دانشگاه صنعتی شریف

دانشکدهٔ مهندسی برق

۱۳۸۰ /۱۰/ ۲۱

016396

۳۹۶۴۸

رسالهٔ کارشناسی ارشد

طراحی و ساخت

مخلوط‌کنندهٔ فعال مایکروویو (بالابرندهٔ فرکانس) در باند C

بر اساس تحلیل غیر خطی بروش توازن هارمونیکی

نگارش: ناصر ندا

استاد راهنما: دکتر فروهر فرزانه

شهریور ۱۳۷۳

۳۹۶۴۸

اعضای محترم هیئت ممتحن

۱ـ دکتر فروهر فرزانه

۲ـ دکتر کسری برکشلی

۳ـ دکتر علی فتوت‌احمدی

۴ـ دکتر روزبه معینی مازندرانی

۳۹۴۷۵

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که علاقه به آموختن را در من پروراندند

و

به همسر مهربانم که همواره مشوق من بود.

تقدیر نامه:

در اینجا لازم است که قدردانی صمیمانهٔ خود را از زحمات و پی‌گیریهای استاد محترم، دکتر **فروهر فرزانه** که در طی انجام این رساله همواره راهنمای بنده بوده‌اند، ابراز کرده و برای ایشان از خداوند متعال **توفیق و سلامتی** آرزو نمایم.

همچنین بدین وسیله از آقایان آجودانی و قدس به لحاظ کار دقیقشان در چاپ بُرد مایکروویو و تراش جعبه مدار، تشکر می‌کنم.

چکیده

در سالهای اخیر و به موازات گسترش مدارهای مجتمع مایکروویو (MMIC) نیاز به برنامه‌های سریع غیرخطی جهت تحلیل و بهینه‌سازی طرح روز به روز افزایش یافته است. مشکلات عدیده تحلیل به روش‌های سنتی حوزه زمان (مانند آنچه در برنامه مشهور Spice شاهدیم) تحقیقات در این زمینه را برای روشهای نوین حوزه فرکانس یا مخلوط حوزه فرکانس و زمان متمرکز نموده است.

از طرفی تحلیل مخلوطکننده‌های فعال در حوزه فرکانس، جهت رسیدن به نقطه کار بهینه، بدلیل ماهیت کاملاً غیرخطی و تحریک‌های چندفرکانسی جزو مشکل‌ترین موضوعات تحلیل بوده و در زمینه ساخت مخلوطکننده‌های فعال U.C[1] نیز کارهای محدودی به چشم می‌خورد.

در این رساله، هدف اولیه بررسی و مقایسه روشهای مختلف تحلیل و پیاده‌سازی نرم‌افزاری توازن هارمونیکی[2] و تعمیم آن به مخلوطکننده‌های فعال را دنبال کرده و طراحی و ساخت یک مخلوطکننده مایکروویو از نوع U.C و در باند C، بر اساس الگوریتم‌های پیاده‌سازی شده، مقصد نهایی بوده است.

فصل ۱ صرف مقایسه روشهای پایه و بسط رئوس توازن هارمونیکی شده است.

مدل‌سازی دقیق یک ترانزیستور مایکروویو خود مقوله‌ای جداگانه است و مسائل خاص خود را دارد و از آنجا که هدف نهایی پیاده‌سازی یک طرح فعال و براساس تحلیل کامپیوتری بوده و این مستلزم بدست آوردن یک مدل دقیق از ترانزیستور است، روش‌های مدل‌سازی ترانزیستورهای MESFET در فصل ۲ مورد توجه قرار گرفته و در نهایت مدل قابل‌قبولی نیز استخراج گردیده است.

در فصل ۳ ضمن معرفی یک روند معتبر برای پیاده‌سازی توازن هارمونیکی، بسط این روند به تحریک دو فرکانس اختیاری با تحریک‌های قوی ـ ضعیف و تحریک‌های قوی، به‌ترتیب مورد توجه قرار گرفته و حاصل آن به صورت سه زیر برنامه که تحت یک برنامه اصلی عمل می‌کنند پیاده‌سازی شده است.

فصل ۴ مسائل طرح و مراحل ساخت و آزمایش مخلوطکننده‌های فعال را در حد ممکن معرفی می‌کند. در این فصل طرح مورد نظر جهت ساخت یک مخلوطکننده U.C فعال در باند C، براساس نرم‌افزار پیاده‌سازی شده در فصل ۳، بدست آمده و نقاط کار بهینه مشخص می‌شوند و براین اساس به ساخت و بهینه‌سازی طرح فوق اقدام

---

[1] Up Converter

[2] Harmonic Balance

می‌گردد. در انتهای فصل نیز مشخصات مهم مخلوط‌کننده‌ها مورد توجه قرار گرفته و به‌اندازه‌گیری و مقایسه آنها با نتایج تئوری پرداخته شده است.

