

# طراحی فیلترهای مجتمع از DC تا RF

مؤلف

سید مجتبی عطاردی

نیاز دانش

## پیشگفتار

کتاب پیش‌رو حاصل حدود ۱۰ سال تدریس درس "طراحی فیلترهای مجتمع" در دانشکده برق دانشگاه صنعتی شریف است. با توجه به آن‌که این درس برای دوره‌های تحصیلات تکمیلی کارشناسی ارشد و دکتری تدریس می‌شود، مطالب آن دستخوش تغییرات سالانه بوده است. در نهایت، آنچه در کتاب آمده تقریباً سه سال است بدون تغییر تدریس می‌شود و مطالب آن برای یک نیم سال آموزشی ۱۴ تا ۱۶ هفته‌ای مناسب است. فصل اول کتاب شامل کلیات و مقدمات فیلتر و ستر مدار است که عموماً در دوره کارشناسی به عنوان درس فیلتر و سنتز مدار ارائه می‌گردد. این خلاصه، یادآوری مناسبی برای دانشجویان بوده و پیش‌نیاز لازم را برای درک فصل‌های بعدی فراهم می‌نماید. در فصل دوم به فیلترهای فعال مقاومتی - خازنی مجتمع (Active-RC) پرداخته شده است. اگرچه این بخش یکی از مباحث مورد آموزش در درس فیلتر و سنتز مدار است؛ ولی با رویکرد فیلترهای مجتمع و در نظر گرفتن ویژگی‌های مجتمع‌سازی نظیر امور غیر ایده‌آل قطعات و عوامل پارازیتی ناشی از مجتمع‌سازی نبوده است. در این فصل، تمامی عوامل غیر ایده‌آل در تقویت‌کننده عملیاتی و در مقاومت و خازن مورد بررسی قرار گرفته و ملاحظات لازم در این زمینه در طراحی و ساخت تبیین شده است؛ همچنین به معرفی فیلترهای فعال مختلط نیز پرداخته شده است. در فصل سوم، فیلترهای فعال کلید-خازنی (Switched-Capacitor) و خواص و برتری‌های آن مورد بحث قرار گرفته و بطور کلی تکنیک‌های کلید خازنی جهت طراحی مدارهای سیگنال-مختلط (Mixed-Signal) ارائه شده است؛ همچنین فیلترهای تمام تفاضلی (Fully Differential) نیز معرفی شده و مزیت‌های آن‌ها نسبت به مدارهای تک ورودی-تک خروجی (Single-ended) بیان شده است. تمامی عوامل غیرایده‌آل نیز، مورد بحث و تحلیل قرار گرفته و روش‌های خنثی کردن و یا کاهش آن‌ها جهت بهینه‌سازی طراحی بیان شده است. در فصل چهارم، مدارها و فیلترهای چندمسیره، که ترکیبی از فیلتر زمان پیوسته (مثل RC) و فیلتر زمان گسسته یا کلید-خازنی (Sampled-data) می‌باشد، مورد بحث مفصل قرار گرفته و تمامی مبانی تحلیل و طراحی این نوع جدید از فیلترهای آنالوگ مورد بحث قرار گرفته است؛ همچنین اثرات مخرب و غیرایده‌آل ذاتی این نوع ساختار فیلتری مورد مطالعه قرار گرفته و روابط و مدل‌های ریاضی لازم در این زمینه تبیین شده است. به‌علاوه استفاده از ساختار مدارهای چندمسیره به عنوان یک تکنیک برای طراحی مدارهای آنالوگ و بلوک‌های مختلف مداری خصوصاً در حوزه‌های فرکانس بالا و فرکانس رادیویی تبیین شده است. در فصل پنجم، فیلترهای فعال ترانسانا-خازن به عنوان ساختاری

از فیلترهای آنالوگ مانند تغییردهنده فاز و یا تأخیر برای فراکانس‌های بالا و قابل تنظیم بطور متوسط مورد بحث قرار گرفته و مثال‌های زیاد طراحی علاوه بر فیلتر در استفاده از این ساختار آورده شده است. علاوه بر طراحی فیلتر با ساختار ترا رسانا-خازن، طراحی ترا رساناهای خطی و نیز با سرعت بالا و تکنیک‌های مختلف طراحی همراه با مثال‌های گوناگون توضیح داده شده است. تمامی عوامل غیرایده‌آل نظیر نویز، خطسانی، عوامل مخرب ناشی از قطب‌های غیرمطلوب و راه‌های اصلاح آن‌ها نیز توضیح داده شده است. در فصل ششم، تنظیم خودکار فرکانس و ضریب کیفیت‌ها فیلترهای مجتمع تشریح شده و مدار کامل یک فیلتر مجتمع همراه با تنظیم فرکانس و ضریب کیفیت نشان داده شده و روش‌های مختلف تنظیم خودکار و دستی مورد بحث قرار گرفته است.

