-convertion
[2] Off-chip
[3] System on a chip (SoC)
[4] Direct-conversion

گیرنده هترودایِن به علت استفاده از فیلترهای حذف تصویر خارج تراشه دچار محدودیت هایی جدی است. گیرنده هموداین اگرچه محدودیت های ساختار هترودایِن را ندارد و در مخابرات نوین از آن استفاده فراوانی می شود، اما به نوبه خود دارای نقایصی است. ازاینرو طراحان مشتاقانه به دنبال تکنیکی جدید، برای حذف فرکانس تصویر بدون استفاده از فیلتر، بوده اند تا به این ترتیب به معماری از گیرنده ها دست یابند که همزمان مزایای هر دو ساختار هموداین و هترودایِن را در خود داشته باشد. نتیجه این تحقیقات ساختار *low-IF* می باشد. در واقع این ساختار همان ساختار گیرنده‌های هترودایِن است که در آن با استفاده از مداری خاص فرکانس تصویر را حذف می-کنند. به این ترتیب، ساختار *low-IF* بدون نیاز به فیلتر حذف تصویر مشکلات ساختار هترودایِن را نداشته و با دور کردن فرکانس *IF* از صفر معایب ساختار هموداین (*Zero-IF*)را نیز نخواهد داشت. از طرفی به علت کاهش فرکانس *IF* (نسبت به گیرنده‌های هترودایِن) حتی می توان برخی قسمت‌ها را به صورت دیجیتالی نیز پیاده‌سازی نمود. معمولا فرکانس *IF* در این فرستنده ها حدود یک تا دوبرابر پهنای باند سیگنال مورد نظر می باشد.

شکل ۱-۳. معماری حذف تصویر (الف) هارتلی و (ب) ویور.

همان‌طور که بیان شد در این معماری که مزایای قابل توجهی دارد و امروزه مورد استقبال طراحان قرار گرفته است، فرکانس تصویر با استفاده از تکنیک‌هایی غیر از استفاده از فیلترهای حذف تصویر خارج تراشه حذف می گردد. دو تکنیک متداول برای حذف تصویر در این فرستنده عبارتند از معماری هارتلی[1] [۳] و معماری ویور[2] [۴]. ساختار هر دو معماری در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. معماری هارتلی شدیداً به دقت فاز سیگنالهای متعامد (خطای *RC* ناشی از پیاده‌سازی شیفت فاز) حساس بوده و وجود هرگونه خطای فاز (انحراف از ۹۰ درجه) سبب عدم حذف کامل فرکانس تصویر می شود. همانطور که در شکل ۱-۳(ب) ملاحظه می شود در معماری ویور مسیر با شیفت فاز ۹۰ درجه با یک طبقه میکسر دیگر جایگزین شده است تا اثر خطای فاز را تا حد زیادی جبران نماید[۵]. روند حذف فرکانس تصویر در معماری ویور به اختصار در شکل ۱-۴ نشان داده شده است.

شکل ۱-۴. معماری ویور و نحوه حذف فرکانس تصویر.

[1] Hartley
[2] Weaver

نکته اصلی و قابل توجه در این است که در همه سیستم‌های مخابراتی مدرن که از ساختارهای نوین جهت تحقق فرستنده–گیرنده‌های خود استفاده می‌کنند وجود سیگنالهای متعامد (و چندفازه) امری ضروری و اجتناب‌ناپذیر (حداقل تا لحظه نگارش این پایان نامه) می باشد.

به طور کلی کارایی و عملکرد یک نوسان‌ساز متعامد می‌تواند عملکرد کل سیستم مخابراتی را تحت تاثیر خود قرار دهد. مثلا در مدولاسیون *QPSK* که به سیگنالهای متعامد بسیار دقیقی نیاز می باشد، هرگونه انحراف فاز سیگنالهای خروجی *QVCO* از ۹۰ درجه سبب افزایش *BER*[1] در فرستنده یا گیرنده می‌شود. همچنین درگیرنده‌های همودین که سیگنال *RF* مستقیماً به باند پایه منتقل می‌شود هرگونه نویزِفاز مربوط به نوسان‌ساز متعامد، توسط میکسر، مستقیماً به اطلاعات در باند پایه منتقل شده و منجر به افزایش نویز و کاهش صحت[2] اطلاعات ارسالی می-گردد [۶]. همچنین در سیستم های حذف تصویر عملکرد نادرست نوسان‌سازهای متعامد منجر به عدم حذف کامل فرکانس تصویر و حتی تولید تصویر ثانویه می گردد. علاوه بر این، با ظهور سیستم‌های باند پهن[3] به نوسان‌سازهای متعامد و سنتزکننده‌های فرکانسی نیازمندیم که در رنج فرکانسی وسیعی کار کنند.