فهرست مطالب

۰ مقدمه ۹

۱ روشهای پایه در تحلیل غیرخطی مدارهای مایکروویو ۱۲

۱.۱ روشهای حوزه زمان ۱۳

۱.۲ روشهای حوزه فرکانس ۱۵

۱.۲.۱ توصیف توازن هارمونیکی ۱۷

۱.۲.۲ تصحیح خطا در روند توازن هارمونیکی ۲۲

۱.۲.۳ روش بهینه‌سازی ۲۴

۱.۲.۴ روش spilitting ۲۵

۱.۲.۵ روش نیوتن ۲۶

۱.۲.۶ تابع هدف یا نشانه همگرایی ۲۷

۲ مدل‌سازی ترانزیستورهای GaAs MESFET[۳] ۲۹

۲.۱ ساختمان فیزیکی MESFETو معادل‌های مداری آن ۳۰

۲.۲ انتخاب مدل و الگوریتم استخراج عناصر آن ۳۱

۲.۲.۱ استخراج مقادیر Rg، Rs، Rdو دیودهای Dgsو Dgd ۳۶

۲.۲.۲ استخراج مشخصه غیرخطی Ids($v'gs$ و $v'ds$) ۴۵

۲.۲.۳ استخراج رابطه غیرخطی Cgs و Cgd، عناصر پارازیت و Cds ۵۱

۳ تعمیم و پیاده‌سازی توازن هارمونیکی جهت تحلیل کلی مخلوط‌کننده‌های مایکروویو ۵۶

۳.۱ تحریک‌های هارمونیکی ۵۷

۳.۲ تحریک‌های چندگانه اختیاری (مخلوط‌کننده‌های فرکانسی) ۶۴

۳.۲.۱ تحلیل مخلوط‌کننده با تحریک قوی ـ ضعیف (L-S[۴]) ۶۶

۳.۲.۲ تحلیل مخلوط‌کننده با تحریک‌های اختیاری ۷۲

۴ طراحی، ساخت و آزمایش مخلوط‌کننده فرکانسی فعال در باند C ۸۴

۴.۱ یک دسته‌بندی کلی ۸۵

۴.۲ ایده‌های اساسی طراحی ۸۸

۴.۳ طرح و ساخت یک فیلتر باند باریک میکروستریپی ۹۱

۴.۴ تحلیل، طراحی و ساخت مخلوط‌کننده فعال U.Cدر باند C ۹۵

۴.۴.۱ تحلیل پایداری ۹۸

۴.۴.۲ طرح مدارهای تطبیق، فیلتر خروجی و مدار بایاس ۹۹

۴.۴.۳ طرح مدار تثبیت و تأخیر بایاس و جعبه‌بندی ۱۰۲

۴.۵ اندازه‌گیری مشخصات سیستمی مخلوط‌کننده و مقایسه با نتایج تئوری ۱۰۳

۴.۵.۱ بهره تبدیلی برحسب نقطه کار و توان lo. ۱۰۳

۴.۵.۲ عرض باند if ۱۰۴

۴.۵.۳ اشباع ۱۰۵

۴.۵.۴ جداسازی lo-ifو تلف توان loبین ورودی و خروجی ۱۰۶

۴.۵.۵ پاسخهای ناخواسته[۵] ۱۰۷

۴.۶ نویز ۱۰۷

ضمائم

۱ ۱۱۰

۱.۱ض معرفی نرم‌افزار (Harmonic-Balance) ۱۱۰

۱.۲ض‌الگوریتم اجرا ۱۱۳

۲ فیلترهای میان‌گذر باند باریک و الگوریتم طراحی. ۱۱۶

۳ مدل‌ها و روشهای اندازه‌گیری نویز مخلوط‌کننده‌ها ۱۱۹

۳.۱ض‌مدل‌ها ۱۱۹

۳.۲ض‌اندازه‌گیری نویز مخلوط‌کننده‌های فرکانسی ۱۲۳

• مراجع ۱۲۶

مقدمه

مدارهای گوناگون مایکروویو از قبیل نوسان‌سازها، مخلوط‌کننده‌ها، تقویت‌کننده‌ها، ضرب‌کننده‌ها و غیره که توسط قطعاتی چون ترانزیستور یا دیود مایکروویو ساخته می‌شوند، جملگی در داشتن یک ساختار غیرخطی، مشترک می‌باشند. لذا روشهای تحلیل این مدارها، از نقطه‌نظرهای مختلفی به همدیگر شبیه بوده و مستقل از نوع مدار به شاخه‌هایی چند تقسیم می‌گردد.

