

# میکروالکترونیک RF

ویراست دوم

نویسنده

بهزاد رضوی

برگردان و گردآوری

دکتر علی فتوت احمدی

(دانشیار دانشگاه صنعتی شریف)

مهندس سیاوش کنعانیان

مهندس علیرضا ضابطیان

نیاز دانش

|                     |                                                                                 |                                                 |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| سرشناسه             | رضوی، بهزاد، ۱۳۴۰                                                               | Razavi, Behzad                                  |
| عنوان و نام پدیدآور | میکروالکترونیک RF / نویسنده: بهزاد رضوی؛ مترجمان علی فتوت احمدی، علیرضا ضابطیان |                                                 |
| وضعیت ویراست        | سیاوش کنعانیان                                                                  |                                                 |
| مشخصات نشر          | ویراست ۲.                                                                       |                                                 |
| مشخصات ظاهری        | تهران: نیاز دانش، ۱۳۹۳.                                                         |                                                 |
| شابک                | ۱-۶۴ ص. مصور، جدول، عکس، نمودار                                                 |                                                 |
|                     | 978-600-6481-69-2                                                               |                                                 |
| وضعیت فهرست‌نویسی   | فیفا                                                                            |                                                 |
| یادداشت             | عنوان اصلی:                                                                     | RF microelectronics, 2 <sup>nd</sup> ed, ©2012. |
| یادداشت             | کتابنامه.                                                                       |                                                 |
| موضوع               | مدارهای مجتمع بسامد رادیویی - طرح و ساختمان                                     |                                                 |
| شناسه افزوده        | فتوت احمدی، علی، ۱۳۳۷، مترجم                                                    |                                                 |
| شناسه افزوده        | ضابطیان، علیرضا، ۱۳۶۹، مترجم                                                    |                                                 |
| شناسه افزوده        | کنعانیان، سیاوش، ۱۳۶۸، مترجم                                                    |                                                 |
| رده‌بندی کنگره      | TK۶۵۶۰/۶م۹/۱۳۹۳                                                                 |                                                 |
| رده‌بندی دیوپی      | ۶۲۱/۳۸۴۱۲                                                                       |                                                 |
| شماره کتابشناسی ملی | ۳۴۱۸۸۳۶                                                                         |                                                 |



|                           |                                                                   |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| نام کتاب                  | میکروالکترونیک RF (ویراست دوم)                                    |
| نویسنده                   | بهزاد رضوی                                                        |
| برگردان و گردآوری         | دکتر علی فتوت احمدی / مهندس سیاوش کنعانیان / مهندس علیرضا ضابطیان |
| مدیر اجرایی - ناظر بر چاپ | حمیدرضا محمد شیرازی - محمد شمس                                    |
| ناشر                      | نیاز دانش                                                         |
| صفحه‌آرا                  | واحد تولید انتشارات نیاز دانش                                     |
| لیتوگرافی / چاپ           | فرائش - گنجینه                                                    |
| نوبت چاپ                  | اول - ۱۳۹۳                                                        |
| شمارگان                   | ۱۰۰۰                                                              |
| قیمت                      | ۴۳۰۰۰۰ ریال                                                       |

ISBN: 978-600-6481-69-2

شابک: ۹۷۸-۶۰۰-۶۴۸۱-۶۹-۲

هرگونه چاپ و تکثیر (اعم از زیراکس، بازنویسی، ضبط کامپیوتری و تهیه‌ی CD) از محتویات این اثر بدون اجازه‌ی کتبی ناشر ممنوع است، متخلفان به موجب بند ۵ از ماده‌ی ۳ قانون حمایت از مؤلفان، مصنفان و هنرمندان تحت پیگرد قانونی قرار می‌گیرند.

کلیه حقوق این اثر برای ناشر محفوظ است.

تماس با انتشارات: ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۲۵ - ۰۹۱۲۷۰۷۳۹۲۵ - ۰۶۶۴۷۸۱۰۶ - ۰۶۶۴۷۸۱۰۶

www.Niaze-Danesh.com

مشاوره جهت نشر: ۰۹۱۲ - ۲۱۰۶۷۰۹

# مقدمه ویرایش دوم

(دکتر علی فتوت احمدی)

مقدمه ویرایش اول در سال ۲۰۰۴ میلادی تهیه شده بود. اینک با فاصله ده سال، نگاه مجدد به گستره توسعه این صنعت در جهان و ایران و مطالعه مقدمه قبلی، ما را به توسعه شگفت‌انگیز صنعت میکروالکترونیک در زمینه مخابرات بی‌سیم واقف می‌سازد. گوشی تلفن همراه مانند گذشته موتور به عنوان جزء پیش‌گام و پیش‌قراول توسعه در این زمینه است. گوشی‌های موبایل جدید از حیث مدارات فعال بیش از ۳ بار از حیث حجمی کوچک‌تر شده‌اند (مراجعه به تصاویر مکانیکی گوشی iPhone 5s بنمایید) به طوری که دیگر مدارهای الکترونیکی تعیین‌کننده وزن و حجم گوشی نیستند و اندازه صفحه نمایش‌گر که کوچک شدن آن مطلوب نیست و فاصله فیزیکی بین گوش و دهان انسان عامل تعیین‌کننده اصلی شده‌اند. همراه با این کاهش حجم، عملکرد گوشی‌ها نیز بسیار غنی‌تر و متنوع‌تر شده است. در یک گوشی نوعی سال ۲۰۰۴ دو باند GSM قابل دریافت بودند و گوشی احتمالاً به مدار واسط Bluetooth مجهز بود. در گوشی iPhone 5s امروز فرستنده و گیرنده در ۴ سیستم و در باندهای متفاوت GSM، 2G، WiFi و Bluetooth و بالاخره دو گیرنده GPS و FM همه به صورت هم‌زمان وجود دارند. نگاهی به مدارات مجتمع رادیویی و مقایسه آن‌ها با گذشته نشان‌دهنده پیاده‌سازی مدارات گیرنده و فرستنده و مولد فرکانس چند استاندارد همه در یک مدار مجتمع می‌باشد. فیلترهای غیرفعال تا حد زیادی در طبقات میانی به واسطه استفاده از معماری‌های اتصال مستقیم (IF صفر) وارد مدار مجتمع شده‌اند و مسائل مربوط به کنترل تساری بهره در مسیر I و Q و کنترل زاویه فاز نوسان‌گرهای متعامد تا حد بسیار خوبی حل شده‌اند.