با توجه به مطالب فوق، طراحی یک نوسان‌ساز متعامد مستحکم با نویز فاز کم، توان مصرفی پایین، دقت فاز بالا و گستره تنظیم فرکانسی وسیع یکی از گلوگاههای طراحی سیستم‌های مخابراتی مدرن با/بدون سیم می باشد. برای تولید سیگنال های متعامد روش های متعددی وجود دارد که در ادامه به متداولترین آنها اشاره خواهد شد.

۱-۲ روشهای متداول در تولید سیگنالهای متعامد

روشهای متفاوتی برای تولید سیگنالهای متعامد وجود دارد که پنج روش متداول آن عبارت است از [۱]: استفاده از فیلترهای چند فازه[4] *RC-CR*، تقسیم فرکانسی توسط فلیپ فلاپ، به کارگیری نوسان‌سازهای حلقوی[5]، استفاده از سنتزکننده‌های سیگنال دیجیتال *(DSS)*[6] و تزویج نمودن نوسان‌سازهای اتصال–ضربدری *LC*[7]. اگرچه به علت عملکرد بسیار خوب نوسان‌سازهای اتصال ضربدری *LC*، روش اخیر کاربرد وسیعی یافته و بیشتر مورد علاقه طراحان مدارهای مجتمع مخابراتی قرار گرفته است اما آشنایی مختصری با روشهای دیگر نیز خالی از فایده نمی‌باشد.

---

[1] Bit Error Rate
[2] Integrity
[3] Ultra wide band (UWB)
[4] Poly-phase
[5] Ring oscillator
[6] Digital Signal Synthesizer
[7] Cross-coupled (connected)

۱-۲-۱ فیلترهای چندفازه *RC-CR* [۷]

ساده‌ترین روش برای تولید سیگنالهای متعامد استفاده از ساختار نشان داده شده در شکل ۱-۵ می باشد. اگر به ورودی این مدار یک سیگنال سینوسی با فرکانس ω اعمال کنیم آنگاه اختلاف فازی برابر با $tan^{-1}(RC\omega)-\pi/2$ و $tan^{-1}(RC\omega)$ به ترتیب در خروجی های V_{out1} و V_{out2} تولید می شود که در نهایت تفاضل خروجی‌های V_{out1} و V_{out2} در همه‌ی فرکانس ها برابر ۹۰ درجه خواهد بود. اما دامنه‌ی این دو خروجی تنها در فرکانس $\omega=1/(RC)$ با هم برابر می شوند. بنابراین اگر مقدار مطلق RC با دما و فرآیند ساخت تغییر کند فرکانسی که در آن دامنه‌ی سیگنال‌ها با هم برابر است نیز تغییر می کند. اگر اطلاعات فقط در نقاط گذر از صفر قرار داشته باشد، می توان با قرار دادن طبقات محدود کننده در مسیر LO، مثلاً زوج‌های دیفرانسیلی، دامنه دو خروجی را یکسان نمود. البته محدود کردن دامنه در فرکانس های گیگاهرتز مشکل است و طبقات محدود کننده می توانند خود سبب تبدیل AM به PM نیز شوند.

شکل ۱-۵. ساختار فیلتر چندفازه *RC-CR*.

مشکل اساسی این مدار خطای فاز ناشی از عدم تطابق اندازه خازن و مقاومت های قابل ساخت بر روی تراشه است. به عبارت دیگر با توجه به اینکه اختلاف فاز ایجاد شده در این مدار کاملاً وابسته به حاصلضرب اندازه خازن و مقاومت (RC) است، هرگونه عدم تطابق در اندازه آنها منجر به انحراف شدید فاز خروجی از ۹۰ درجه خواهد شد. برای بهبود خطای فاز این ساختار روشهایی پیشنهاد شده است که از جمله آنها می توان به روش هیون[1] [۸] اشاره نمود. اما این روش نیز به علت تضعیف سیگنال در مسیر مقاومتی مدار، نیاز به بافر ولتاژ داشته و بنابراین توان مصرفی آن زیاد می باشد.