با گسترش روزافزون مدارهای مجتمع مایکروویو و بدلیل ساخت عناصر فعال، قابل کاربرد در فرکانس‌های بالا (چند ده گیگاهرتز) از قبیل ترانزیستورهای MESFET و نوع جدیدتر آن HEMT و تمرکز کار در حوزه فرکانسی مذکور، جنبه‌های مختلفی از نقطه‌نظر تحلیل مدارهای فوق پیش آمده است.

ساخت مدارها با کیفیت و دقت زیاد، ضمن کار در حوزه فرکانسی مایکروویو به همراه گسترش سرعت و کارآیی کامپیوترها، رفته‌رفته، توجه را از روشهای دستی به تحلیل‌های دقیق غیرخطی معطوف نموده و تجاری شدن ترانزیستورهای مایکروویو با توان زیاد و فرکانس کار بالای چند ده گیگاهرتز، که از مدل مداری پیچیده‌تر با عناصر غیرخطی متنوع‌تری (نسبت به عناصر غیرفعال) برخوردارند، نیاز به برنامه‌های سریع با پوشش رفتار غیرخطی را حتمی نموده است.

به دلایلی که در مبحث مقایسه روشها می‌بینیم، روشهای حوزه زمان که برمبنای حل عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر مدار با شروع از یک حالت اولیه عمل می‌کنند، در تحلیل مدارهای فوق مخصوصاً آنها که از عناصر گسترده مانند خطوط انتقال، فیلترهای گسترده و تغییردهنده‌های فاز تشکیل شده‌اند یا از تحریک‌های چند فرکانسی با فاصله فرکانسی زیاد برخوردارند (و در مایکروویوپرکاربرد نیز می‌باشند)، اقبال خود را از دست داده‌اند، چنانکه در هیچکدام از یکی دو نرم‌افزار جدید معرفی شده در سالهای اخیر، جهت تحلیل مدارهای غیرخطی مایکروویو این روشها عملاً بکار نرفته و در عوض روشهای جدیدتر حوزه فرکانس گسترش بیشتری یافته‌اند.

از طرفی این برنامه‌ها از هر نوعی که باشند به نوبه‌خود، نیازمند وجود مدلی دقیق از قطعات مایکروویو بکار برده شده در مدار خصوصاً مدل ترانزیستورها خواهند بود. لذا در کنار مسئله تحلیل، روش‌های مدل‌سازی دقیق ترانزیستورهای مایکروویو به نحوی که در محدوده فرکانسی موردنظر، معتبر بوده و عملکرد غیرخطی آنرا نیز به خوبی بیان کند، به‌طور مستقل توسط محققان مختلف مورد کنکاش و بررسی قرار گرفته و می‌گیرد.

ما در این رساله به هر دو شاخه در حد توان خواهیم پرداخت. یعنی خواهیم کوشید که اولاً: با بررسی و

بکارگیری روشهای نظری معتبر جهت مدل‌سازی و تلفیق آنها، یک روند پله‌به‌پله، قابل تکرار و بالنسبه دقیق را برگزیده و براساس این روند و آزمایشهایی که انجام می‌دهیم، مدل مداری مناسبی را برای یک ترانزیستور MESFET با شماره (CFY 18-23) استخراج کنیم. این ترانزیستور بعداً درتحلیل و ساخت مخلوط‌کننده (UC) باند C عنصر پایه خواهد بود. ثانیاً: جهت ورود به مبحث تحلیل مدارهای مایکروویو گسترده (از جهت تعداد و نوع عناصر) روش‌های مختلف مطرح در این زمینه را بررسی و به پیاده‌سازی نرم‌افزاری روند برگزیده بپردازیم. هرچند که در این پیاده‌سازی، فراهم آوردن یک محیط همه منظوره، مورد نظر نخواهد بود.