این‌ها تماماً مواردی بودند که در ویرایش اول تحلیل شده و توسعه آن‌ها در کتاب پیش‌بینی شده بود. در گوشی‌های جدید ماجول‌های طبقه تقویت‌کننده توان فرستنده هنوز به صورت مجزا و به‌ضاً با تکنولوژی GaAs طراحی می‌گردند (مراجعه به تصاویر مکانیکی گوشی iPhone 5s). بزرگ‌ترین مشکل قرارو در دهه آینده کارکرد هم‌زمان و بدون تداخل در باندهای مختلف با پهنای باند زیاد (باندهای 20MHz در چند فرکانس مختلف و با نرخ داده‌ی بالای ۵۰ مگابایت بر ثانیه) هم‌زمان با عملکرد گیرنده‌های مکان‌یابی و ارتباطات سیستم‌های کنترل مانند استاندارد Zigbee و Bluetooth می‌باشد. توسعه فیلترهای N-Path که عملاً منجر به ساخت فیلترهای Q بالا و به صورت قابل تنظیم می‌باشند، کلیدی‌ترین عامل برای عملی شدن این موضوع‌اند.

موضوع استفاده از نزدیک‌ترین شبکه ثابت با مدار واسطه ۸۰۲٫۱۱ در دهه اخیر خود را با متداول شدن اتصالات تلفنی از نوع *Viber* و *Skype* عملاً در استاندارد فراگیر *4G-LTE-Adv* نشان داده است و با عنوان بارزدایی ترافیک (*traffic off-loading*) شناخته شده است.

در تجهیزات شبکه موبایل نیز در انتظار متعدد شدن بخش فرستنده و گیرنده با اتصال دور رادیویی (*Remote Radio Head*) و دریافت سیگنال از چند منبع به صورت هم‌زمان هستیم.

در این‌جا مسائل مربوط به مدیریت تداخل‌ها و کاهش آن‌ها (*eICIC*) در استاندارد *4G-LTE-Adv* چالش دهه آینده برای بهبود سرعت انتقال داده در تمام نقاط فیزیکی و نه فقط در حوالی ایستگاه‌هاست. تعداد ایستگاه‌های رادیویی که دارای پردازش باند پایه مشترک می‌باشند با افزایش ۱۰۰۰ برابری ترافیک و توسعه تعداد نقاط متصل به شبکه (با توسعه تکنولوژی ماشین به ماشین (*M2M*) بسیار فراتر از تعداد افراد بشر) هم‌زمان شده و زمینه‌های جدیدی برای توسعه سیگنالینگ جدیدتر و رادیوهای بسیار ظریف و کم‌مصرف به وجود خواهد آمد. این رادیوها برای این منظور از تکنولوژی رادیویاری (*Co-operative Radio*) بهره خواهند برد.

نکته مهم و اصلی برای توسعه آینده این است که سه گروه بازار مصرف، سرمایه‌گذاران و محققین مخابرات بی‌سیم که به علت ولع و انتظارات بیش از حد سرمایه‌گذاران و عدم استقبال نسبی بازار مصرف در اوایل دهه ۲۰۰۰ دچار شکست و افت چندساله شدند باز هم به تعادل رسیده‌اند. اگر در آن سال‌ها افزایش فشرده‌گی مدارات منجر به عملکرد بهتر مدارات رادیو با کاهش قیمت آن‌ها می‌شد، اینک نیاز به اتصال به شبکه با سرعت بیش‌تر نیروی پشیران برای توسعه آینده است. با تخصیص باندهای متعدد به *4G-LTE* و استفاده از تکنولوژی‌های تجمیع حامل‌ها (*Carrier Aggregation*) مصرف‌کنندگان توانایی‌های مطلوب جدیدی را مانند مکالمات با کیفیت تصویری و استفاده از کتابخانه‌های اینترنتی و مراجع شامل عکس و فیلم و متن به صورت واقعی و سریع تجربه خواهند کرد.

آخرین موضوعی که در مسیر فرارو تضمین‌کننده زمینه‌های رشد برای مهندسان رادیو است، باند فرکانسی ۸۰GHz می‌باشد که از آن به عنوان مخابرات موج میلی‌متری هم یاد می‌کنند. عملاً باند ۶۰GHz که به واسطه جذب اتم اکسیژن پرتلاطم‌ترین باند انتشار در فرکانس‌های قابل دسترس و مناسب ارتباطات سیار شناخته می‌شد تاکنون فقط در رادارهای ضدتصادف خودرو کاربرد پیدا کرده است. اما باند ۸۰GHz در محدوده‌ی فرکانس‌های میلی‌متری دارای کم‌ترین میزان تلفات انتشاری و باند فرکانسی وسیع است و در دهه‌ی آینده تکنولوژی‌های مربوط به آن عملاً توسعه یافته و با کاهش ابعاد سلول‌های موبایل و استفاده از *4G-LTE-Adv* برای ارتباطات در زمان سرعت حرکت زیاد و یا ارسال و دریافت سیگنالینگ امکان اتصال صددرصد بی‌سیم را با پهنای باندهای بسیار وسیع بالاتر از ۱Gb/sec میسر خواهند ساخت.

کتاب حاضر شاید تنها مرجع کامل در حوزه میکروالکترونیک فرکانس رادیویی است که مباحث پیرامون این موضوع را با دقت و موشکافی بررسی نموده و همه تحولات مهم این عرصه را تا زمان حاضر به طور کامل پوشش می‌دهد. نسخه زبان اصلی این کتاب با نثری گویا و پیوستگی دقیق مطالب، برای آموزش دانشجویان بهترین منبع در دسترس است.