۱-۲-۲ تقسیم فرکانس توسط فلیپ فلاپ[۹]

[1] Haven

روش دیگری که از آن می توان برای تولید سیگنال‌های متعامد استفاده نمود استفاده از فلیپ فلاپ پایه–پیرو[1] به عنوان مقسم فرکانسی (مانند شکل ۱–۶) می باشد. در این ساختار برای تولید سیگنالهای متعامد با فرکانس ω_1، می-بایست یک سیگنال با فرکانس $2\omega_1$ به ورودی آن اعمال نماییم.

شکل ۱–۶. تقسیم فرکانسی و تولید سیگنال های متعامد.

از مزایای تولید سیگنال متعامد به روش تقسیم فرکانسی می‌توان به کاهش سطح مورد نیاز برای تحقق مدار بر روی تراشه (نسبت به نوسان‌سازهای *LC*) و جلوگیری از اثر *Pushing/Pulling* سیگنال قوی ناشی از خروجی تقویت کننده توان *RF* بر *VCO* در زنجیره فرستنده یک سیستم کاملاً مجتمع (به علت اینکه *VCO* در فرکانسی بسیار بالاتر از فرکانس تقویت کننده توان کار می کند) اشاره نمود.

استفاده از این روش معایبی را نیز به همراه دارد که سبب شده است طراحان مدارهای مجتمع رادیویی علاقه کمتری نسبت به استفاده از آن نشان دهند. مشکل اصلی این روش این است که تولید سیگنال با دو برابر فرکانس مورد نظر در فرکانس‌های بالا بسیار مشکل است و نیاز به توان مصرفی زیادی دارد و حتی ممکن است محدودیت های تکنولوژیِ ساخت اجازه تولید چنین فرکانس‌هایی را ندهد. همچنین در این روش، انحراف چرخه‌ی کار[2] سیگنال ورودی از ۵۰٪ سبب نامتعادل شدن فاز خروجی و خطای فاز می‌شود. برای مثال اگر سیگنال ورودی V_{in} شامل هماهنگ های مرتبه دوم باشد آنگاه خروجی‌ها دچار عدم تقارن فاز می شوند. همچنین ناهمسانی‌های مسیر سیگنال که از درون لچ ها عبور می کند نیز خود باعث خطای فاز می‌گردد.

۱–۲–۳ به کارگیری نوسان سازهای حلقوی [۱۰]

در دو روش قبل برای تولید سیگنال متعامد از انتقال و جابجایی سیگنال استفاده شده است. روشی که می‌توان توسط آن به طور مستقیم سیگنالهای چندفازه و متعامد تولید نمود، استفاده از نوسان‌سازهای حلقوی (شکل ۱–۷) می‌باشد. نوسان‌سازهای حلقوی هیچ مدار تشدیدی ندارند. اساس کار این ساختارا به این ترتیب است که هر طبقه از نوسان‌ساز حلقوی به عنوان یک المان تاخیر (شکل ۱–۷(الف)) عمل می کند و چون تاخیر فاز کل حلقه برابر با ۳۶۰ درجه است با قرار دادن چهار طبقه‌ی همسان در طول حلقه، خروجی هر طبقه نسبت به طبقه‌ی بعد، ۹۰ درجه پیشفاز خواهد بود. البته در نوسان‌سازهای حلقوی برای داشتن نوسانی پایدار باید تعداد طبقات فرد (شکل ۱–

[1] Master-Slave
[2] Duty-cycle

۷(ب))باشد در حالیکه برای رسیدن به اختلاف فاز ۹۰ درجه نیاز به تعداد زوجی از المان های تاخیر می‌باشد. برای حل این مشکل دو راه حل مطرح شده است. اولین راه حل پیشنهادی استفاده از ساختارهای اینورتر تفاضلی و دومین راه حل که در شکل۱-۷(ج) ملاحظه می شود، اضافه کردن اینورترهای مسیر مستقیم در بین گره‌هایی که سیگنال‌هایی با فاز متضاد دارند، می باشد [۱۰].

از مزایای نوسان‌ساز حلقوی متعامد می‌توان به گستره‌ی تنظیم وسیع آن در فرکانسهای بالا و قطعیت فاز خروجی‌ها اشاره کرد. ولی معایبی همچون نویزِفاز بسیار بد و توان مصرفی زیاد این ساختار، استفاده از این روش را در کاربردهای *RF* منسوخ نموده است.