به عنوان مطالب کمک درسی در انتهای کلیه فصل‌ها، مسائل گوناگون آورده شده است که اساتید و اعضاء محترم هیئت علمی که از این کتاب به عنوان مرجع استفاده می‌کنند می‌توانند جزوه حل مسائل را از طریق ارسال ایمیل به مؤلف تهیه نمایند. به علاوه مراجع مورد استفاده قرار گرفته شده در انتهای هر فصل آورده شده است. همچنین اسلایدهای درس به زبان انگلیسی موجود است که اساتید محترم می‌توانند از طریق پست الکترونیک زیر آن را دریافت نمایند.

لازم می‌دانم از دانشجویان و اساتید محترمی که با اصلاحات خود در بازبینی‌های متعدد کتاب زحمت کشیدند قدردانی نمایم. به خصوص سرکار خانم زیبا فاضل و آقای سیاوش کنعانیان که زحمت زیادی در تهیه، ویراستاری و چاپ کتاب کشیدند مستحق ستایش ویژه هستند. همچنین از دانشجویان کارشناسی دانشگاه شریف، آقایان محمد عادل و محمد عارف رحیمیان، حمیدرضا نقیب، امیرحسین افشارراد و حسین مقدس برای ویرایش و اصلاح شکل‌های کتاب تشکر می‌نمایم.

از اساتید بزرگوار، دانشجویان و مهندسانی که به هر نحوی کتاب را مورد بهره‌برداری قرار می‌دهند خواهشمندم نظرات و رهنمودهای سازنده خود را به آدرس الکترونیک زیر ارسال فرمایند تا در چاپ‌های بعدی کتاب مورد ملاحظه قرار گیرد.

با تشکر

**سید مجتبی عطاردی**

مردادماه ۱۳۹۶

atarodi@sharif.edu

## فهرست مطالب

شماره صفحه	عنوان
۱۱	<b>فصل ۱ مبانی فیلترهای آنالوگ</b>
۱۲	۱-۱ انواع فیلتر
۱۳	۱-۱-۱ مشخصه اندازه فیلترها
۱۵	۱-۱-۲ مشخصه فاز یا تاخیر فیلتر
۱۸	۲-۱ روش‌های تقریب پاسخ فیلترها
۱۸	۱-۲-۱ تقریب اندازه فیلتر پایین‌گذر
۲۲	۱-۱-۲-۱ تقریب باترورث برای فیلترهای پایین‌گذر با اندازه تا حد ممکن تخت (MFM)
۲۷	۲-۱-۲-۱ تقریب چبی شف برای فیلترهای پایین‌گذر تمام‌قطب با تموج یکنواخت
۳۱	۳-۱-۲-۱ تقریب فیلترهای پایین‌گذر بیضوی
۳۵	۴-۱-۲-۱ تقریب تاخیر یا فاز: فیلتر پایین‌گذر بسل - تامسون
۳۸	۳-۱ تحلیل و سنتز مدارهای غیرفعال LC دو دهانه‌ای
۴۰	۱-۳-۱ ویژگی‌های تابع تبدیل فیلتر غیرفعال LC
۴۲	۲-۳-۱ ویژگی‌های مدارهای LC نردبانی
۴۳	۱-۲-۳-۱ سنتز مدارهای LC به روش طبقات دارلینگتون
۴۶	۲-۲-۳-۱ سنتز مدارهای LC به روش حذف متوالی قطبها
۵۰	۳-۳-۱ روش دارلینگتون جهت سنتز مدارهای RLC
۵۲	۴-۳-۱ مدار فیلترها
۵۴	۱-۴-۳-۱ مدار فیلتر باترورث
۵۶	۲-۴-۳-۱ مدار فیلتر چبی شف
۵۷	۳-۴-۳-۱ مدار فیلتر چبی شف معکوس
۵۸	۴-۴-۳-۱ مدار فیلتر کائر (بیضوی)
۵۹	۴-۱ تبدیلات فرکانسی
۶۰	۱-۴-۱ تبدیل فیلتر پایین‌گذر به بالاگذر