با ترجمه‌ی ویرایش دوم کتاب، هدف ثانوی ما ادامه تلاش برای رشد و توسعه ادبیات مهندسی رادیو به زبان فارسی است. از این جهت کلیه لغات فنی انگلیسی را در این زمینه با جدیت و نصب‌العین قرار دادن سادگی کلمات و نزدیکی ریشه‌ای به کلمه اصلی در حد توان خود ترجمه کرده‌ایم که فهرست این واژگان در

واژه‌نامه موجود در انتهای کتاب قرار داده شده است. امید می‌رود این رویه راهگشای دانشجویان تحصیلات تکمیلی در مسیر توسعه ادبیات مهندسی زبان فارسی باشد. اما هدف اصلی، تداوم نفوذ فرهنگ علمی-مهندسی در زمینه طراحی رادیو در کشور می‌باشد که امیدواریم با حمایت دولت و بخش خصوصی این توان علمی مهندسی به تولید ثروت و خودکفایی بیشتر و صادرات منجر گردد.

نسخه اصلی کتاب به زبان انگلیسی، بالغ بر ۹۰۰ صفحه است و موضوعات گسترده‌ای را در حوزه RF و زمینه‌های مرتبط با آن مورد بحث و بررسی قرار داده است. در ترجمه این کتاب، برای تکمیل مباحث فصل ۴ (معماری‌های فرستنده-گیرنده) ضمیمه‌ای ۳۰ صفحه‌ای به این فصل افزوده شده است. در انتهای فصل ۸ (نوسان‌گرها) نیز مبحثی جدید تحت عنوان ضمیمه گنجانده شده است. هم‌چنین فصل ۱۴ به بررسی تکنولوژی جدید 4G-LTE در قالب یک پروژه طراحی می‌پردازد و به دلیل اهمیت این تکنولوژی در دهه آینده این فصل را به کتاب افزوده‌ایم. در نهایت فصل ۱۵ تمرین‌های تکمیلی برای کمک به درک بهتر درس را دربر دارد و می‌تواند مورد استفاده اساتید و دانشجویان محترم قرار گیرد.

طبعاً به دلیل حجم بالای مطالب و گستردگی موضوع، تعدادی غلط نگارشی و علمی در نسخه زبان اصلی کتاب وجود دارد که بخشی از آن‌ها توسط نویسنده در غلط‌نامه کتاب تصحیح شده و در متن با پاورقی «تصحیح نویسنده» مشخص گردیده است. افزون بر این، غلط‌های دیگری در کتاب زبان اصلی توسط مترجمین اصلاح شده و در متن با پاورقی «تصحیح مترجمین» آمده است. در برخی موارد هم که توضیحات اضافه در درک بهتر مطلب راهگشا بوده است، جملاتی توسط مترجمین به متن افزوده شده که جهت رعایت اصل امانت‌داری با پاورقی «مترجمین» مشخص شده‌اند.

قطعاً این نوشتار خالی از اشکال نیست. لذا مستعدی است اصلاحات و نکات پیشنهادی خود را با مترجمین از طریق نشانی پست الکترونیک [afotowat@sharif.edu](mailto:afotowat@sharif.edu) در میان بگذارید. امید است خوانندگان گرامی با تذکرات ارزشمند خود، ما را در جهت بهبود کیفیت این کتاب یاری کنند.

در پایان امید است این کتاب به همراه ضمایم آن به عنوان مرجعی کامل و به روز در میکروالکترونیک فرکانس رادیویی برای دانشجویان ایرانی آموزنده بوده و در جهت توسعه هرچه بیش‌تر علمی کشور سهم ناچیزی داشته باشد.

علی فتوت احمدی

۷ مرداد ۱۳۹۳

مصادف با عید سعید فطر

# فهرست مطالب

## فصل ۱

### درآمدی بر تکنولوژی RF و بی سیم

|     |       |                              |
|-----|-------|------------------------------|
| ۷۷  | ۳-۳-۲ | اثر تابع تبدیل بر روی نویز   |
| ۷۸  | ۴-۳-۲ | نویز افزاره                  |
| ۸۴  | ۵-۳-۲ | نمایش نویز در مدارها         |
| ۹۶  | ۴-۲   | حساسیت و محدوده پویایی       |
| ۹۶  | ۱-۴-۲ | حساسیت                       |
| ۹۷  | ۲-۴-۲ | محدوده پویایی                |
| ۱۰۰ | ۵-۲   | انتقال امپدانس غیرفعال       |
| ۱۰۰ | ۱-۵-۲ | ضریب کیفیت                   |
| ۱۰۱ | ۲-۵-۲ | تبدیل سری به موازی           |
| ۱۰۲ | ۳-۵-۲ | شبکه‌های تطبیق ساده          |
| ۱۰۶ | ۴-۵-۲ | تلفات در شبکه‌های تطبیق      |
| ۱۰۸ | ۶-۲   | پارامترهای پراکندگی          |
| ۱۱۲ | ۷-۲   | تحلیل سیستم‌های پویای غیرخطی |
| ۱۱۲ | ۱-۷-۲ | نکات پایه                    |
| ۱۱۳ | ۸-۲   | سری ولتاژ                    |
| ۱۱۸ | ۱-۸-۲ | روش جریان‌های غیرخطی         |
| ۱۲۲ |       | مراجع                        |
| ۱۲۲ |       | مسائل                        |

## فصل ۲

### مفاهیم اولیه در طراحی RF

|    |       |                                |
|----|-------|--------------------------------|
| ۴۵ | ۱-۲   | ملاحظات کلی                    |
| ۴۵ | ۱-۱-۲ | واحدها در طراحی RF             |
| ۴۷ | ۲-۱-۲ | تغییرپذیری با زمان             |
| ۵۰ | ۳-۱-۲ | غیرخطسانی                      |
| ۵۲ | ۲-۲   | اثرات غیرخطسانی                |
| ۵۳ | ۱-۲-۲ | اعوجاج هارمونیکی               |
| ۵۵ | ۲-۲-۲ | فشاردهی بهره                   |
| ۵۸ | ۳-۲-۲ | مدولاسیون ضربدری               |
| ۵۹ | ۴-۲-۲ | ایترمدولاسیون                  |
| ۶۷ | ۵-۲-۲ | طبقات غیرخطی سری               |
| ۷۱ | ۶-۲-۲ | تبدیل AM/PM                    |
| ۷۳ | ۳-۲   | نویز                           |
| ۷۳ | ۱-۳-۲ | نویز به عنوان یک فرآیند تصادفی |
| ۷۵ | ۲-۳-۲ | طیف نویز                       |