شکل ۱-۷. (الف) ساختار پایه ی هر طبقه، (ب) نوسان سازحلقوی و (ج) نوسان سازحلقوی با خروجی های متعامد.

۱-۲-۴ استفاده از روش سنتزکننده های سیگنال دیجیتال *DSS*

برای تولید سیگنال های متعامد کافی است دو شکل موج سینوسی و کسینوسی را به طور همزمان تولید نمود که استفاده از سنتزکننده‌های سیگنال یک راه حل ممکن می باشد. در [۱۱و۱۲] استفاده از روش *DSS* برای تولید سیگنال‌های متعامد مفصلاً توضیح داده شده است. از آنجا که استفاده از این روش در طراحی‌های فرکانس بالا دچار محدودیت هایی است، در این بخش تنها به شرح مختصری از این روش اکتفا شده است.

ساختار *DSS* شامل دو قسمت متمایز از هم می‌باشد. همانطور که در شکل ۱-۸ ملاحظه می شود این دو قسمت عبارتند از: مولد فازِ زمان-گسسته و مبدل فاز به شکل موج. اصلی‌ترین قسمت مولد فاز زمان-گسسته، یک *LUT*[1] می‌باشد که مقادیر عددی مربوط به یک پریود از شکل موج سینوسی در آن ذخیره شده است. مبدل فاز به شکل موج، از یک مبدل دیجیتال به آنالوگ *DAC*[2] و یک فیلتر آنالوگ تشکیل شده است که وظیفه آن تبدیل نمونه‌های موجود در *LUT* به شکل موج آنالوگ می باشد. آنچه کارایی این روش را محدود می کند، کارایی مبدل دیجیتال به آنالوگ می‌باشد به طوریکه پیشرفت سنتزکننده های دیجیتال کاملاً منوط به پیشرفت مبدل‌های دیجیتال به آنالوگ می باشد.

دو مشخصه ی مهم هر مبدل دیجیتال به آنالوگ که کارایی روش *DSS* را تحت تاثیر قرار می دهد عبارتند از: فرکانس کاری و *SFDR*[3].

[1] Look up table
[2] Digital to analog converter
[3] Spurious free dynamic range

شکل ۱-۸ بلوک دیاگرام *DSS*.

حداکثر فرکانس قابل تولید توسط این ساختار حدود چند صد مگاهرتز می باشد؛ بنابراین قابل کاربرد در سیستم های *RF* با فرکانس چند گیگاهرتز نیست. همچنین سیگنال سینوسی تولید شده به علت محدودیت تفکیک مبدل دیجیتال به آنالوگ دارای اعوجاج است. لذا اصلی‌ترین چالش این روش، پایین بودن فرکانس و درجه‌ی خلوص سیگنال خروجی می باشد. تاکنون روش‌های زیادی برای حل این دو چالش ارائه و پیشرفت‌های خوبی نیز حاصل شده است، اما هنوز استفاده از این روش مورد استقبال طراحان *RF* قرار گرفته نشده است.

مراحل تولید یک موج سینوسی توسط روش *DDS* در شکل ۱-۹ نشان داده شده است که با قرار دادن نمونه‌های یک موج سینوسی و کسینوسی در *LUT* می توان سیگنال های متعامد (و چندفازه) را نیز به همین ترتیب تولید نمود.

از مزایای استفاده از این روش برای تولید سیگنالهای متعامد می‌توان به قابلیت انعطاف بالا، قابلیت تنظیم بسیار دقیق و سریع فرکانس خروجی و تمام دیجیتال بودن این ساختار اشاره نمود.

شکل ۱-۹. مراحل سنتز دیجیتالی یک موج سینوسی.