از مسائل مهم دیگری که در الگوریتم‌های حوزه فرکانس پیش خواهد آمد، مسئله تعداد فرکانس‌های تحریک و رابطه آنها با همدیگر از یک سو و دامنه تحریکات مختلف مدار از سوی دیگر است. خواهیم دید که رابطه فرکانس‌های تحریک (مثلاً اینکه آیا کوچکترین مقسوم‌علیه مشترکی دارند یا نه؟) مخصوصاً در بحث تبدیلات حوزه فرکانس و زمان بسیار مهّم بوده و میتواند الگوریتم‌هایی را کارآ کرده یا از فایده بیاندازد. در این رساله تبدیلات حوزه زمان و فرکانس برای سیگنال‌های غیرتناوبی که تا به امروز نیز مورد بررسی است و قدرت سیگنال‌هال تحریک در فرکانس‌های مختلف، مورد توجه قرار گرفته و طی ۳ زیربرنامه به نامهای ST[۴]، CM[۵] و FH[۶] به ترتیب، تحلیل مدارهای تک یا چند ورودی با فرکانس‌های هارمونیکی، مدارهای با تحریک دوگانه و فرکانس‌های اختیاری ولی توان‌های ورودی ضعیف و قوی و مدارهای با تحریک اختیاری با توان‌های ورودی دلخواه، تحت یک برنامه کلی پیاده‌سازی شده است.

ما ضمن مقایسه نتایج زیربرنامه‌های این برنامه جهت طرح‌های مختلف، از آن جهت ساخت یک مخلوط‌کننده فعال (UC) خاص نیز بهره خواهیم برد. مخلوط‌کننده فوق که دارای فرکانس‌های تحریک ورودی (۶۰ MHz) IF، (۴/۲ GHz) LO و خروجی (۴/۱۴ GHz) RF می‌باشد، بدو دلیل، خاص قلمداد می‌شود.

یکم: در زمینه مخلوط‌کننده‌های فعال، با ترانزیستور MESFET و به صورت (UC) با تبدیل فرکانسی مشابه گزارشهای معدودی وجود دارد که آنها نیز نشان می‌دهند ترانزیستورهای فوق دراین زمینه به خوبی مخلوط‌کننده‌های

---

[۴] Single Tone

[۵] Conversion Matrices

[۶] Full Harmonic Balance

(DC)[۷]، ازجهت بهره تبدیلی، عمل نمی‌کنند و نیازمند تحلیل دقیق جهت رسیدن به یک عملکرد مناسب (به‌صورت نسبی) می‌باشند.

دوّم: اختلاف فاحش فرکانس‌های ورودی ۶۰ MHz و ۴/۲ GHz، مشکلات عملی فراوانی را پیش می‌آورد. در خروجی نزدیکی RF , LO (۴/۱۴, ۴/۲) به فلیترهای باند باریک با عرض باند کم‌تر از یک درصد احتیاج دارد که پیاده‌سازی این فیلتر توسط طرح میکروستریپی در حد خود قابل تأمل است. به‌دلیل همین نزدیکی شدید فرکانس‌های تداخلی به‌هم، اتصال کوتاه کردن RF در ورودی و LO در خروجی خود مشکل دیگری است. به هر تقدیر، کوشش کرده‌ایم که براساس نتایج تحلیل غیرخطی که ذکر آن رفت و توجه به جنبه‌های مختلف عملی، تاحد ممکن به بهینه‌سازی و پیاده‌سازی طرح مخلوط‌کننده فوق همت بگماریم.

---

[۷] Down Converter

فصل ۱

روشهای پایه در تحلیل غیرخطی مدارهای مایکروویو

مقدمه

در این فصل برآنیم که به بررسی و مقایسه روشهای پایه در تحلیل غیرخطی بپردازیم. همانطور که در مقدمه آمد، در سالهای اخیر کوشش‌های فراوانی در این زمینه انجام شده که اولین نتیجه آن پدید آمدن روشهای متعدد از یک سو و الگوریتم‌های متعددتر برای پیاده‌سازی هر یک از روشهای فوق از سویی دیگر است. به عنوان نمونه تنها در زمینه روشهای تحلیل و بین سالهای ۸۸ – ۱۹۸۰ حدود ۴۰۰۰ مقاله انتشار یافته [**۱۷**] و لذا بسط و مقایسه تک تک آنها، وقت و حجم زیادی از نوشتار را می‌طلبد. ما در بحث مقایسه، تنها به بیان اصول کلی و محدودیت‌های بعضی از اساسی‌ترین آنها پرداخته و خواننده علاقه‌مند را به مراجع متعددی در این زمینه رجوع می‌دهیم. لکن روشهای برگزیده شده، جهت پیاده‌سازی در این رساله که همراه تعمیمهای خود جزو اساسی‌ترین و مطرح‌ترین روشها در سالهای اخیر می‌باشند، به طور دقیق‌تری معرفی خواهد شد. طبیعی است که در همهٔ مراحل تأکید بر قابلیت گسترش الگوریتم به مدارهای کاملاً غیرخطی (غیرخطی قوی) با تحریک چند فرکانس و با فرکانس‌های اختیاری می‌باشد. لازم به یادآوری است که عملکرد غیرخطی مدار نتایجی از قبیل تولید فرکانسهای تداخلی (در تحریک چند فرکانسی)، ایجاد مضارب هر فرکانس ورودی، اشباع، انتقال مدولاسیون بین سیگنال‌های تحریک، تبدیل AM به PM و غیره را بوجود می‌آورد که یک برنامه تحلیل غیرخطی در صورت لزوم باید بتواند، پدیده‌های فوق را به خوبی تحلیل نماید.