## فصل ۳

### مفاهیم مخابراتی

|     |       |                        |
|-----|-------|------------------------|
| ۱۲۷ | ۱-۳   | ملاحظات عمومی          |
| ۱۲۹ | ۲-۳   | مدولاسیون آنالوگ       |
| ۱۲۹ | ۱-۲-۳ | مدولاسیون دامنه        |
| ۱۳۱ | ۲-۲-۳ | مدولاسیون فاز و فرکانس |

|     |       |                               |     |       |                                  |
|-----|-------|-------------------------------|-----|-------|----------------------------------|
| ۲۶۴ | ۱-۳-۴ | ملاحظات عمومی                 | ۱۳۵ | ۳-۳   | مدولاسیون دیجیتال                |
| ۲۶۵ | ۲-۳-۴ | فرستنده‌های تبدیل مستقیم      | ۱۳۶ | ۱-۳-۳ | تداخل میان نمادی                 |
| ۲۷۶ | ۳-۳-۴ | فرستنده‌های تبدیل مستقیم مدرن | ۱۴۰ | ۲-۳-۳ | منظومه‌های سیگنال                |
| ۲۸۱ | ۴-۳-۴ | فرستنده‌های هتروداین          | ۱۴۲ | ۳-۳-۳ | مدولاسیون متعامد                 |
| ۲۸۶ | ۵-۳-۴ | دیگر معماری‌های TX            | ۱۴۸ | ۴-۳-۳ | مدولاسیون GMSK و GFSK            |
| ۲۸۶ | ۴-۴   | فرستنده و گیرنده‌های OOK      | ۱۵۰ | ۵-۳-۳ | مدولاسیون متعامد دامنه           |
| ۲۸۷ |       | مراجع                         | ۱۵۲ | ۶-۳-۳ | چندطرفه‌سازی تقسیم فرکانس متعامد |
| ۲۸۸ |       | مسائل                         | ۱۵۴ | ۴-۳   | رشد طیفی                         |
| ۲۹۳ |       | ضمیمه *                       | ۱۵۵ | ۵-۳   | مخابرات فرکانس رادیویی سیار      |

## فصل ۵

|     |       |                                   |     |       |                                     |
|-----|-------|-----------------------------------|-----|-------|-------------------------------------|
| ۳۲۳ |       | تقویت‌کننده‌های کم نویز           | ۱۶۱ | ۶-۳   | روش‌های دسترسی چندگانه              |
| ۳۲۳ | ۱-۵   | ملاحظات عمومی                     | ۱۶۱ | ۱-۶-۳ | دوطرفه‌سازی با تقسیم فرکانس و زمانی |
| ۳۳۱ | ۲-۵   | مسأله تطبیق ورودی                 | ۱۶۲ | ۲-۶-۳ | دسترسی چندگانه با تقسیم فرکانسی     |
| ۳۳۴ | ۳-۵   | پیکربندی‌های تقویت‌کننده کم نویز  | ۱۶۳ | ۳-۶-۳ | دسترسی چندگانه با تقسیم زمانی       |
| ۳۳۵ | ۱-۳-۵ | طبقه سورس مشترک با باز سلفی       | ۱۶۴ | ۴-۶-۳ | دسترسی چندگانه با تقسیم کد          |
| ۳۳۷ | ۲-۳-۵ | طبقه سورس مشترک با پس‌خور مقاومتی | ۱۶۸ | ۷-۳   | استانداردهای بی سیم                 |
| ۳۴۰ | ۳-۳-۵ | طبقه‌ی گیت مشترک                  | ۱۷۰ | ۱-۷-۳ | GSM                                 |
|     | ۴-۳-۵ | طبقه‌ی سورس مشترک دوش سوار با     | ۱۷۶ | ۲-۷-۳ | IS-95 CDMA                          |
| ۳۵۲ |       | سلف در سورس                       | ۱۷۸ | ۳-۷-۳ | CDMA پهن باند                       |
|     | ۵-۳-۵ | گونه‌های دیگر تقویت‌کننده‌ی       | ۱۸۲ | ۴-۷-۳ | بلوتوث                              |
| ۳۶۴ |       | کم نویز گیت مشترک                 | ۱۸۶ | ۵-۷-۳ | IEEE802.11a/b/g                     |
|     | ۶-۳-۵ | تقویت‌کننده‌های کم نویز با        | ۱۹۰ | ۸-۳   | ضمیمه ۱: کلیدزنی جابجایی فاز تفاضلی |
| ۳۶۸ |       | خشکی‌سازی نویز                    | ۱۹۱ |       | مراجع                               |
|     | ۷-۳-۵ | تقویت‌کننده‌های کم نویز با        | ۱۹۲ |       | مسائل                               |
| ۳۷۱ |       | خشکی‌سازی راکتانس                 |     |       |                                     |

## فصل ۴

|     |       |                                                 |     |       |                               |
|-----|-------|-------------------------------------------------|-----|-------|-------------------------------|
| ۳۷۱ |       | تقویت‌کننده‌های کم نویز با                      | ۱۹۳ |       | معماری‌های فرستنده-گیرنده     |
| ۳۷۳ | ۴-۵   | کلید زنی بهره                                   | ۱۹۳ | ۱-۴   | ملاحظات عمومی                 |
| ۳۸۰ | ۵-۵   | کلید زنی باند                                   | ۱۹۸ | ۲-۴   | معماری‌های گیرنده             |
| ۳۸۲ | ۶-۵   | تقویت‌کننده‌های کم نویز با IP <sub>۲</sub> بالا | ۱۹۸ | ۱-۲-۴ | گیرنده‌های پایه‌ای هتروداین   |
| ۳۸۲ | ۱-۶-۵ | تقویت‌کننده‌های کم نویز تفاضلی                  | ۲۰۸ | ۲-۲-۴ | گیرنده‌های هتروداین مدرن      |
| ۳۹۲ | ۲-۶-۵ | دیگر روش‌ها جهت بهبود IP <sub>۲</sub>           | ۲۱۶ | ۳-۲-۴ | گیرنده‌های تبدیل مستقیم       |
| ۳۹۳ | ۷-۵   | محاسبات غیر خطسانی                              | ۲۳۷ | ۴-۲-۴ | گیرنده‌های حذف تصویر          |
|     | ۱-۷-۵ | طبقه سورس مشترک با مقاومت                       | ۲۵۱ | ۵-۲-۴ | گیرنده‌های فرکانس میانی پایین |
| ۳۹۴ |       | در سورس                                         | ۲۶۴ | ۳-۴   | معماری‌های فرستنده            |