۱-۲-۵ تزویج نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری*LC*

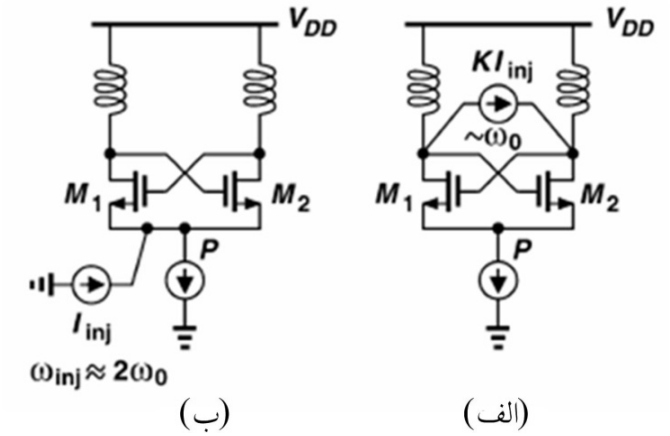
تزویج دو نوسان‌ساز اتصال-ضربدری*LC* روش دیگری برای تولید سیگنالهای متعامد است که به علت نویزِفاز و توان مصرفی کم آن امروزه شدیداً مورد استفاده و استقبال طراحان مدارهای مخابراتی مجتمع قرار گرفته است. نوسان‌سازهای متعامد*LC* و یا همان *LC-QVCO*ها از تزویج دو نوسان‌ساز اتصال-ضربدری (یا مقاومت منفی) کاملاً یکسان ساخته شده است که هسته آن در شکل ۱-۱۰ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود هر نوسان-ساز اتصال-ضربدری*LC* متشکل از یک مدار تشدید یا تانک *LC* و ترانزیستورهای اتصال-ضربدری که با ایجاد یک مقاومت منفی انرژی لازم جهت نوسان را فراهم می کنند.

شکل ۱-۱۰. ساختارهای رایج نوسان ساز اتصال ضربدری(مقاومت منفی) *LC*.

در سال ۱۹۴۰ آدلر دریافت اگر به یک نوسان‌ساز، تحت شرایطی خاص سیگنالی با فرکانس نزدیک به فرکانس نوسان یا نزدیک به یکی از هماهنگ‌های آن تزریق شود، نوسان‌ساز در فرکانس نوسان سیگنال تزریق شده شروع به نوسان خواهد کرد که معمولاً به این پدید قفل شدگی تزریق[1] گفته می شود. در [۱۳] نشان داه شده است که در صورت تزریق یک سیگنال خارجی به نوسان‌ساز دو حالت ممکن است رخ دهد:

۱. سیگنال تزریق شده ممکن است سبب همزمانی[2] در فاز و دامنه‌ی سیگنال خروجی نوسان‌ساز شود.

۲. اگر سیگنال تزریق شده از خارج آنقدر قوی نباشد که سبب همزمانی شود، تنها سبب تغییر و تاخیر فاز خروجی نوسان‌ساز می گردد که از این تکنیک در تزویج نوسان سازهای متعامد استفاده می‌شود.



شکل ۱-۱۱. تزریق هماهنگ‌های (الف) مرتبه اول به گره‌های تفاضلی و (ب) مرتبه دوم به گره مدمشترک (برای خوانایی از رسم ورکتورها صرفنظر شده است).

در نوسان‌سازهای متعامدLC معمولاً سیگنال‌هایی از یک هسته نوسان‌ساز به هسته دیگر و بالعکس تزریق می-شود. بسته به اینکه سیگنال تزریق شده جزء هماهنگ های مرتبه اول (فرد) یا مرتبه دوم (زوج) باشد نوسان‌ساز متعامد مربوطه را به ترتیب نوسان‌ساز متعامد هماهنگ اول[3] (شکل ۱-۱۱(الف)) و هماهنگ دوم[4] (شکل ۱-۱۱(ب)) می نامند.

روش اخیر، یعنی تزویج دو نوسان‌ساز اتصال ضربدریLC، از کارایی و عملکرد بهتری نسبت به دیگر روش‌های موجود برخوردار است و بسیاری از نیازهای مدارهای مخابراتی نوین را برآورده می کند؛ به طوریکه در اغلب کاربردهای مخابراتی فرکانس بالا از این نوع نوسان‌ساز استفاده می‌شود. از آنجا که موضوع مورد تحقیق در این

[1] Injection locking
[2] Synchronization
[3] First-harmonic QVCO
[4] Superharmonic QVCO

رساله نوسان‌سازهای متعامد و چندفازه تزویج شده است از تشریح بیشتر آن در این فصل خودداری نموده و در فصل های بعد به طور مفصل به تشریح و بررسی آن خواهیم پرداخت.