مسائل شبیه‌سازی مدارات غیرخطی مایکروویو از دید موضوعی را، می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد.

۱. شبیه‌سازی یک طرح مشخص

۲. بهینه‌سازی

۳. مسائل تحریک چند فرکانسی

۴. تبدیل فرکانسی

۵. تحلیل پایداری

۶. تحلیل نویز

در طی پانزدهمین کنفرانس مایکروویو اروپا[1] تقسیم‌بندی جامعی نیز از دید روشهای موجود ارائه شده که جدول (۱_۱) فرم خلاصه‌شده‌ای از آن را بیان می‌کند. ضعف و قدرت هرکدام از روشها در برخورد با مسائل بیان شده در بالا سنجیده می‌شود.

۱.۱ روشهای حوزه زمان

روش حوزه زمان براساس پیاده‌سازی معادلات دیفرانسیل غیرخطی ناشی از مجموعه عناصر خطی و غیرخطی، حاکم بر مدار و حل آنها با مثلاً انتگرال‌گیری پله‌به‌پله و براساس حالات اولیه عمل می‌کند، که نمونه آن را در نرم‌افزارپرکاربرد spice شاهدیم. در این نرم‌افزار محاسبات غیرخطی در حوزه زمان انجام می‌گیرد امّا، بدلایل زیر تعمیم این روش در حالت کلی به یک برنامه همه منظوره مدارات مجتمع مایکروویو مفید نیست.

اول اینکه، تنها راه اندازه‌گیری صحیح عناصر خطی مایکروویو کار در حوزه فرکانس و اندازه‌گیری‌های مربوط به آن مثلاً پارامترهای S است.

دوم: تعریف ساده‌ترین عناصر گسترده مایکروویو مانند خط میکرواستریپ با ثابت انتشار یا امپدانس مشخصه تابع فرکانس در حوزه زمان کاری بسیار مشکل (اگر نه ناممکن) بوده و حتی خطوط ایده‌آل میکرواستریپ که در

---

[1] 15Th European Microwave Conference (in paris)

جدول ۱.۱ : تقسیم‌بندی کلی از روشهای تحلیل غیرخطی.[۱۷]

		توصیف جزء غیرخطی	
		حوزه زمان	حوزه فرکانس
خطی	زمان	Direct Integration Shooting Methods Extrapolation Methods	
	فرکانس	Harmonic Balance System Solving Continuation Methods Relaxation Methods Sample Balance	Power Series

شکل خطوط انتقال، کوپلرها و غیره بکار می‌روند به سختی بیان خوبی براساس معادلات دیفرانسیل با پیچیدگی قابل قبول دارند.

و سوم، کارآیی محاسبات عددی است. برای مدارهای مایکروویو با تحریک فرکانسی با فاصله زیاد بین فرکانس‌های تحریک، یا مشتمل بر عناصر با Q بالا، مانند نوسانگرهای دی‌الکتریکی (DR) با Q بالای ۶۰۰۰، جزءگذرای پاسخ خیلی طولانی خواهد بود، لذا رسیدن به حالت پایدار از شروط اولیه وقت زیادی را می‌برد و از سویی بدلیل حجم زیاد نقاط محاسبه لازم، دقت نتایج قابل شک است. مثلاً فرض کنید که برای یک مخلوط‌کننده با ورودی‌های ۶۰ MHz و ۴/۲ GHz (طرح عملی در این رساله) بخواهیم با پله‌های زمانی به حالت پایدار برسیم، در حالت ایده‌آل و بدون در نظرگیری مضارب مختلف باید با دوبرابر حدکثر فرکانس در بزرگترین پریود نمونه بگیریم و اگر تنهابعد از ۱۰ پریود، مدار به حالت پایدار برسد به بیش از ۱۰۰۰ نمونه زمانی نیازمندیم حال آنکه اگر همین مدار به فیلتری با Q بالا نیز ختم شده باشد تعداد پله‌ها بسیار بسیار بیش از این خواهد بود.