|        |                                  |       |        |                              |
|--------|----------------------------------|-------|--------|------------------------------|
| ۴۷۵... | شرایط مورد نیاز عملکرد           | ۱-۵-۶ | ۲-۷-۵  | طبقه سورس مشترک بدون         |
| ۴۷۷    | بیکربندی مخلوط کننده های بالا بر | ۲-۵-۶ | ۳۹۷... | مقاومت در سورس               |
| ۴۹۱    | .....                            | مراجع | ۳۹۹    | زوج های تفاضلی و شبه تفاضلی  |
| ۴۹۱    | .....                            | مسائل | ۴۰۰    | زوج تفاضلی با مقاومت در سورس |
|        |                                  |       | ۴۰۱    | .....                        |
|        |                                  |       | ۴۰۱    | .....                        |

## فصل ۷

## افزاده های غیر فعال

|        |       |       |                         |
|--------|-------|-------|-------------------------|
| ۴۹۵    | ..... | ۱-۷   | ملاحظات عمومی           |
| ۴۹۷    | ..... | ۲-۷   | سلف ها                  |
| ۴۹۷... | ..... | ۱-۲-۷ | ساختار پایه             |
| ۵۰۰    | ..... | ۲-۲-۷ | هندسه سلف ها            |
| ۵۰۱    | ..... | ۳-۲-۷ | معادلات اندوکتانس       |
| ۵۰۵    | ..... | ۴-۲-۷ | خازن های پارازیتی       |
| ۵۱۰    | ..... | ۵-۲-۷ | سازوکارهای تلفات        |
| ۵۲۱    | ..... | ۶-۲-۷ | مدلسازی سلف             |
| ۵۲۶    | ..... | ۷-۲-۷ | دیگر ساختارهای سلف      |
| ۵۳۶    | ..... | ۳-۷   | ترانسفورماتورها         |
| ۵۳۷    | ..... | ۱-۲-۷ | ساختارهای ترانسفورماتور |
| ۵۴۲    | ..... | ۲-۳-۷ | اثر خازن تزویج          |
| ۵۴۲    | ..... | ۳-۳-۷ | مدلسازی ترانسفورماتور   |
| ۵۴۳    | ..... | ۴-۷   | خطوط انتقال             |
| ۵۴۵    | ..... | ۱-۴-۷ | ساختارهای خطوط T        |
| ۵۵۰    | ..... | ۵-۷   | خازن های متغیر          |
| ۵۵۷    | ..... | ۶-۷   | خازن های ثابت           |
| ۵۵۸    | ..... | ۱-۶-۷ | خازن های MOS            |
| ۵۶۰    | ..... | ۲-۶-۷ | خازن های با صفحه فلزی   |
| ۵۶۲    | ..... | ..... | مراجع                   |
| ۵۶۳    | ..... | ..... | مسائل                   |

## فصل ۸

## نوسان گر ها

|     |       |     |                 |
|-----|-------|-----|-----------------|
| ۵۶۵ | ..... | ۱-۸ | شاخص های عملکرد |
|-----|-------|-----|-----------------|

## فصل ۶

## مخلوط کننده ها

|     |       |       |                                              |
|-----|-------|-------|----------------------------------------------|
| ۴۰۵ | ..... | ۱-۶   | ملاحظات عمومی                                |
| ۴۰۵ | ..... | ۱-۱-۶ | پارامترهای عملکرد                            |
| ۴۰۶ | ..... | ۲-۱-۶ | اعداد نویز مخلوط کننده                       |
| ۴۱۲ | ..... | ۳-۱-۶ | مخلوط کننده های متوازن یکانه                 |
| ۴۱۶ | ..... | ..... | و متوازن مضاعف                               |
| ۴۱۸ | ..... | ۲-۶   | مخلوط کننده های پایین بر غیر فعال            |
| ۴۱۹ | ..... | ۱-۲-۶ | بهره                                         |
| ۴۲۵ | ..... | ۲-۲-۶ | اختلاط خودی نوسان گر محلی                    |
| ۴۲۵ | ..... | ۳-۲-۶ | نویز                                         |
| ۴۳۲ | ..... | ۴-۲-۶ | امپدانس ورودی                                |
| ۴۳۵ | ..... | ۵-۲-۶ | مخلوط کننده های غیر فعال                     |
| ۴۳۷ | ..... | ..... | راه اندازی شده با جریان                      |
| ۴۳۹ | ..... | ۳-۶   | مخلوط کننده های پایین بر فعال                |
| ۴۴۶ | ..... | ۱-۳-۶ | بهره تبدیلی                                  |
| ۴۵۶ | ..... | ۲-۳-۶ | نویز در مخلوط کننده های فعال                 |
| ۴۶۱ | ..... | ۳-۳-۶ | خطسانی                                       |
| ۴۶۱ | ..... | ۴-۶   | بیکربندی های بهبود یافته مخلوط کننده ها      |
| ۴۶۱ | ..... | ۱-۴-۶ | مخلوط کننده های فعال با منابع                |
| ۴۶۱ | ..... | ..... | جریان کمکی                                   |
| ۴۶۳ | ..... | ۲-۴-۶ | مخلوط کننده های فعال با ترانسایب             |
| ۴۶۳ | ..... | ..... | بهبود یافته                                  |
| ۴۶۶ | ..... | ۳-۴-۶ | مخلوط کننده های فعال با IP <sub>۲</sub> بزرگ |
| ۴۷۲ | ..... | ۴-۴-۶ | مخلوط کننده های فعال با نویز فلیکر           |
| ۴۷۵ | ..... | ..... | پایین                                        |
| ۴۷۵ | ..... | ۵-۶   | مخلوط کننده های بالا بر                      |