۱-۳ دست‌آوردهای این پژوهش

در این پژوهش در راستای بهینه‌سازی و بررسی رفتار نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری، یک ابزار طراحی کامپیوتری ارائه می‌گردد [a][1]. سپس نوسان‌سازهای متعامد هماهنگ دوم مورد بررسی قرار گرفته و روش جدیدی برای تزویج هماهنگ‌های مرتبه‌ی دوم [b] و تولید سیگنال‌های متعامد و چندفازه با کارایی نویزفاز بالا ارائه خواهد شد [c]. همچنین برای تولید سیگنال‌های متعامد با استفاده از نوسان‌سازهای کولپیتس و تزویج هماهنگ‌های مرتبه‌ی اول، ساختاری ارائه می‌گردد که سیگنال‌های چندفازه را با کارایی بسیار بالایی تولید می‌کند[d]. علاوه بر این، نوسان‌سازهای دیگری از جمله نوسان‌ساز متعامد RC برای کاربردهای مهندسی پزشکی ارائه خواهد شد که مقالات آن در حال تهیه می‌باشد.

۱-۴ ساختار رساله

نوسان‌سازهای اتصال-ضربدریLC که هسته اکثر نوسان‌سازهای متعامد تزویج شده را تشکیل می‌دهند دارای سه پیکره‌بندی متفاوت می‌باشند که از نظر کارایی با یکدیگر متفاوتند. بنابراین قبل از بررسی نوسان‌سازهای متعامد، در فصل بعد، ابتدا به بررسی سه پیکره‌بندی متداول از نوسان‌سازهای اتصال-ضربدری پرداخته و کارایی آن ها توسط یک ابزار بهینه‌سازی پیشنهادی مورد بررسی قرار می گیرد.

در فصل سوم، ابتدا نوسان‌سازهای متعامد هماهنگ اول و دوم تشریح شده و سپس نوسان‌سازهای هماهنگ دوم ارائه شده در مقالات بررسی و مزایا و معایب هر کدام بیان می‌گردد. در انتهای این فصل با جمع‌بندی تکنیک‌های موجود در تزویج هماهنگ‌های مرتبه دوم روشی برای تزویج هماهنگ‌های مرتبه دوم و تولید سیگنال‌های متعامد

[1] رجوع کنید به انتهای مراجع.

پیشنهاد شده و بر اساس آن نوسان‌ساز متعامد هماهنگ دومی طراحی و شبیه سازی می‌گردد که از کارایی بسیار خوبی برخوردار است.

در فصل چهارم پس از مقایسه‌ی کارایی نویزفاز یک نوسان‌ساز کولپیتس و یک نوسان‌ساز اتصال–ضربدریLC و تشریح این موضوع که ساختار نوسان‌ساز کولپیتس پتانسیل بالاتری را از نظر نویزفاز نسبت به ساختار نوسان‌ساز اتصال–ضربدری داراست، نوسان‌ساز متعامد هماهنگ اولی پیشنهاد داده می‌شود که هسته آن یک نوسان‌ساز کولپیتس است و شبکه تزویج آن هیچ المان اضافی ندارد. در ادامه، پس از ارائه یک تحلیل جهت اثبات متعامد بودن خروجی های این نوسان‌ساز، با رسم جانمایی[1] و شبیه سازی آن نشان داده می‌شود که این نوسان‌ساز از کارایی نویزفاز بسیار بالایی برخوردار می باشد.

اگرچه نوسان‌سازهای RC[2] نسبت به نوسان سازهای LC از کارایی نویزفاز کمتری برخوردارند اما به علت عدم وجود مدار تانک (خودالقا) سطح بسیار کمتری را بر روی تراشه اشغال نموده و از قابلیت مجتمع‌سازی بسیار بالایی برخوردارند. بنابراین در کاربردهایی مانند مهندسی پزشکی که کاهش سایز تراشه از اهمیت زیادی برخوردار است نوسان‌سازهای RC می توانند کاربرد بیشتری داشته باشند. به دلیل استفاده از مدولاسیون های مختلف از جمله $QPSK$ و نیاز به سیگنال‌های متعامد در فرستنده–گیرنده‌های ابزار مهندسی پزشکی (مانند ارسال عکس هایی از کپسول آندوسکوپ و ..)، در فصل پنجم نوسان‌ساز متعامدی با استفاده از تزویج دو نوسان‌ساز RC و اتصال زیرلایه-ها ارائه شده است که برای کاربردهای مهندسی پزشکی مناسب می‌باشد. در فصل پایانی، پس از نتیجه گیری و جمع‌بندی کارهای انجام شده، به پیشنهاد کارهایی که در ادامه‌ی این پژوهش می‌توان انجام داد پرداخته می‌شود.

[1] Layout
[2] Relaxation oscillator