۶۳	۲-۴-۱ تبدیل فیلتر پایین گذر به میان گذر
۶۶	۳-۴-۱ تبدیل فیلتر پایین گذر به میان نگذر
۶۹	۵-۱ حساسیت
۷۱	۶-۱ مقدمه‌ای بر فیلترهای فعال
۷۲	۱-۶-۱ تقویت کننده عملیاتی ایده آل
۷۲	۲-۶-۱ تقویت کننده عملیاتی واقعی
۷۵	۳-۶-۱ تقویت کننده‌های ترانسانای عملیاتی
۷۸	۷-۱ فیلترهای مجتمع

## ۹۵ فصل ۲ فیلترهای فعال مقاومتی - خازنی

۹۶	۱-۲ ساخت اجزای غیر فعال با تقویت کننده
۹۸	۱-۱-۲ جمع کننده‌ها
۱۰۰	۲-۱-۲ انتگرال گیر وارون ساز
۱۰۲	۳-۱-۲ انتگرال گیر غیر وارون ساز
۱۰۳	۴-۱-۲ ژیراتور و مبدل امیدانس
۱۱۰	۲-۲ طبقات فعال مرتبه دو
۱۱۳	۱-۲-۲ فیلتر Sallen و Key
۱۱۶	۲-۲-۲ فیلترهای دومجذوری بر مبنای انتگرال گیر
۱۱۹	۳-۲ فیلترهای مرتبه بالاتر
۱۲۱	۱-۳-۲ تحقق فیلترهای با اتصال زنجیرهای
۱۲۲	۲-۳-۲ جفت کردن صفرها و قطب‌ها
۱۲۴	۳-۳-۲ ترتیب طبقات
۱۲۶	۴-۳-۲ تخصیص بهره
۱۳۰	۴-۲ فیلترهای نردبانی بر مبنای انتگرال گیر
۱۳۱	۱-۴-۲ منحنی گذر سیگنال (SFG)
۱۳۶	۵-۲ پیاده سازی تفاضلی
۱۴۰	۶-۲ بهینه سازی محدوده پویا
۱۴۳	۷-۲ اثرات غیر ایده آل
۱۴۳	۱-۷-۲ نویز
۱۴۴	۲-۷-۲ محدودیت‌های ناشی از آپ امپ

۱۴۴	۳-۷-۲ عوامل ناشی از عدم دقت در فرآیند ساخت بر مقادیر خازن و مقاومت
۱۴۶	۸-۲ نگاهی به فیلترهای فعال مختلط
۱۴۹	۱-۸-۲ انتگرال گیر مختلط

### فصل ۳ فیلترهای کلید خازنی ..... ۱۶۳

۱۶۴	۱-۳ نمونه برداری
۱۶۶	۲-۳ تحلیل در حوزه Z
۱۶۸	۳-۳ اساس عملکرد فیلترهای کلید-خازنی
۱۶۹	۱-۳-۳ شرایط تقریب SC-R
۱۷۰	۲-۳-۳ تحقق اجزای تشکیل دهنده مدارهای کلید خازنی
۱۷۳	۳-۳-۳ ساعت‌های بدون هم پوشانی
۱۷۳	۴-۳-۳ تقویت کننده عملیاتی
۱۷۴	۴-۳ عوامل غیر ایده آل در فیلترهای کلید خازنی
۱۷۴	۱-۴-۳ ابزارهای تحلیل در مدارهای کلید خازنی
۱۷۴	۱-۱-۴-۳ انتگرال گیر گسسته در حوزه
۱۷۷	۲-۱-۴-۳ تحلیل مدارهای کلید خازنی با استفاده از روابط بار خازن‌ها
۱۷۹	۵-۳ تقریب LDI و DDI در انتگرال گیر و تفاوت آن‌ها
۱۷۹	۶-۳ عوامل غیر ایده آل در فیلترهای کلید خازنی
۱۸۰	۱-۶-۳ اثر عناصر پارازیتیکی
۱۸۷	۲-۶-۳ اثر تقویت کننده عملیاتی غیر ایده آل
۱۸۷	۱-۲-۶-۳ بهره dc محدود
۱۸۹	۲-۲-۶-۳ پهنای باند محدود
۱۸۹	۳-۲-۶-۳ نرخ گردش محدود
۱۹۰	۴-۲-۶-۳ مقاومت خروجی غیر صفر
۱۹۰	۳-۶-۳ مقاومت غیر صفر کلیدها در حالت روشن
۱۹۰	۴-۶-۳ تزریق بار و نشت ساعت
۱۹۳	۵-۶-۳ نویز
۱۹۴	۶-۶-۳ عوامل غیر ایده آلی ذاتی در فیلتر
۲۰۰	۷-۳ پیاده سازی فیلترهای کلید خازنی
۲۰۰	۱-۷-۳ منحنی گذر سیگنال