## فصل ۹

|     |                                       |     |                                            |
|-----|---------------------------------------|-----|--------------------------------------------|
| ۶۶۷ | حلقه‌های قفل فاز                      | ۵۷۰ | قواعد پایه‌ای                              |
| ۶۶۷ | ۱-۹ مفاهیم پایه‌ای                    | ۵۷۰ | ۱-۲-۸ دیدگاه پسخور در مورد نوسان‌گرها      |
| ۶۶۷ | ۱-۱-۹ آشکارساز فاز                    | ۵۷۰ | ۲-۲-۸ دیدگاه تک دهانه در مورد              |
| ۶۷۰ | ۲-۹ PLLهای نوع یک                     | ۵۷۶ | نوسان‌گرها                                 |
| ۶۷۰ | ۱-۲-۹ هم ترازای فاز VCO               | ۵۷۹ | ۳-۸ نوسان‌گر با اتصال ضربدری               |
| ۶۷۲ | ۲-۲-۹ PLL ساده                        | ۵۸۵ | ۴-۸ نوسان‌گرهای سه نقطه‌ای                 |
| ۶۷۳ | ۳-۲-۹ تحلیل PLL ساده                  | ۵۸۶ | ۵-۸ نوسان‌گرهای کنترل شونده با ولتاژ (VCO) |
| ۶۷۷ | ۴-۲-۹ دینامیک‌های حلقه                | ۵۸۹ | ۱-۵-۸ محدودیت‌های محدوده تنظیم             |
| ۶۸۰ | ۵-۲-۹ ضرب فرکانسی                     | ۵۹۰ | ۲-۵-۸ تأثیر Q خازن متغیر                   |
| ۶۸۱ | ۶-۲-۹ معایب PLL ساده                  | ۵۹۰ | ۶-۸ VCOهای سلفی خازنی با محدوده تنظیم      |
| ۶۸۲ | ۳-۹ PLLهای نوع دو                     | ۵۹۲ | وسیع                                       |
| ۶۸۲ | ۱-۳-۹ آشکارسازهای فاز / فرکانس        | ۵۹۲ | ۱-۶-۸ VCOهای با تنظیم پیوسته               |
| ۶۸۵ | ۲-۳-۹ پمپ‌های بار                     | ۶۰۰ | ۲-۶-۸ تغییرات دامنه با تنظیم فرکانس        |
| ۶۸۶ | ۳-۳-۹ PLLهای پمپ بار                  | ۶۰۰ | ۳-۶-۸ تنظیم گسسته                          |
| ۶۹۱ | ۴-۳-۹ پاسخ گذرا                       | ۶۰۴ | ۷-۸ نویز فاز                               |
| ۶۹۴ | ۵-۳-۹ محدودیت‌های تقریب پیوسته-زمان   | ۶۰۴ | ۱-۷-۸ مفاهیم پایه‌ای                       |
| ۶۹۴ | ۶-۳-۹ CPPLL چند برابرکننده فرکانس     | ۶۰۷ | ۲-۷-۸ اثر نویز فاز                         |
| ۶۹۶ | ۷-۳-۹ حلقه‌های مرتبه بالاتر           | ۶۱۱ | ۳-۷-۸ تحلیل نویز فاز: روش یک               |
| ۶۹۸ | ۴-۹ اثرات غیر ایده‌آل PFD/CP          | ۶۲۳ | ۴-۷-۸ تحلیل نویز فاز: روش دو               |
| ۶۹۹ | ۱-۴-۹ خطای پس و پیش و عدم تطبیق       | ۶۳۱ | ۵-۷-۸ نویز منبع جریان بایاس                |
| ۶۹۹ | پهنای امواج Up و Down                 | ۶۳۶ | ۶-۷-۸ اعداد شایستگی VCOها                  |
| ۷۰۱ | ۲-۴-۹ سازگاری ولتاژ                   | ۶۳۷ | ۸-۸ روند طراحی                             |
| ۷۰۲ | ۳-۴-۹ تزریق بار و نشت ساعت            | ۶۳۹ | ۱-۸-۸ VCOهای کم نویز                       |
| ۷۰۳ | ۴-۴-۹ عدم تطبیق تصادفی بین جریان‌های  | ۶۴۲ | ۹-۸ اتصال به نوسان‌گر محلی                 |
| ۷۰۳ | Up و Down                             | ۶۴۳ | ۱۰-۸ مدل ریاضی VCOها                       |
| ۷۰۴ | ۵-۴-۹ مدولاسیون طول کانال             | ۶۴۷ | ۱۱-۸ نوسان‌گرهای متعامد                    |
| ۷۰۶ | ۶-۴-۹ تکنیک‌های مداری                 | ۶۴۷ | ۱-۱۱-۸ مفاهیم پایه‌ای                      |
| ۷۱۰ | ۵-۹ نویز فاز در PLLها                 | ۶۵۱ | ۲-۱۱-۸ ویژگی‌های نوسان‌گرهای تزویج شده     |
| ۷۱۰ | ۱-۵-۹ نویز فاز VCO                    | ۶۵۶ | ۳-۱۱-۸ نوسان‌گرهای متعامد بهبود یافته      |
| ۷۱۵ | ۲-۵-۹ نویز فاز مرجع                   | ۶۵۹ | ۱۲-۸ ضمیمه الف: شبیه‌سازی نوسان‌گرهای      |
| ۷۱۶ | ۶-۹ پهنای باند حلقه                   | ۶۶۰ | متعامد                                     |
| ۷۱۷ | ۷-۹ روش طراحی                         | ۶۶۰ | مراجع                                      |
| ۷۱۸ | ۸-۹ پیوست یک: حاشیه فاز PLLهای نوع دو | ۶۶۱ | مسائل                                      |
|     |                                       | ۶۶۳ | ۱۳-۸ ضمیمه ی (ب) *                         |
|     |                                       | ۶۶۶ | مراجع                                      |

|     |        |                          |     |       |
|-----|--------|--------------------------|-----|-------|
| ۸۱۳ | ۳-۱۱   | روش‌های کاهش نویز کوانتش | ۷۲۳ | مراجع |
| ۸۱۳ | ۱-۳-۱۱ | پیشخور DAC               | ۷۲۳ | مسائل |
| ۸۱۶ | ۲-۳-۱۱ | تقسیم‌کننده کسری         |     |       |
| ۸۱۸ | ۳-۳-۱۱ | دو برابر کردن مرجع       |     |       |
| ۸۲۰ | ۴-۳-۱۱ | تقسیم فرکانسی چند فازی   |     |       |
| ۸۲۳ | ۴-۱۱   | پیوست ۱: طیف نویز کوانتش |     |       |
| ۸۲۳ |        | مراجع                    |     |       |
| ۸۲۴ |        | مسائل                    |     |       |

## فصل ۱۰

## مولدهای فرکانسی عدد صحیح

|     |        |                                 |
|-----|--------|---------------------------------|
| ۷۲۷ | ۱-۱۰   | ملاحظات عمومی                   |
| ۷۳۱ | ۲-۱۰   | مولد فرکانسی عدد صحیح ساده      |
| ۷۳۳ | ۳-۱۰   | رفتار نشست                      |
| ۷۳۶ | ۴-۱۰   | روش‌های کاهش مؤلفه ناخواسته     |
| ۷۳۹ | ۵-۱۰   | مدولاسیون بر اساس PLL           |
| ۷۳۹ | ۱-۵-۱۰ | مدولاسیون داخل حلقه             |
| ۷۴۲ | ۲-۵-۱۰ | مدولاسیون توسط PLL های جابه‌جا  |
| ۷۴۶ | ۶-۱۰   | طراحی تقسیم‌کننده               |
| ۷۴۷ | ۱-۶-۱۰ | تقسیم‌کننده پالس خور            |
| ۷۴۹ | ۲-۶-۱۰ | تقسیم‌کننده‌های دو ضربه         |
| ۷۵۲ | ۳-۶-۱۰ | انتخاب ضربه پیش مقیاس‌گر        |
| ۷۵۵ | ۴-۶-۱۰ | انواع مدار منطقی تقسیم‌کننده‌ها |
| ۷۷۳ | ۵-۶-۱۰ | تقسیم‌کننده میلر                |
| ۷۸۰ | ۶-۶-۱۰ | تقسیم‌کننده‌های قفل شده تزریقی  |
| ۷۸۳ | ۷-۶-۱۰ | تاخیر تقسیم‌کننده و نویز فاز    |
| ۷۸۵ |        | مراجع                           |
| ۷۸۶ |        | مسائل                           |

## فصل ۱۲

## تقویت‌کننده‌های توان

|     |        |                                    |
|-----|--------|------------------------------------|
| ۸۲۵ | ۱-۱۲   | ملاحظات عمومی                      |
| ۸۲۸ | ۱-۱-۱۲ | اثر جریان‌های بزرگ                 |
| ۸۲۹ | ۲-۱-۱۲ | بازده                              |
| ۸۳۰ | ۳-۱-۱۲ | خطسانی                             |
|     | ۴-۱-۱۲ | تقویت‌کننده‌های توان تفاضلی و      |
| ۸۳۲ |        | تک سر                              |
| ۸۳۴ | ۲-۱۲   | طبقه‌بندی تقویت‌کننده‌های توان     |
| ۸۳۴ | ۱-۲-۱۲ | تقویت‌کننده‌های توان کلاس A        |
| ۸۳۸ | ۲-۲-۱۲ | تقویت‌کننده‌های توان کلاس B        |
| ۸۴۲ | ۳-۲-۱۲ | تقویت‌کننده‌های توان کلاس C        |
| ۸۴۴ | ۳-۱۲   | تقویت‌کننده‌های توان با بازده بالا |
|     | ۱-۳-۱۲ | طبقه تقویت‌کننده کلاس A            |
| ۸۴۴ |        | با بهبود هارمونیک                  |
| ۸۴۵ | ۲-۳-۱۲ | طبقه کلاس E                        |
| ۸۴۹ | ۳-۳-۱۲ | تقویت‌کننده‌های توان کلاس F        |
| ۸۵۰ | ۴-۱۲   | طبقات خروجی دوش سوار               |
| ۸۵۳ | ۵-۱۲   | تطبیق امپدانس میگنال بزرگ          |
| ۸۵۶ | ۶-۱۲   | روش پایه‌ای خطی سازی               |
| ۸۵۷ | ۱-۶-۱۲ | پیشخور                             |
| ۸۶۰ | ۲-۶-۱۲ | پسخور کارترین                      |
| ۸۶۱ | ۳-۶-۱۲ | پیش اعوجاج                         |
| ۸۶۳ | ۴-۶-۱۲ | پسخور پوش                          |
| ۸۶۴ | ۷-۱۲   | مدولاسیون قطبی                     |

## فصل ۱۱

## مولدهای فرکانسی عدد کسری

|     |        |                            |
|-----|--------|----------------------------|
| ۷۸۹ | ۱-۱۱   | مفاهیم اولیه               |
| ۷۸۹ | ۲-۱۱   | تصادفی سازی و شکل دهی نویز |
| ۷۹۲ | ۱-۲-۱۱ | تصادفی سازی ضربه           |
| ۷۹۶ | ۲-۲-۱۱ | شکل دهی پایه‌ای نویز       |
| ۸۰۲ | ۳-۲-۱۱ | شکل دهی نویز مراتب بالاتر  |
| ۸۰۶ | ۴-۲-۱۱ | مشکل نویز خارج از باند     |
| ۸۰۸ | ۵-۲-۱۱ | اثر عدم تطبیق پمپ بار      |

|     |                          |         |                                       |
|-----|--------------------------|---------|---------------------------------------|
| ۹۴۳ | ۴-۱۳ طراحی مولد فرکانس   | ۸۶۵     | ۱-۷-۱۲ ایده ابتدایی                   |
| ۹۴۳ | ۱-۴-۱۳ طراحی VCO         | ۸۶۸     | ۲-۷-۱۲ مشکلات مدولاسیون قطبی          |
| ۹۵۲ | ۲-۴-۱۳ طراحی تقسیم‌کننده | ۸۷۰     | ۳-۷-۱۲ روش مدولاسیون قطبی بهبود یافته |
| ۹۵۶ | ۳-۴-۱۳ طراحی حلقه        | ۸۷۷     | ۸-۱۲ برون فازی                        |
| ۹۶۰ | مراجع                    | ۸۷۷     | ۱-۸-۱۲ ایده اولیه                     |
| ۹۶۰ | مسائل                    | ۸۷۹     | ۲-۸-۱۲ مشکلات برون فازی               |
|     |                          | ۸۸۵     | ۹-۱۲ تقویت‌کننده‌های توان دوهرتی      |
|     |                          | ۸۸۸     | ۱۰-۱۲ مثال‌های طراحی                  |
|     |                          | ۱-۱۰-۱۲ | ۱-۱۰-۱۲ مثال‌های تقویت‌کننده توان     |