۲۰۱	.....	۳-۷-۱-۱ انواع شکل موج‌های نمونه‌برداری شده
۲۰۳	.....	۳-۷-۱-۲ روابط میان توابع تبدیل شبکه‌های کلید خازنی
۲۰۴	.....	۳-۷-۱-۳ مدل‌های مداری معادل برای بلوک‌های کلید خازنی
۲۰۶	.....	۳-۷-۲ پیاده‌سازی بر مبنای اتصال سری فیلترهای مرتبه پایین
۲۰۶	.....	۳-۷-۲-۱ فیلترهای مرتبه اول
۲۰۸	.....	۳-۷-۲-۲ فیلترهای مرتبه دو یا دو مجذوری
۲۱۱	.....	۳-۷-۲-۳ پیاده‌سازی مستقیم فیلترهای کلید خازنی مرتبه بالا
۲۱۷	.....	۳-۸ فیلترهای تمام تفاضلی
۲۱۹	.....	۳-۹ فیلترهای کلید-خازنی با مساحت کم

#### فصل ۴ فیلترهای چند مسیره ..... ۲۲۷

۲۲۸	.....	۴-۱ ساختار سیستمی فیلترهای چند مسیره
۲۳۷	.....	۴-۲ دیدگاه مداری فیلترهای چند مسیره
۲۴۱	.....	۴-۲-۱ آشنایی شهودی با عملکرد فیلترهای چند مسیره
۲۴۴	.....	۴-۲-۲ پیاده‌سازی یک فیلتر چند مسیره خازن - مقاومتی دیفرانسیلی
۲۴۴	.....	۴-۲-۳ خاصیت انتقال امپدانس در فیلترهای چند مسیره
۲۵۰	.....	۴-۲-۴ پیاده‌سازی دیفرانسیلی فیلتر M-مسیره با ضریب کیفیت بالا
۲۵۱	.....	۴-۲-۵ کاربرد فیلترهای چند مسیره به جای فیلتر SAW روی تراشه
۲۵۵	.....	۴-۳ اثرات مرتبه‌ی دوم
۲۵۶	.....	۴-۳-۱ نویز فاز LO
۲۵۶	.....	۴-۳-۲ نویز حرارتی سوئیچ‌ها
۲۵۹	.....	۴-۳-۳ خازن‌های پارازیتی سوئیچ‌ها
۲۵۹	.....	۴-۳-۴ تزریق بار سوئیچ‌ها
۲۶۰	.....	۴-۳-۵ عدم تطابق‌ها
۲۶۱	.....	۴-۴ پیاده‌سازی فیلترهای چند مسیره توسط امپدانس مختلط
۲۶۲	.....	۴-۴-۱ انتقال فرکانسی امپدانس مختلط
۲۶۵	.....	۴-۵ تحلیل حوزه زمان فیلترهای چند مسیره
۲۷۱	.....	۴-۶ تضعیف سیگنال‌های تاخوردگی
۲۷۲	.....	۴-۶-۱ اثرات غیر ایده‌آل در حذف تاخوردگی
۲۷۲	.....	۴-۶-۱-۱ چرخه‌ی کار CLK

۲۷۳	..... ۴-۶-۱-۲ خطای بهره
۲۷۴	..... ۴-۶-۱-۳ بررسی اثر تسهیم بار در حذف تاخوردگی
۲۷۶	..... ۴-۷-۱ طراحی تقویت کننده کم نویز
۲۷۶	..... ۴-۷-۱ تاثیر نویز
۲۷۸	..... ۴-۷-۲ اثرات غیرخطی
۲۸۰	..... ۴-۷-۳ طراحی و شبیه سازی تقویت کننده ی فرکانس بالا قابل تنظیم با ضریب کیفیت بالا
۲۸۴	..... ۴-۸ نگاهی به مدارهای جدید در حوزه فیلترهای چند مسیره

## فصل ۵ فیلترهای خازن-ترارسانا ..... ۲۹۹

۳۰۱	..... ۵-۱-۱ ترارسانا و انتگرال گیر بر مبنای آن
۳۰۷	..... ۵-۲ طراحی فیلترهای
۳۰۷	..... ۵-۲-۱ طراحی بر اساس روش جایگزینی
۳۱۴	..... ۵-۲-۲ طراحی بر اساس روش منحنی گذر سیگنال (SFG)
۳۲۴	..... ۵-۲-۲-۱ پیاده سازی صفر انتقال با استفاده از روش SFG
۳۳۰	..... ۵-۲-۳ طراحی بر اساس روش اتصال زنجیره ای
۳۳۴	..... ۵-۳ فیلترهای gm-C دومجذوری عمومی
۳۳۶	..... ۵-۴ عوامل غیرایده آل در سلول های ترارسانا [۸]
۳۳۷	..... ۵-۵ طراحی برای حداکثر محدوده پویایی
۳۴۰	..... ۵-۶ ساختارهای ترارسانا
۳۴۲	..... ۵-۶-۱ ترارساناهای بر مبنای ترانزیستور اشباع
۳۴۲	..... ۵-۶-۱-۱ خطی سازی بر مبنای ثابت نگه داشتن مجموع ولتاژهای گیت-سورس
۳۴۵	..... ۵-۶-۱-۲ استفاده از ساختار وارون ساز
۳۵۰	..... ۵-۶-۲ طراحی ترارساناهای بر مبنای ترانزیستور تراپود
۳۵۰	..... ۵-۶-۲-۱ خطی سازی با ثابت نگه داشتن ولتاژ درین-سورس
۳۵۲	..... ۵-۶-۲-۲ خطی سازی با مقاومت در سورس
۳۵۵	..... ۵-۶-۲-۳ خطی سازی با تقسیم ولتاژ ورودی
۳۵۶	..... ۵-۶-۲-۴ استفاده از تقویت کننده پسخور
۳۵۹	..... ۵-۶-۲-۵ ثابت نگهداشتن جریان ترانزیستور ورودی
۳۵۹	..... ۵-۶-۲-۶ طراحی ترارسانای خطی فرکانس بالا
۳۶۲	..... ۵-۶-۳ طراحی ترارسانای ولتاژ پایین



۳۶۶.....۴-۶-۵ ساده‌ترین مدار ترانسانا.....

## فصل ۶ تنظیم خودکار فرکانس و ضریب کیفیت ۳۸۵.....

- ۳۸۶..... ۱-۶ کلیت سیستم کنترل‌کننده عملکرد فیلتر.....
- ۳۸۷..... ۲-۶ روش‌های کنترل فرکانس.....
- ۳۸۷..... ۱-۲-۶ روش‌های تولید سیگنال کنترل.....
- ۳۸۷..... ۲-۶-۱-۱ استفاده از نوسان‌کننده کنترل‌شونده با ولتاژ (VCO).....
- ۳۸۹..... ۲-۶-۱-۲ استفاده از فیلتر کنترل‌شونده با ولتاژ (VCF).....
- ۳۹۲..... ۲-۶-۱-۳ استفاده از مقاومت مرجع.....
- ۳۹۴..... ۲-۶-۱-۴ استفاده از مقاومت مرجع با منابع جریان نامساوی.....
- ۳۹۴..... ۲-۶-۱-۵ استفاده از جریان مرجع.....
- ۳۹۶..... ۲-۶-۱-۶ روش مبتنی بر بهره واحد انتگرال‌گیر.....
- ۳۹۶..... ۲-۶-۲ روش اعمال سیگنال کنترل.....
- ۳۹۷..... ۳-۶ روش‌های کنترل Q.....
- ۳۹۷..... ۱-۳-۶ روش‌های تولید سیگنال کنترل.....
- ۳۹۷..... ۳-۶-۱-۱ استفاده از خطای دامنه.....
- ۳۹۸..... ۳-۶-۱-۲ استفاده از خطای زمان نشست ( $t_s$ ).....
- ۴۰۰..... ۳-۶-۱-۳ استفاده از خطای فاز.....
- ۴۰۰..... ۲-۳-۶ روش‌های اعمال سیگنال کنترل.....
- ۴۰۰..... ۳-۶-۱-۲ اعمال سیگنال کنترل به ترانسانای تعیین‌کننده Q.....
- ۴۰۱..... ۳-۶-۲-۲ استفاده از صفر و قطب قابل تنظیم.....
- ۴۰۲..... ۴-۶ مطالعه موردی: بررسی یک مدار تنظیم فرکانس و Q [۱] و [۸-۷].....
- ۴۰۳..... ۴-۶-۱ بررسی تاثیر جابه‌جایی فاز عناصر ترانسانا بر روی Q یک سیستم درجه دو.....
- ۴۰۴..... ۴-۶-۲ بررسی نظریه خشی نمودن جابه‌جایی فاز توسط مقاومت خروجی ترانسانا.....
- ۴۰۸..... ۴-۶-۳ تحقق مقاومت متغیر.....
- ۴۱۰..... ۴-۶-۴ سیستم نهایی تنظیم فرکانس و ضریب کیفیت.....
- ۴۱۰..... ۵-۶ روش تنظیم تطبیقی ضریب کیفیت [۱۰].....