## فصل ۱۴ \*

### مثالی از طراحی فرستنده - گیرنده

|     |                                      |
|-----|--------------------------------------|
| ۹۶۳ | ۴G/LTE                               |
| ۹۶۳ | ۱-۱۴ معرفی استاندارد ۴G              |
|     | ۲-۱۴ طراحی سیستمی یک فرستنده-گیرنده  |
| ۹۶۵ | ۴G/LTE                               |
| ۹۶۵ | ۱-۲-۱۴ حساسیت                        |
| ۹۶۵ | ۲-۲-۱۴ غیرخطسانی                     |
| ۹۶۷ | ۳-۲-۱۴ نقطه فشرده‌گی -1dB            |
| ۹۶۷ | ۴-۲-۱۴ $IIP_r$                       |
| ۹۶۸ | ۵-۲-۱۴ محدوده بهره                   |
| ۹۶۸ | ۶-۲-۱۴ عدم تطبیق I/Q                 |
| ۹۶۸ | ۷-۲-۱۴ فرستنده                       |
| ۹۶۹ | ۸-۲-۱۴ مولد فرکانسی                  |
| ۹۷۰ | ۳-۱۲ بودجه‌بندی پارامترها            |
| ۹۷۰ | ۱-۳-۱۴ عدد نویز (NF)                 |
| ۹۷۰ | ۲-۳-۱۴ $IIP_r$                       |
| ۹۷۰ | ۳-۳-۱۴ فیلترها                       |
| ۹۷۱ | ۴-۱۴ نتایج محاسبات سطح سیستمی        |
| ۹۷۳ | ۵-۱۴ برنامه‌ریزی فرکانس              |
| ۹۷۶ | ۶-۱۴ طراحی LNA                       |
| ۹۷۷ | ۱-۶-۱۴ تطبیق امپدانس در ورودی        |
|     | ۲-۶-۱۴ مشخص کردن مقدار $g_m$ و ابعاد |
| ۹۷۸ | ترانزیستور $M_1$                     |
| ۹۷۸ | ۳-۶-۱۴ تعیین بهره                    |
| ۹۷۹ | ۴-۶-۱۴ طراحی بهره متغیر در LNA       |
| ۹۸۰ | ۵-۶-۱۴ نتایج شبیه‌سازی               |

## فصل ۱۳

### مثالی از طراحی فرستنده - گیرنده

|     |                                  |
|-----|----------------------------------|
| ۹۰۷ | ۱-۱۳ ملاحظات سطح سیستم           |
| ۹۰۷ | ۱-۱-۱۳ گیرنده                    |
| ۹۰۸ | ۲-۱-۱۳ فرستنده                   |
| ۹۱۲ | ۳-۱-۱۳ مولد فرکانسی              |
| ۹۱۴ | ۴-۱-۱۳ برنامه‌ریزی فرکانسی       |
| ۹۲۲ | ۲-۱۳ طراحی گیرنده                |
| ۹۲۳ | ۱-۲-۱۳ طراحی تقویت‌کننده کم نویز |
| ۹۲۵ | ۲-۲-۱۳ طراحی مخلوط‌کننده         |
| ۹۳۰ | ۳-۲-۱۳ کنترل خودکار بهره         |
| ۹۳۵ | ۳-۱۳ طراحی فرستنده               |
| ۹۳۵ | ۱-۳-۱۳ طراحی تقویت‌کننده توان    |
| ۹۴۰ | ۲-۳-۱۳ بالابر                    |

|      |         |                          |     |         |                            |
|------|---------|--------------------------|-----|---------|----------------------------|
| ۹۹۱  | ۲-۱۰-۱۴ | نویز مخلوط‌کننده         | ۹۸۲ | ۷-۱۴    | مولد فرکانسی               |
|      | ۱۱-۱۴   | طراحی تقویت‌کننده توان و | ۹۸۲ | ۱-۷-۱۴  | طراحی مدار پمپ بار و LPF   |
| ۹۹۱  |         | پیش راه‌انداز            | ۹۸۳ | ۲-۷-۱۴  | انتخاب ساختار VCO          |
| ۹۹۲  | ۱-۱۱-۱۴ | نتایج شبیه‌سازی          | ۹۸۳ | ۳-۷-۱۴  | طراحی VCO                  |
| ۹۹۵  | ۱۲-۱۴   | جمع‌بندی و نتیجه‌گیری    | ۹۸۴ | ۴-۷-۱۴  | نتایج شبیه‌سازی            |
| ۹۹۶  |         | مراجع                    | ۹۸۶ | ۸-۱۴    | تقسیم‌کننده                |
|      |         |                          | ۹۸۶ | ۹-۱۴    | طراحی مخلوط‌کننده پایین‌بر |
|      |         |                          |     | ۱-۹-۱۴  | عملکرد فرکانسی و بهره      |
|      |         |                          | ۹۸۸ |         | مخلوط‌کننده                |
| ۹۹۷  |         | تمرین‌ها                 | ۹۸۸ | ۲-۹-۱۴  | بررسی نویز مخلوط‌کننده     |
|      |         |                          | ۹۸۸ | ۳-۹-۱۴  | شبیه‌سازی عدد نویز (NF)    |
| ۱۰۲۱ |         | واژه‌نامه                | ۹۸۹ | ۴-۹-۱۴  | شبیه‌سازی IP <sub>m</sub>  |
| ۱۰۳۲ |         | نمایه                    | ۹۸۹ | ۱۰-۱۴   | طراحی مخلوط‌کننده بالا‌بر  |
|      |         |                          | ۹۹۰ | ۱-۱۰-۱۴ | بهره و لتاز                |

www.ketaboo.ir